



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

**ESTUDIO DE LAS VARIACIONES ESPACIO-TEMPORALES
DEL ESPESOR ÓPTICO DEL AEROSOL ATMOSFÉRICO EN EL
NOROESTE DE MÉXICO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

RICARDO MAGDALENO LLAMAS BARBA

Asesor: Lic. Roberto Bonifaz Alfonzo



MÉXICO, D.F.

DICIEMBRE, 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

¿Es que hacemos las cosas sólo para recordarlas?
¿Es que vivimos sólo para tener memoria de nuestra vida?
Porque sucede que hasta la esperanza es memoria y
que el deseo es el recuerdo de lo que ha de venir.

Jaime Sabines

Ara que em sento capaç de cantar si un altra canta. Avui
que encara tinc veu, vull cantar a les pedres, la terra,
l'aigua, al blat i al camí que vaig trepitjant, a la nit, al cel,
a aquest mar tan nostre, i al vent que al matí ve a besar-me
el rostre. Vull alçar la veu, per una tempesta, per un raig
de sol, o pel rossinyol que ha de cantar al vespre.

Joan Manuel Serrat

DEDICATORIA

A la memoria de mi Abuelo; Jesús Barba †

A mi más grande apoyo, que más que haberme brindado el regalo de la vida me ha llenado de amor y comprensión todos estos años, eres tú quien siempre motiva mis esfuerzos por darle sentido a mi existencia y quien ha apoyado la realización de mis más grandes locuras. No encuentro la forma de agradecerte todos tus desvelos, todos tus sacrificios y todos tus consejos, ni tampoco tengo palabras para expresar la admiración que siento por ti. Este logro es también tuyo, por que ha sido tu esfuerzo el que lo ha hecho posible.

Gracias Mamá

A mi Padre, Magdaleno Llamas, por demostrarme con sus actos más que con sus palabras que la perseverancia y el esfuerzo en el trabajo son los principales ingredientes para una vida prospera, por darme además la oportunidad de realizar mis sueños y confiar en mí aún cuando las cosas no siempre marcharon bien, por ser testigo de mis logros y entender mis fracasos. Gracias por tus sacrificios y tu empeño en hacer de mis hermanos y de mí lo que ahora somos.

A mi hermano Luis Felipe por haberme brindado su apoyo y protección a lo largo de tantos años, por confiar en mí y haber compartido conmigo tantas experiencias alrededor del mundo, por escuchar mis nimiedades en incontables ocasiones y por ser uno de mis más severos críticos, gracias por tus esfuerzos al lado de nuestros padres que hicieron posible que pudiera encontrar mi camino con libertad y alcanzar mis metas.

A mi pequeño hermano Ulises, la luz que ilumina los días de mi familia y que me compromete en ser un digno ejemplo a seguir para un ser humano tan frágil y en el que deposito tantas esperanzas, estoy seguro de que no defraudaras ninguna de las expectativas puestas en ti y espero poder aprender mucho de la gran persona que serás con los años, así como ser parte de la construcción de una vida colmada de éxito personal y satisfacciones para nuestros padres.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme brindado estos años de formación profesional pero sobretodo por darme la oportunidad de redescubrir el mundo a través de las enseñanzas de todas las personas que en ella he conocido.

Al Dr. Roberto Bonifaz Alfonzo por su gran apoyo y paciencia en estos años dentro del Instituto de Geofísica, por todos sus consejos y por su invaluable amistad. Gracias por aumentar exponencialmente mi ignorancia, porque gracias a todo lo que de usted he aprendido me he dado cuenta del universo de conocimientos que aún debo perseguir. Para usted, mi mayor respeto, pero sobre todo mi más grande admiración.

Al Dr. Mauro Valdés Barrón, por haber sido participe de este logro personal, por sus atinadas observaciones, por su fe y confianza en mí y por sus sabios consejos tanto en el campo académico como fuera de él.

A mis grandes amigos, César Galicia, Mynjell Salcedo, Xóchitl Ramírez, Juan Luis Aguilar, David Rodríguez y Guillermo Mora por estar siempre cerca de mí, por su amistad incondicional, por sus consejos y por haber compartido un sin número de aventuras conmigo durante todos estos años, en especial a ti Xóchitl por ser como una hermana, por vivir juntos la gran experiencia que representó el proyecto de Alfabetización en la Montaña de Guerrero y por ser uno de los pilares más importantes en mi vida.

A mis hermanos de la Facultad, Ricardo Campos y Tomás Martínez por ser fieles a nuestra amistad y por compartir conmigo la aventura de nuestra estancia en Vancouver, no hubiera podido desear vivir todo eso con alguien más que con ustedes.

A la Ingeniera Mariana González por revolucionar mi concepción del mundo e impulsar todos mis actos con gran ímpetu, gracias por haber aparecido en mi vida y confrontar radicalmente mis ideas, espero siempre poder encontrar mi rumbo y me sea posible recurrir a ti para no perderlo.

A mis compañeros del colegio de Geografía; Fabiola Gress, gracias por iluminar mi camino en momentos de gran oscuridad y haberme enseñado más cosas de las que puedas imaginar, por tu invaluable compañía y tu gran comprensión, Sara Espinoza, gracias por los momentos vividos juntos y por tus duras críticas que generaron reflexiones trascendentales en mi vida. María Cabeza, agradezco tu amistad, los muy divertidos momentos que compartiste con tus grandes amigos mexicanos y tu gran espíritu chilango. Mónica López, gracias por tu aprecio y sinceridad, por tus lindos detalles y por compartir tu gran calidez humana. Guillermo Tovar, gracias por tus aportaciones en mi formación profesional. Yakir Sagal, te agradezco tu sincera amistad y las grandes lecciones que siempre obtengo de las amenas conversaciones contigo. César Medina, Arturo Moyado, Ricardo Morales, Juan Carlos Cabrera, Marel Hernández, Erika Parra, Mauricio Domínguez, Hazziel Padilla, Roberto Ávila, Berenice Martínez, Eduardo Morales, Mauricio Sotelo, Mariela Díaz, Itchel Peña y Alejandra Mendoza muchas gracias por su sincera amistad y por ser excelentes compañeros durante los años de la licenciatura.

A aquellas personas que de una forma u otra han marcado importantes etapas de mi vida y me han guiado con gran sabiduría, en especial a la Dra. Laura Maderey, al Dr. Jorge Caire †, a la Lic. Claudia Becerril, a la entrenadora Nara Medina, y a los profesores Pedro Gómez y Jenny del IPN.

A mis hermanos de la Escuela Nacional Preparatoria No. 9, Adriana Hernández, Dulce Licon, Zenzel, Erick Muñoz, Berenice Carreón, Fanny Huazo, Fátima Vela, Genaro Santillán, Vania, Luisito, Iván Valverde y Lucy por apoyarme en todos mis proyectos y por ser parte de mi vida.

A mis compañeros del programa de Alfabetización en la Montaña de Guerrero, Araceli Nieto, Gilda Álvarez, Jessica Hernández, Belinda Barragán, Sergio Cañedo, Nury Martínez, Lenin Guevara, Víctor Cruz y Martha Zárate así como a mi compañero Osvaldo Hernández del Canto del Ahuehuete A.C., gracias por redescubrir el mundo conmigo durante el periodo en que dejé en espera este trabajo para perseguir y compartir sueños junto a ustedes en la Sierra Madre del Sur con las comunidades Mixtecas, Me'phaa y Nahuas de esa hermosa región en la que he dejado una parte de mi.

Contenido

Introducción.....	1
Capítulo I.....	5
Los Aerosoles Atmosféricos y su Óptica	5
1.1 Orígenes y efectos de las partículas Aerosoles en la Atmósfera	5
1.1.1 Aerosoles Atmosféricos	5
1.1.2 Origen Natural	10
1.1.3 Origen Antropogénico	12
1.1.4 Propiedades Ópticas del Aerosol.....	14
1.1.5 Espesor Óptico de la Atmósfera	16
Capítulo II.....	18
El Uso del sensor MODIS en la determinación del Espesor Óptico en el Noroeste de México.....	18
2.1 Características del sensor MODIS y la medición del AOT	18
2.1.1 Especificaciones de MODIS.....	20
2.1.2 Espesor Óptico del Aerosol mediante MODIS.....	25
2.2 Las Técnicas de Validación por medio de Fotómetros.....	30
2.2.1 Medición de los Aerosoles desde la Superficie Terrestre.....	30
2.2.2 Características de la Red de Fotómetros AERONET	33
2.3 Aspectos Físico - Geográficos de la Región Noroeste, Sonora	36
2.3.1 Ubicación	36
2.3.2 Rasgos Geológicos y Relieve	39
2.3.3 Clima	42
Capítulo III.....	48
Metodología y Conjunto de Datos	48
3.1 Procesamiento digital de las imágenes y obtención de datos.....	50
3.1.1 Datos MODIS.....	52
3.1.2 Valores del AOT mediante MODIS	57
3.1.3 Datos AERONET	61
3.1.4 Valores del AOT mediante AERONET	63
Capítulo IV.....	66
Análisis de Resultados	66
4.1 Validación MODIS/AERONET	66
4.2 Comportamiento Espacio-Temporal del Aerosol en el Noroeste de México.....	79
4.2.1 Análisis Temporal	79
4.2.2 Análisis Espacial	92
Conclusiones	112
Referencias.....	116
Anexos	119

Índice de Figuras

Figura 1. Comparación del tamaño de partículas.-----	6
Figura 2. La erupción del Mte. Sta Helena. -----	11
Figura 3. Principales fuentes de emisión de partículas aerosoles. -----	13
Figura 4. Espectroradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS). -----	19
Figura 5. Vista previa de la zona de cobertura en una toma de MODIS de espesor óptico. -----	29
Figura 6. Centro regional del Instituto de Geología en la ciudad de Hermosillo, Sonora. -----	31
Figura 7. Fotómetro portátil MICROTOPS II. -----	32
Figura 8. Fotómetro CIMEL de la red AERONET en la ciudad de Hermosillo, Sonora. -----	34
Figura 9. Localización de los puntos de medición de la red AERONET en la república mexicana.-----	35
Figura 10. Ubicación del estado de Sonora.-----	38
Figura 11. Hipsometría y principales elevaciones del estado de Sonora.-----	41
Figura 12. Localización de los puntos de medición del AOT, Inst. Geofísica.-----	45
Figura 13. Espectro electromagnético.-----	49
Figura 14. Selección del tipo de producto y periodo de los datos.-----	52
Figura 15. Selección espacial de la información.-----	53
Figura 16. Conjunto de archivos MOD04L2.-----	53
Figura 17. Selección visual de imágenes MODIS. 1-----	54
Figura 18. Selección visual de imágenes MODIS. 2-----	54
Figura 19. Selección visual de imágenes MODIS. 3-----	54
Figura 20. Diferentes áreas de selección en las imágenes del AOT.-----	58
Figura 21. Selección de la región de interés (5x5 píxeles) en la ciudad de Hermosillo.-----	59
Figura 22. estadísticas del AOT en el área de selección de la ciudad de Hermosillo.-----	60
Figura 23. Selección del sitio de medición de los valores del AOT en la red AEROENT.-----	61
Figura 24. Selección del tipo y periodo de los datos.-----	62
Figura 25. Selección de de datos AEROENT en SQL.-----	64
Figura 26. Resultados de la selección después de la indicación con los querys en SQL.-----	64
Figura 27. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Enero, 2001.-----	99
Figura 28. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Febrero, 2001.-----	99
Figura 29. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Marzo, 2001.-----	100
Figura 30. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Abril, 2001.-----	100
Figura 31. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Mayo, 2001.-----	101
Figura 32. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Junio, 2001.-----	101
Figura 33. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Julio, 2001.-----	102
Figura 34. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Agosto, 2001.-----	102
Figura 35. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Septiembre, 2001.-----	103
Figura 36. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Octubre, 2001.-----	103
Figura 37. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Noviembre, 2001.-----	104
Figura 38. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Diciembre, 2001.-----	104
Figura 39. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Enero, 2002.-----	105
Figura 40. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Marzo, 2002.-----	105
Figura 41. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Junio, 2002.-----	106
Figura 42. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Septiembre, 2001.-----	106
Figura 43. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Noviembre, 2002.-----	107
Figura 44. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Diciembre, 2002.-----	107
Figura 45. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Abril, 2003.-----	108
Figura 46. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Mayo, 2003.-----	108

Figura 47. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Julio, 2003.-----	109
Figura 48. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Agosto, 2003.-----	109
Figura 49. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Septiembre, 2003.-----	110
Figura 50. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Octubre, 2003.-----	110
Figura 51. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Noviembre, 2003.-----	111
Figura 52. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Diciembre, 2003.-----	111

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Análisis de la precipitación media mensual total en los sitios de medición del AOT. -----	46
Gráfica 2. Análisis de la temperatura media mensual en los sitios de medición del AOT. -----	47
Gráfica 4. Desviación Estándar de los datos MODIS disponibles. -----	68
Gráfica 5. Desviación Estándar de los datos AERONET disponibles. -----	69
Gráfica 6. Correlación MODIS/AEROENT con los 50 datos de +/- 2 desviaciones estándar -----	70
Gráfica 7. Histograma de Frecuencias Acumuladas de los datos MODIS disponibles para la correlación.----	71
Gráfica 8. Histograma de Frecuencias Acumuladas de los datos AERONET disponibles para la correlación.72	
Gráfica 9. Correlación MODIS/AEROENT eliminando los valores ≥ 0.25 unidades. -----	74
Gráfica 10. Histograma de frecuencias acumuladas de errores absolutos. -----	75
Gráfica 11. Coeficiente de correlación final entre los valores de MODIS y AERONET. -----	78
Gráfica 12. Variaciones en el comportamiento del AOT, Enero.-----	90
Gráfica 13. Variaciones en el comportamiento del AOT, Febrero.-----	84
Gráfica 14. Variaciones en el comportamiento del AOT, Marzo.-----	90
Gráfica 15. Variaciones en el comportamiento del AOT, Abril.-----	84
Gráfica 16. Variaciones en el comportamiento del AOT, Mayo.-----	91
Gráfica 17. Variaciones en el comportamiento del AOT, Junio.-----	85
Gráfica 18. Variaciones en el comportamiento del AOT, Julio.-----	91
Gráfica 19. Variaciones en el comportamiento del AOT, Agosto. -----	85
Gráfica 20. Variaciones en el comportamiento del AOT, Septiembre.-----	92
Gráfica 21. Variaciones en el comportamiento del AOT, Octubre. -----	86
Gráfica 22. Variaciones en el comportamiento del AOT, Noviembre.-----	92
Gráfica 23. Variaciones en el comportamiento del AOT, Diciembre. -----	86
Gráfica 24. Comportamiento anual del AOT en Hermosillo, 2001 -----	88
Gráfica 25. Comportamiento anual del AOT en Hermosillo, 2002.-----	88
Gráfica 26. Comportamiento anual del AOT en Hermosillo, 2003.-----	89
Gráfica 27. Comportamiento general del AOT en Hermosillo, 2001 -2003-----	89

Índice de Tablas

Tabla 1. Concentraciones del Aerosol en la Atmósfera.-----	8
Tabla 2. Aerosoles de Origen Natural. -----	10
Tabla 3. Anchos de Banda del sensor MODIS. -----	22
Tabla 4. Descripción de Productos MODIS.-----	24
Tabla 5. Sitios de medición del Espesor Óptico durante la campaña de diciembre de 2009. -----	37
Tabla 6. Provincias Fisiográficas de Sonora. -----	39
Tabla 7. Principales elevaciones en el estado de Sonora. -----	40
Tabla 8. Distribución climática de Sonora por porcentaje de superficie.-----	43
Tabla 9. Propiedades cartográficas asignadas a las imágenes procesadas.-----	55
Tabla 10. Disponibilidad de datos MODIS/AERONET. -----	65
Tabla 11. Estadísticas básicas del conjunto inicial de datos MODIS/AERONET.-----	67
Tabla 12. Error absoluto entre los datos MODIS y AEROENT útiles para la correlación.-----	73
Tabla 13. Conjunto final de datos para el cálculo del coeficiente de correlación MODIS/AERONET. -----	76
Tabla 14. Estadísticas básicas del conjunto final de datos MODIS/AERONET. -----	77
Tabla 15. Comportamiento temporal del AOT sobre la ciudad de Hermosillo, 2001 – 2003. -----	82

Glosario de Acrónimos

- AOD. Aerosol Optical Depth (Profundidad Óptica del Aerosol)
- AERONET. Aerosol Robotic Network (Red Robótica de Aerosoles)
- AOT. Aerosol Optical Thickness (Espesor Óptico del Aerosol)
- AVHRR. Advanced Very High Resolution Radiometer (Radiómetro Avanzado de muy alta Resolución)
- BANAMEX. Banco Nacional de México
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua
- EOS. Earth Observing System (Sistema de Observación de la Tierra)
- GMT. Greenwich Mean Time (Hora del meridiano cero)
- GOES. Geostationary Operational Environmental Satellite (Satélite Geoestacionario de Operación Medioambiental)
- GSFC. Goddard Space Flight Center (Centro de Vuelo Espacial Goddard)
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía
- METEOSAT. Satélite Meteorológico de La Agencia Espacial Europea
- MODIS. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (Espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada)
- NASA. National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio)
- MSNM. Refiere la altitud de un punto en metros sobre el nivel del mar
- USGS. United States Geological Survey (Servicio Geológico de Estados Unidos)

Introducción

En el sistema solar la principal fuente de energía que reciben todos los cuerpos dentro de éste proviene del sol por medio de la emisión de radiación isotrópica; la cual se presenta en el planeta Tierra de manera constante en el tope de la porción más externa de la atmósfera; pero existen diversos factores que afectan la radiación incidente; éstos denominados factores terrestres, pueden ser tanto atmosféricos como de superficie e impactan directamente en las condiciones climáticas del planeta de manera regional e incluso local.

Como uno de los principales factores que interactúan activamente con la energía recibida del Sol se identifica a las partículas aerosoles, las cuales influyen en los procesos de absorción, refracción y dispersión de la radiación solar que se presentan en la atmósfera y generan una dinámica con el clima en la Tierra como consecuencia de estas interacciones.

En este trabajo, se aborda el estudio de estas partículas por medio del parámetro del espesor óptico de aerosol (AOT, Aerosol Optical Thickness) que representa un coeficiente de extinción de la radiación solar y que representa un índice de concentración de partículas suspendidas en la atmósfera, las cuales pueden ser identificadas en su densidad a través de instrumentos de medición in situ como fotómetros o mediante el uso de sensores remotos que realizan mediciones fuera de la atmósfera.

Existen diversos sensores que orbitan alrededor de la Tierra y son de gran utilidad en la adquisición de datos de numerosas variables naturales que sirven para la realización de estudios de la superficie terrestre y en el análisis de la dinámica de la atmósfera, algunos de los instrumentos que cumplen con esta función son AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), METEOSAT y MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) entre otros.

El último de estos instrumentos y uno de los más recientes, se encuentra a bordo de las plataformas, Terra y Aqua desde principios de esta década y ofrece la posibilidad de obtener valores referentes a una gran cantidad de datos atmosféricos, entre los cuales se pueden adquirir las mediciones del espesor óptico del aerosol (AOT) para el análisis de la pérdida de radiación entre la constante solar y la energía que incide en la superficie para posteriormente ser absorbida o reflejada.

Esta información resulta por demás útil no sólo como parte del estudio de la atmósfera, sino que además puede encontrar múltiples aplicaciones en investigaciones sobre cambio climático, contaminación atmosférica originada por actividades humanas y fenómenos naturales, así como la identificación de áreas óptimas en el aprovechamiento de energías alternativas y renovables como la proveniente del Sol.

Sin embargo, los datos proporcionados por el sensor MODIS deben ser validados antes de ser tomados en cuenta de manera definitiva, por lo que los instrumentos en superficie son una herramienta auxiliar para la realización de esta tarea como es el caso de los fotómetros de la Red Robótica para la medición de Aerosoles (AERONET), con los cuales es posible obtener valores del Espesor Óptico sobre un punto determinado, al mismo tiempo que la plataforma sobre la que se encuentra acoplado el sensor MODIS realiza su cobertura sobre la misma área.

En el presente estudio se realiza dicho proceso de validación para la región Noroeste de México, en la cual no existe ningún estudio de este tipo, por lo que resulta importante desarrollar una metodología estricta para el análisis de los datos iniciales que además fuera referenciada con investigaciones similares en otras regiones del planeta.

Dentro de la primera mitad de este trabajo se presentan las generalidades físicas de las partículas aerosoles así como sus distintos orígenes y la distribución más común que éstas presentan a lo largo de los diferentes estratos atmosféricos, así como desarrollar teóricamente los procesos que se generan en la interacción de estas con la radiación solar y cuál es el significado del coeficiente AOT en relación con la energía recibida del sol que interactúa con todos los elementos de la atmósfera.

También se caracterizan los dos instrumentos utilizados para la obtención de los datos finales con los que se realiza el análisis en las variaciones espacio-temporales del espesor óptico, presentando las características generales del sensor MODIS y del fotómetro AERONET así como los procesos de medición que utilizan ambos antes de la adquisición de los valores ya procesados para su utilización y tratamiento digital como imágenes.

En el tercer capítulo, se desarrolla el método utilizado para la adquisición y el refinamiento de los datos dentro del periodo 2001 – 2003, el cual fue seleccionado con base a la disposición de información a partir de los primeros años de funcionamiento del sensor MODIS en el satélite Terra que fue puesto en órbita en el año 2000 y a la disponibilidad de datos AERONET en la ciudad de Hermosillo, Sonora.

En el mismo apartado, se presentan los criterios para la determinación de la extensión del área en las que se procesaron los valores del AOT mediante el procesamiento de las imágenes digitales, los criterios para otorgar características cartográficas a las mismas y la extracción de las bandas espectrales correspondientes al espesor óptico del aerosol sobre la superficie continental.

También se describe el procedimiento mediante el cual se seleccionaron las mediciones del fotómetro localizado en el centro regional del Instituto de Geología en la ciudad de Hermosillo, y los parámetros utilizados en la depuración de los valores finales desde el conjunto inicial de las mediciones que realiza el instrumento.

En el último capítulo, se expone el proceso de validación entre ambas fuentes con el conjunto final de datos obtenidos previamente y se presentan los índices de correlación obtenidos bajo la aplicación de diferentes métodos estadísticos, con los cuales se otorga veracidad a los datos del sensor MODIS sobre Hermosillo y en toda la región Noroeste de México. Además se realiza el análisis del comportamiento temporal con base en las gráficas de comportamiento del AOT y el análisis espacial mediante los mapas de todos los meses en los que se posee información suficiente.

Finalmente, los resultados arrojados por la interpretación de la información contenida en todos los apartados de este trabajo pueden representar tan sólo mediciones abstractas que no pueden ser interpretadas o analizadas sin tener en cuenta las características físicas de la región; como el relieve, la circulación atmosférica, la cobertura vegetal y en algunos casos, episodios eruptivos que expulsan partículas de manera natural, además de los diversos factores antropogénicos que también tienen una relación directa con el aumento gradual o estacional del espesor óptico del aerosol, que es influido por la expansión de las áreas urbanas, el cambio de uso de suelo, y la emisión de biomasa derivada de la práctica de quemas estacionales en zonas de cultivo entre otros, por lo que en relación a las características físico-geográficas del Noroeste de México se pretende dilucidar los factores que generan las variaciones espacio-temporales del AOT con ayuda de la información disponible al respecto en el capítulo.

Objetivo General

Determinar el comportamiento del espesor óptico del aerosol en la región Noroeste de México a través del análisis de los datos en la ciudad de Hermosillo y la interpretación de la información proporcionada por sensores remotos mediante imágenes digitales para tratar de deducir los factores que incidan en la concentración de partículas suspendidas en la atmósfera.

Objetivos Particulares

- Adaptar una metodología para el estudio del AOT en el Noroeste de México.
- Obtener un coeficiente de correlación para la validación de datos de sensores remotos para el AOT con instrumentos en superficie.
- Demostrar la utilidad del procesamiento digital de imágenes en el análisis espacial.
- Determinar los datos validados del espesor óptico del aerosol en la ciudad de Hermosillo durante el periodo 2001-2003.
- Diferenciar los factores físico-geográficos que presentan mayor influencia en los valores del espesor óptico del aerosol.

Hipótesis

Los aspectos tanto físicos como humanos que conforman las características geográficas de una región son determinantes en las variaciones espacio – temporales del espesor óptico del aerosol y el análisis de las mediciones validadas de este parámetro lleva a entender mejor el comportamiento de las concentraciones de partículas suspendidas y de las propiedades ópticas de la atmósfera.

Capítulo I

Los Aerosoles Atmosféricos y su Óptica

1.1 Orígenes y efectos de las partículas Aerosoles en la Atmósfera

1.1.1 Aerosoles Atmosféricos

Un aerosol es una pequeña partícula sólida o líquida que permanece suspendida en la atmósfera y sigue el movimiento del viento dentro de ciertos límites (Iqbal, 1983). Claramente la lluvia, la nieve y el granizo no son consideradas partículas aerosoles, sin embargo el agua condensada en moléculas de vapor sí. A diferencia de los gases que se encuentran de manera permanente en la atmósfera, las partículas suspendidas tienen una considerable variación en su volumen, tamaño, distribución, forma y material que las compone.

El aerosol, es considerado materia particulada (*particulate matter*) y ésta proviene de tres principales fuentes en la atmósfera terrestre; pueden generarse desde la superficie de la Tierra, por la conversión de partículas de gas, y algunas otras ingresan desde el espacio y son denominadas *aerosol cósmico* (Kokhanovsky, 2008), incluso las partículas de agua y de hielo en las nubes se consideran aerosoles pero son estudiadas por una rama distinta de la física atmosférica conocida como física de nubes.

Los aerosoles provenientes de la superficie terrestre aportan alrededor del 50% de la concentración a escala global y se identifican de dos fuentes; las de origen *terrestre* y las de origen *marino*, en el caso de las fuentes terrestres se encuentran las emisiones generadas por la actividad industrial, el polen, los productos finos de las erupciones volcánicas, polvo meteorítico, tormentas de arena, incendios forestales y quemadas agrícolas. Las de origen marino son referidas a las provenientes de cristales de sal, la brisa marina y los núcleos higroscópicos de sal donde el agua es condensada por instantes (Iqbal, 1983).

En el caso de las partículas aerosoles de origen cósmico, sus efectos no resultan significativos en la parte baja de la atmósfera porque su concentración no es muy alta, sin embargo este mismo tipo de partícula puede influenciar notablemente las propiedades del aire en las capas más externas de la atmósfera donde la concentración de aerosol de origen terrestre es baja.

Los rangos en los que son divididas las partículas aerosoles (Figura 1) se clasifican en relación con su tamaño, teniendo así variaciones que van desde 10^{-3} a $100 \mu\text{m}$ (micrómetros); las partículas más pequeñas que también son llamadas *partículas aitken* se encuentran en un rango de 0.001 a $0.1 \mu\text{m}$; aquellas que varían en tamaño de 0.1 a $1.0 \mu\text{m}$ son consideradas *partículas grandes* y finalmente las de mayor radio son las *partículas gigantes* que van de 1 a $100 \mu\text{m}$ (Iqbal, 1983).

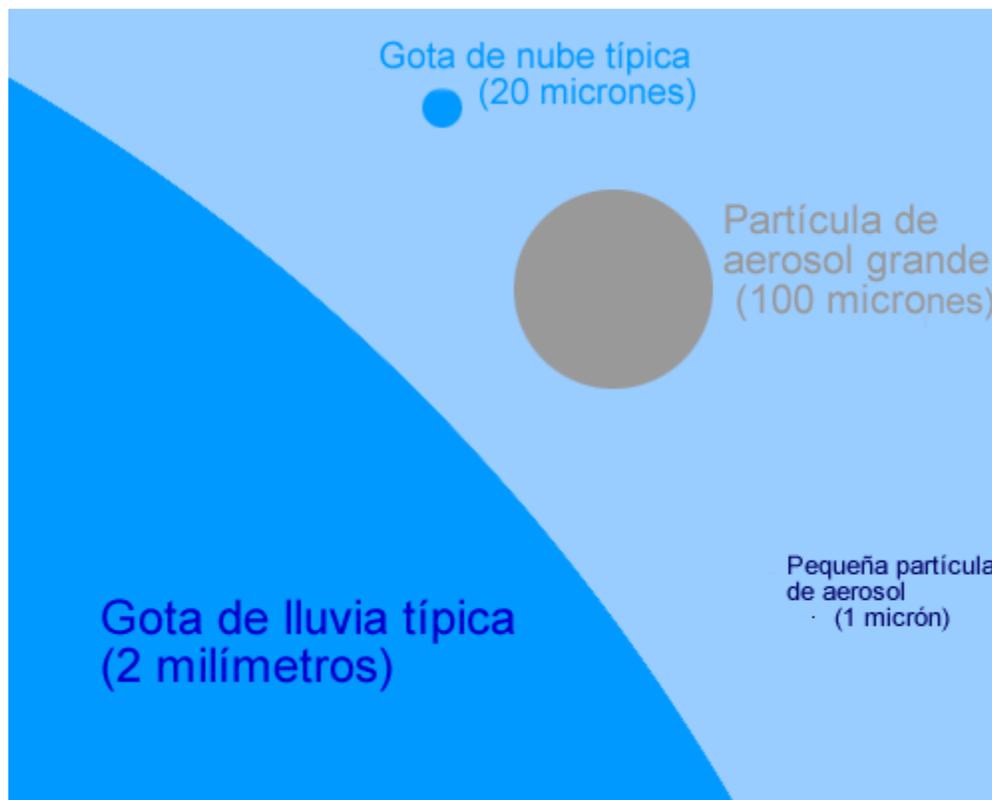


Figura 1. Comparación del tamaño de partículas. Fuente: http://pubs.ext.vt.edu/442/442-032/L_44203201.jpg

Regularmente las partículas aerosoles de polvo se encuentran en mayor concentración sobre las áreas continentales que sobre los cuerpos de agua interiores o el mar, además de ser más abundantes en la atmósfera durante las estaciones secas de cada región y bajas en los fríos vientos polares de los círculos árticos que presentan regularmente corrientes descendentes a diferencia del aire en las zonas tropicales donde se encuentran en una concentración más significativa y en las cuales las corrientes de viento son predominantemente ascendentes (Kokhanovsky, 2008).

Una atmósfera en la cual se encuentran suspendidas gran cantidad de partículas aerosoles es también llamada *turbia* (en inglés se refieren comúnmente los términos *turbid* o *hazy*) y esto provoca un efecto óptico que disminuye la radiación solar directa que incide sobre la superficie de la Tierra. Este parámetro se relaciona directamente con el alcance visual de un observador en la horizontal, pero intentar determinar la *turbiedad* de manera sensorial resulta una medición muy subjetiva (Iqbal, 1983).

La permanencia y la ubicación vertical de las partículas aerosoles en la atmósfera en general están determinadas por el tamaño de éstas, siendo así que las más grandes (más de 10 μm) son las más cercanas a la superficie y generalmente permanecen suspendidas unas cuantas horas hasta caer por gravedad, mientras que las de menor tamaño se localizan en estratos más elevados y pueden permanecer en suspensión por varias semanas en las que son transportadas hasta que generalmente son eliminadas por la precipitación, estas características son descritas por la fórmula de *Junge*¹ y son aplicables en la mayoría de las regiones del planeta, sin embargo hay zonas de la superficie donde sus características geográficas inciden en un comportamiento distinto de las partículas en la tropósfera.

¹ La función potencial de *Junge*, describe la concentración de partículas suspendidas en relación con su tamaño, pero resulta válida sólo para aquellas con radio mayor a 0.1 μm .

Las emisiones de los principales tipos de partículas y su aporte (Tabla 1) se identifican en los siguientes rangos según Landolt-Bornstein, 1988 (Kondratyev et al., 2006).

Tipo de Aerosol	Emisiones (10 ⁶ toneladas/año)
Sales marinas	500 - 2000
Aerosol formado en la Atmósfera desde la fase gaseosa	345 - 2080
Aerosol de polvo	7 - 1800
Aerosol biológico	80
Humo de incendios forestales	5 - 150
Aerosol volcánico	4 - 90
Aerosol antropogénico	181 - 396

Tabla 1. Concentraciones del aerosol en la atmósfera.

A veces la cantidad de aerosoles en la atmósfera es también referida por el número de partículas que se encuentran en un centímetro cúbico; y basándonos en este último criterio y en los mencionados anteriormente, se puede decir que la presencia de aerosoles atmosféricos puede ser identificada por cualquier persona bajo los parámetros de:

- a) Número de partículas de polvo por centímetro cúbico.
- b) Turbiedad Atmosférica.
- c) Visibilidad.

Generalmente el criterio del número de partículas por unidad de volumen no es medido, aunque los dos parámetros meteorológicos restantes son más comunes en la adquisición de datos atmosféricos (Iqbal, 1983), ya que para determinar la concentración de partículas Aerosoles en la atmósfera se utiliza un parámetro conocido como espesor óptico del aerosol (AOT, por sus siglas en inglés) que puede ser determinado mediante el uso de diversos instrumentos y cuyos datos son utilizados comúnmente para el análisis de las propiedades ópticas de la atmósfera y sus efectos directos e indirectos en el clima.

Además, la presencia de partículas aerosoles interactúa naturalmente con la radiación emitida por el sol y que llega a la Tierra en diferentes longitudes de onda; esta interacción influye directamente en procesos de extinción de la radiación como la absorción, refracción y dispersión, que si bien se dan de manera natural, pueden presentar variaciones ocasionadas por las actividades humanas o diversos fenómenos naturales que atenúan la constante solar y modifican la cantidad de energía que incide sobre la superficie terrestre proveniente del Sol.

Los aerosoles atmosféricos además juegan un rol importante en la investigación de muchos campos, como la contaminación del aire, el oscurecimiento de la atmósfera, la visibilidad, la transferencia de radiación, el comportamiento del clima y del tiempo atmosférico (Deepak, 1982).

Actualmente los resultados de numerosos modelos climáticos muestran que además de las variables comúnmente utilizadas para entender el sistema climático, también está la implicación de otros factores en el comportamiento del clima como el crecimiento de los componentes de gases menores desprendidos de las actividades humanas, la concentración de partículas aerosoles en la atmósfera, las erupciones volcánicas, cambios en la insolación atmosférica y otros factores, sin duda se están incrementando de manera general (Kondratyev et al., 2006).

El estudio de los Aerosoles y su entendimiento se ha incrementado mucho en los últimos años, llevando a aplicaciones de gran utilidad a través del uso de sensores remotos, que demuestran que mediante estos se pueden monitorear catástrofes naturales y humanas como erupciones volcánicas, incendios forestales, tormentas de arena y sismos entre otros, ya que las observaciones de las partículas Aerosoles están relacionados con estos fenómenos. Con el análisis de estas observaciones se ha podido determinar incluso que la formación de cierto tipo de nubes se presenta días antes de que se manifieste actividad sísmica en algunas regiones. Un fenómeno similar se presenta en las erupciones volcánicas, en particular se conoce el caso de México en donde por medio de mediciones desde la superficie se pudo observar que la concentración de partículas aerosoles se incrementó unas cuantas horas antes de una erupción (Kondratyev et al., 2006).

1.1.2 Origen Natural

Las partículas aerosoles se encuentran de manera natural en la atmósfera y se pueden ubicar por su origen en primarias y secundarias así como por su mecanismo de producción en los mismos parámetros mencionados. Las primarias o también llamadas fuentes directas de materia particulada son comúnmente de origen natural e incluyen meteoritos, los océanos, regiones áridas y semiáridas, material y biota terrestre (Tabla 2). Las fuentes secundarias o indirectas se encuentran en los estratos de la atmósfera donde se llevan a cabo las reacciones químicas que transforman los gases de origen natural o derivados de la actividad humana en partículas sólidas y líquidas (D'Almeida et al., 1991). Esta clasificación también comparte criterios con los de otros autores que consideran los mismos tipos de aerosoles naturales y que enfatizan la complejidad para separar las cantidades de estas partículas con las de origen antropogénico, (Kondratyev et al., 2006).

Fuentes	Principal Tipo de Partículas
Meteoritos	Polvo interplanetario
Océanos	Partículas de sal marina
Regiones áridas y semiáridas	Polvo Proveniente del suelo
Material terrestre	Detritos volcánicos
Biota terrestre	Material biológico
Conversión gas-partículas	Sulfatos, etc.

Tabla 2. Aerosoles de origen natural. Fuente: D'Almeida, 1991 y Kondratyev, 2006.

A pesar de la gran cantidad de estudios existente en torno a las principales fuentes de los aerosoles en la atmósfera, los porcentajes que son manejados por varios autores divergen mucho entre sí (Kondratyev et al., 2006), en algunos casos se considera que la contribución de las partículas de origen marino representan alrededor del 10%, mientras que otros investigadores sostienen que la existencia de aerosoles marinos representa un porcentaje mucho mayor al 30%, a diferencia de esto en diversos artículos por ejemplo se le otorga más importancia al suelo como formador por sobre las reacciones fotoquímicas que también dan origen a partículas atmosféricas.

Las mayores fuentes de aerosoles de origen natural son los volcanes (Figura 2), las tormentas de polvo y los incendios forestales y de pastizales. En el caso de los aerosoles volcánicos éstos pueden ser expulsados a la atmósfera en grandes cantidades a partir de la emisión de cenizas en una

erupción volcánica y generan un impacto importante en las condiciones atmosféricas de grandes áreas durante periodos prolongados.

La pulverización de agua marina también es una gran fuente de aerosoles aunque la mayoría de estos caen al mar cerca de donde fueron emitidos.



Figura 2. La erupción del Mte. Sta Helena en mayo de 1980 expulsó hacia la atmósfera un gran volumen de cenizas volcánicas consideradas como aerosoles. Este tipo de eventos son la principal fuente de emisión de partículas de origen natural. Fuente: USGS

1.1.3 Origen Antropogénico

Las actividades humanas tienen una gran influencia a escala planetaria, y no sólo en los cambios que son ampliamente visibles sobre la superficie de la Tierra, en la que el ser humano ha transformado históricamente el medio en el que se desenvuelve, construyendo grandes ciudades, amplias zonas de cultivos, agostadero para el ganado y todo aquel uso de suelo que sustenta las actividades de nuestra sociedad actualmente, sino que también y de manera muy particular se han producido alteraciones en la atmósfera generadas por la concentración de gases provenientes del crecimiento de las actividades industriales a lo largo del último siglo.

La mayor fuente de aerosoles debida a la actividad humana es la quema de combustibles en motores térmicos para el transporte y en centrales termoeléctricas para la generación de energía, además del polvo generado en las obras de construcción y otras zonas de la superficie donde el agua o la vegetación han sido removidas por el hombre, además de otras fuentes (Figura 3) (Kokhanovsky, 2008).

También, los aerosoles antropogénicos están determinados por las actividades humanas, principalmente por desechos industriales a través de las chimeneas de las fábricas, emisiones tóxicas de vehículos automotores, incendios, explosiones, la erosión el suelo por actividades agrícolas, y minas a cielo abierto. Estas fuentes emiten a la atmósfera entre 3 y 4 x10⁸ toneladas por año de partículas aerosoles (Kondratyev et al., 2006).

La concentración de estas emisiones representa un porcentaje bastante significativo de la materia particulada presente en la atmósfera; esto genera serios problemas de salud en las áreas industriales altamente contaminadas. Además el aerosol antropogénico es una de las principales fuentes en el proceso de cambio climático en el cual los gases de efecto invernadero calientan el planeta y las partículas aerosoles actúan en el sentido opuesto globalmente. Además, la limpieza del aire en las grandes ciudades respecto a las partículas aerosoles suspendidas puede conllevar a un calentamiento adicional en referencia al estado actual (Kokhanovsky, 2008).

En relación con lo anterior, aunque en algunas ocasiones son considerados como de una importancia marginal en su efecto sobre el cambio climático, los aerosoles troposféricos contribuyen substancialmente en el patrón de radiación solar incidente en la Tierra, y partículas como los aerosoles de sulfato han generado una mayor perturbación en ese patrón. Tanto el esparcimiento² directo de longitudes de onda cortas de radiación solar como la modificación de las propiedades reflectivas de ondas cortas de las nubes provocadas por el aerosol de sulfato incrementan el albedo en todo el planeta y ejercen una influencia de enfriamiento en la Tierra (Charlson et al., 1992; Martínez y Fernández, 2004).

Además, de acuerdo con Charlson et al. (1992), los efectos de las partículas aerosoles deben ser tomadas en cuenta en la evaluación de la influencia de las actividades humanas en el pasado, en el presente y en las condiciones climáticas futuras para la formulación de políticas que consideren el control de emisiones de gases de efecto invernadero y bióxido de azufre.

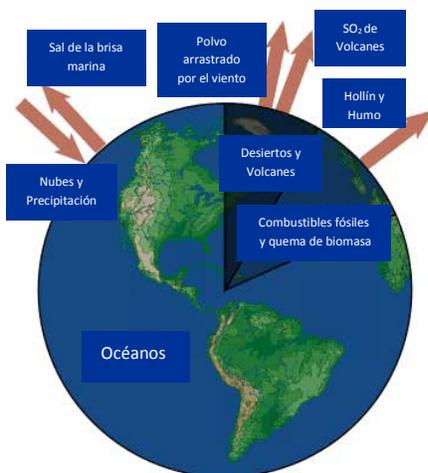


Figura 3. Principales fuentes de emisión de partículas aerosoles. Fuente: NASA's Observatory Website.

² No existe una traducción aceptada por la comunidad científica respecto al término “*scattering*” de manera generalizada, así mientras algunos autores adoptan la palabra difusión, esparcimiento o dispersión como el más adecuado, en el presente trabajo se utilizará la palabra “Esparciación” en base al criterio del Dr. Agustín Muhlia, 2009.

1.1.4 Propiedades Ópticas del Aerosol

La atmósfera de la Tierra está formada principalmente por moléculas de Nitrógeno y Oxígeno, aunque existen otros gases que la componen. En condiciones generales o de poca humedad, la composición del aire es de aproximadamente 78.08 % Nitrógeno, 20.98 % Oxígeno, 0.93 % Argón y 0.035 % Dióxido de carbono (Barry y Chorley, 2003), adicionalmente, la atmósfera terrestre contiene vapor de agua y materia particulada (*aerosoles*) como polvo, hollín, gotas de lluvia y cristales de hielo, los cuales tienen una gran variabilidad tanto en el tiempo como en el espacio (Iqbal, 1983).

Las partículas aerosoles interactúan de manera intensa con la atmósfera y con la radiación solar que incide en ésta, atenuando la cantidad de energía que el sol proporciona a la superficie terrestre en relación con la que se presenta en el tope de la atmósfera y la cual es conocida como *constante solar* (1366 W/m^2); esta atenuación se debe a las propiedades ópticas del Aerosol, las cuales están determinadas por su composición química, concentración, tamaño, forma y estructura interna, ya sean partículas líquidas o provenientes del suelo (Kokhanovsky, 2008).

Estas propiedades ópticas también son identificadas como los factores espectrales direccionales: “*absorción, reflexión y transmisión*”, y se refieren a los procesos que se presentan cuando una onda electromagnética alcanza un material (sólido, líquido o gaseoso), ésta se divide de manera general en dos o tres partes: una primera parte es reflejada por el material, una segunda es absorbida dentro de él, y en el caso más complicado una tercera que es transmitida, es decir, que emerge libremente del material después de haberlo atravesado (Chiron de la Casinière y Cachorro Revilla, 2008).

De acuerdo con Iqbal (1983), todas las moléculas de aire atenúan la energía solar por esparcimiento, y este fenómeno se presenta en todas las longitudes de onda y después genera un proceso continuo en el que estas moléculas de aire absorben energía solar pero en longitudes de onda específicas.

En relación con los procesos que considera (Chiron de la Casinière y Cachorro Revilla, 2008), se añade que la radiación dispersada en la Atmósfera es denominada *radiación difusa*, de ésta una porción regresa al espacio y la otra incide sobre la superficie. La radiación que llega a la superficie directamente de forma lineal desde el disco solar es llamada *radiación directa* (Iqbal, 1983).

Entre estos procesos, dos de ellos pueden ser denominados, de extinción de la “radiación solar directa” y se refiere esencialmente a los fenómenos de absorción y esparciamiento, basándose en la afirmación de que un fotón solar no es directo más que si no ha sido nunca fuerte y bruscamente desviado de la trayectoria rectilínea que se supone tendría que seguir desde su emisión del Sol.

La absorción, que transforma muy generalmente una parte de las ondas electromagnéticas directas incidentes en energía calorífica, se presenta en dos formas distintas (Chiron de la Casinière y Cachorro Revilla, 2008):

- *Absorción continua.* Es una atenuación que se produce en el curso del camino seguido por los fotones en el interior del aerosol y afecta a todo un rango de longitudes de onda, pero es generalmente débil y a veces resulta incluso despreciable.
- *Absorción selectiva.* Es el resultado de los choques de los fotones de las ondas electromagnéticas con las moléculas y/o átomos de los gases atmosféricos, induciendo así intercambios cuánticos de energía entre ellos. Solo ciertas longitudes de onda específicas son activadas en estas interacciones.

El segundo fenómeno, denominado esparciación, es el proceso por medio del cual la radiación o las ondas electromagnéticas incidentes son esparcidas en todas las direcciones del espacio por las moléculas de aire y por los aerosoles sólidos y/o líquidos. En este último caso puede también combinarse con reflexiones y refracciones en la interface entre la partícula y la atmósfera, así como con la difracción.

Estas propiedades son importantes para un gran número de aplicaciones, incluyendo la visibilidad atmosférica y los estudios de cambio climático, además del monitoreo desde el espacio de la materia particulada a través de sensores remotos. Gran cantidad de centros de investigación alrededor del mundo realizan estudios por medio de instrumentos a bordo de barcos, plataformas espaciales, aéreas y sitios sobre la superficie terrestre cuyos principales intereses son la determinación del espesor óptico del aerosol, la dispersión del albedo, los coeficientes de absorción y extinción (Kokhanovsky, 2008).

1.1.5 Espesor Óptico de la Atmósfera

Para determinar la transmitancia de la atmósfera en Tierra ante la radiación solar, esta es dividida en tres grupos: moléculas de aire, vapor de agua y aerosoles, actuando cada uno de estos en la atenuación de la energía que es recibida del sol ^(a) (Iqbal, 1983), en el caso de los aerosoles resulta muy útil poder expresar en ocasiones la concentración de partículas en la atmósfera (N) r , número de partículas de radio r , de un determinado medio en función de la distribución de tamaños de estas, $n(r)$ (Sobrino, 2000).

La concentración de las partículas se relaciona con la distribución de tamaños por medio de la siguiente expresión:

$$N(r) = \int_0^{\infty} n(r) dr \quad (a)$$

Para comprender los efectos de los aerosoles en la radiación solar resulta importante caracterizar la distribución de tamaños, ya que la absorción y el esparcimiento causado por las partículas suspendidas depende en gran medida de la relación entre el tamaño de los aerosoles y la longitud de onda de la radiación. Además esta distribución también proporciona información adicional acerca de la naturaleza de la fuente de emisión de las partículas (Sobrino, 2000).

Para poder encontrar la función en la expresión anterior se pueden aplicar diversas fórmulas, sin embargo la más utilizada es la *función potencial de Junge* ^(b) que resulta válida para tamaños de partículas con un radio superior a $r = 0.1 \mu\text{m}$.

$$\frac{dN}{d \log(r)} = \ln(10) \cdot C \cdot r_0 \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^{\alpha-1} \quad (b)$$

Donde $C = n(r_0)$ es la densidad de partículas con radio r_0 , N es el número de partículas con radio superior a r , r_0 es un radio arbitrario y α una variable adimensional con valores entre 3 y 5; el rango de validez de esta función es $r \in [0.1 - 100] \mu\text{m}$ (Timofeyev y Vasilev, 2008).

Es importante conocer la concentración en base al radio de las partículas ya que la densidad de éstas en la atmósfera es la que incide directamente en las variaciones del espesor óptico del aerosol³, el cual se refiere a una medida de transparencia y es definida como el logaritmo negativo de la fracción de la radiación solar que no es esparcida ni absorbida en una columna atmosférica. Este expresa la cantidad de luz que se pierde de un haz de luz solar por la absorción o la esparciación (GESDISC, 2009)

El espesor óptico del aerosol (AOT o AOD por sus siglas en inglés), también se puede entender como el grado en el cual los Aerosoles atmosféricos evitan la transmisión de la radiación solar y se define con la integral del coeficiente de extinción sobre una columna vertical. Este coeficiente de extinción es el agotamiento fraccional de la *irradiancia* por unidad de trayectoria de la longitud de onda. El espesor óptico a lo largo de una dirección vertical es llamado también “espesor óptico normal” (SERVIR, 2009).

Otra manera de entender el concepto de AOT es por ejemplo, a través de la siguiente ecuación ^(c):

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

Sí tomamos en cuenta a I_0 como la intensidad de la radiación en la fuente y aceptamos que I es la intensidad observada después de recorrer una cierta trayectoria, entonces podemos decir que el espesor óptico τ está definido por esta expresión.

³ En la comunidad científica de habla castellana no se ha hecho distinción entre los términos “*espesor*” y “*profundidad*”, como tampoco en el idioma inglés, utilizando las palabras “*thickness*” y “*depth*” respectivamente, sin embargo la primera se emplea para referirse tanto para referirse a la dirección vertical como inclinada y la segunda generalmente sólo para el primer caso (Chiron de la Casinière and Cachorro Revilla, 2008).

Capítulo II

El Uso del sensor MODIS en la determinación del Espesor Óptico en el Noroeste de México

2.1 Características del sensor MODIS y la medición del AOT

El desarrollo de la percepción remota a lo largo del tiempo ha servido para el estudio de los fenómenos y recursos naturales en la Tierra por medio de la prospección y la exploración de la superficie, demostrando que las plataformas de observación que se ubican a grandes alturas son las más útiles, en este caso, las de tipo espacial son las más adecuadas, puesto que los modernos detectores permiten obtener imágenes de la superficie terrestre con elementos de resolución de 30 m por lado, cubriendo escenas de aproximadamente 33 225 km² (Lira, 1995), mientras que otros sensores permiten adquirir imágenes de hasta 10 m x 10 m.

La variedad de características y propiedades físico-químicas del aerosol, así como la variabilidad espacio-temporal del mismo, requiere del desarrollo de modernos y complejos sistemas de monitoreo, los cuales puedan combinar las mediciones de satélites con los datos de una red global de monitoreo en superficie, que proporcione los tamaños de las partículas suspendidas, su composición química y sus propiedades ópticas (Kondratyev et al., 2006)

De acuerdo con Lira (1995), el hecho de que las plataformas espaciales se encuentren orbitando a varios cientos de kilómetros de la superficie hace que el detalle y la extensión cubiertos sean muy adecuados para aplicaciones geológicas y geofísicas, entre éstas claro el análisis de fenómenos atmosféricos como las propiedades ópticas de las partículas aerosoles a través de la resolución espacial.

Ya desde mediados de los años setenta se contaba con medios para la medición del espesor óptico, principalmente con el uso de satélites meteorológicos geoestacionarios y sensores meteorológicos dentro de la atmósfera; actualmente, estas mediciones se pueden obtener desde fuera de la atmósfera por medio de sensores remotos que se encuentran acoplados en plataformas espaciales y que proporcionan información de cualquier punto de la superficie.

A través de estimaciones de las posibles variaciones del total y de la fracción en longitudes de onda cortas, del flujo de radiación en la tropósfera se ha demostrado la dependencia en la divergencia de este flujo con el estado de las características ópticas de la atmósfera como el ángulo cenital solar, y otros factores más, en base a esto, hoy en día es posible obtener parámetros para el análisis del espesor óptico mediante sensores remotos como es el caso del uso del sensor MODIS (Figura 4) principalmente.



Figura 4. Espectroradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS). Fuente: The World Data Center for Remote Sensing of the Atmosphere.

2.1.1 Especificaciones de MODIS

Como se comentó en el punto anterior, antes de la puesta en órbita de los sensores MODIS, las mediciones respecto a la concentración de partículas suspendidas y las propiedades ópticas de la atmósfera se realizaban principalmente con satélites meteorológicos, aunque la obtención de datos se limitaba a mediciones de la reflectancia en un canal por medio de GOES y METEOSTAT, y en dos canales en el caso de AVHRR. En general no existía un esfuerzo real para la adquisición de datos del aerosol en la atmósfera a una escala global (NASA[b], 2010).

MODIS, es el nombre de un proyecto de observación de la Tierra desarrollado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA) para la adquisición de datos útiles en el análisis científico de la atmósfera, el océano y la superficie continental del planeta, está compuesto por sensores que se encuentran a bordo de dos plataformas aeroespaciales, Terra (EOS am) que fue lanzada al espacio el 18 de diciembre de 1999 y Aqua (EOS pm) que fue puesto en órbita fuera de la atmósfera el 4 de mayo del 2002; la plataforma Terra tiene una órbita descendente durante la mañana, mientras que la plataforma Aqua tiene una órbita ascendente pasando sobre el ecuador por la tarde. Ambas plataformas logran una cobertura completa de la superficie de la Tierra cada 1 o 2 días, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales o grupos de diferentes longitudes de onda.

Las dos plataformas a bordo de las cuales se encuentra el sensor MODIS poseen sistemas de orientación exterior para hacer posible la navegación espacial y que los datos recolectados en relación a su geolocalización se encuentren en un rango menor de 150 m al nadir. Esto es posible debido a la existencia de una red global de puntos de control en superficie que ayudan a mejorar la exactitud promedio de localización de cada satélite, en el caso de la plataforma Terra menor a 45 m y en el caso de Aqua menor a 60m (Qu et al., 2006).

Los sensores MODIS proveen además información espectral en un rango que va de 0.4 μm a 14.4 μm , esta amplitud de información en el espectro ofrece series de datos que sirven para estudios muy específicos acerca de diferentes fenómenos (Tabla 3). Dos de las bandas pueden ser procesadas en imágenes con una resolución nominal de 250 m al nadir, otras cinco bandas con una resolución de 500 m y las veintinueve restantes a 1 km. Además funcionan con un patrón de escáner de 55 grados orbitando a una altitud de 705 km sobre la superficie de la Tierra (NASA[a], 2010).

Los instrumentos de MODIS están diseñados para trabajar día y noche, sin embargo cuando el sensor se encuentra orbitando el lado oscuro de la Tierra, las bandas de reflectividad solar no son teledirigidas hacia la superficie y las tomas en las demás bandas espectrales no son registradas en archivos de salida de alta resolución (Qu et al., 2006).

La gran importancia que tiene MODIS es que proporciona información que es útil para el desarrollo de sistemas de validación global de instrumentos que se encuentran en la superficie terrestre y que ayudan al entendimiento de la interacción de los sistemas naturales en la Tierra, ofreciendo la oportunidad de generar modelos de predicción de cambios globales que ayuden a la toma de decisiones y elaboración de políticas en beneficio de la conservación del medio ambiente mundial (NASA[a], 2010).

Uso Principal	Banda	Ancho de Banda	Radiancia Espectral
Límites para Superficie/Nubes/Aerosoles	1	620 – 670 nm	21.8
	2	841 – 876 nm	24.7
Propiedades de Superficie/Nubes/Aerosoles	3	459 – 479 nm	35.3
	4	545 – 565 nm	29.0
	5	1230 – 1250 nm	5.4
	6	1628 – 1652 nm	7.3
	7	2105 – 2155 nm	1.0
Color del Océano/ Fitoplancton/ Biogeoquímica	8	405 – 420 nm	44.9
	9	438 – 448 nm	41.9
	10	483 – 493 nm	32.1
	11	526 – 536 nm	27.9
	12	546 – 556 nm	21.0
	13	662 – 672 nm	9.5
	14	673 – 683 nm	8.7
	15	743 – 753 nm	10.2
	16	862 – 877 nm	6.2
Vapor de Agua Atmosférico	17	890 – 920 nm	10.0
	18	931 – 941 nm	3.6
	19	915 – 965 nm	15.0
Temperatura Superficie/Nubes	20	3.660 - 3.840 μm	0.45(300K)
	21	3.929 - 3.989 μm	2.38(335K)
Temperatura Atmosférica	22	3.929 - 3.989 μm	0.67(300K)
	23	4.020 - 4.080 μm	0.79(300K)
	24	4.433 - 4.498 μm	0.17(250K)
	25	4.482 - 4.549 μm	0.59(275K)
	26	1.360 - 1.390 μm	6.00
Vapor de Agua en Nubes Cirrus	27	6.535 - 6.895 μm	1.16(240K)
	28	7.175 - 7.475 μm	2.18(250K)
	29	8.400 - 8.700 μm	9.58(300K)
Propiedades de Nubes	30	9.580 - 9.880 μm	3.69(250K)
	31	10.780 - 11.280 μm	9.55(300K)
Ozono	32	11.770 - 12.270 μm	8.94(300K)
	33	13.185 - 13.485 μm	4.52(260K)
	34	13.485 - 13.785 μm	3.76(250K)
	35	13.785 - 14.085 μm	3.11(240K)
	36	14.085 - 14.385 μm	2.08(220K)

Tabla 3. Anchos de Banda del sensor MODIS Fuente: (NASA[b], 2010).

El medio por el cual el instrumento obtiene cada parámetro es una serie de algoritmos específicos que en el caso de las partículas aerosoles permite que la teoría física y los procedimientos matemáticos conjugados con aceptaciones del comportamiento de la atmósfera sean aplicados para el cálculo que debe ser realizado al convertir las radiancias recibidas por los sensores en valores geofísicos (NASA[a], 2010).

Los diferentes parámetros de los cuales MODIS puede obtener datos son llamados *productos* y se dividen en cinco grandes grupos:

- Calibración (MOD 01 – MOD 03)
- Atmósfera (MOD 04 – MOD 08 y MOD 35)
- Continentales (MOD 09, MOD 11 – MOD 17 y MOD 43 – MOD 44)
- Criosfera (MOD 10 y MOD 29)
- Océanos (MOD 18 – MOD 28, MOD 36 – MOD 37 y MOD 39)

Dentro de los productos atmosféricos que están disponibles para efectos de investigación (Tabla 4) se encuentran los siguientes:

MOD #	Nombre del Producto
MOD 01	Computo de radiancias
MOD 02	Calibración y geolocalización de radiancias
MOD 03	Serie de datos de geolocalización
MOD 04	Producto Aerosol
MOD 05	Total de agua precipitable (vapor de agua)
MOD 06	Producto de nubes
MOD 07	Perfiles atmosféricos
MOD 08	Cuadrícula atmosférica (nivel 3)
MOD 09	Reflectancia de superficie corregida
MOD 10	Cobertura de nieve
MOD 11	Temperatura y emisividad superficial
MOD 12	Cambios en cobertura superficial
MOD 13	Índices de vegetación
MOD 14	Anomalías térmicas, incendios y quema de biomasa
MOD 15	Índice de área foliar
MOD 16	Resistencia y Evapotranspiración superficial
MOD 17	Producción vegetal,
MOD 18	Radiancia normalizada desde superficies acuosas
MOD 19	Concentración de pigmento
MOD 20	Fluorescencia de la clorofila
MOD 21	Concentración de pigmento por clorofila
MOD 22	Radiación activa fotosintética
MOD 23	Concentración de sólidos suspendidos sobre el océano
MOD 24	Concentración de materia orgánica
MOD 25	
MOD 26	Coefficiente de atenuación del agua oceánica
MOD 27	Productividad primaria sobre el océano
MOD 28	Temperatura superficial del mar
MOD 29	Cobertura de hielo marino
MOD 31	
MOD 35	Capa nubosa
MOD 36	Total del coeficiente de absorción
MOD 37	Propiedades del Aerosol marino
MOD 39	Aerosoles de hierro sobre el agua (Épsilon)
MOD 43	Albedo cada 16 días
MOD 44	Conversión de cobertura vegetal y campos continuos
MODISALB	Albedo de la nieve y el hielo marino

Tabla 4. Descripción de Productos MODIS. Fuente: (Qu et al., 2006)

2.1.2 Espesor Óptico del Aerosol mediante MODIS

Las ventajas del sensor MODIS en el estudio de fenómenos atmosféricos son muy amplias y en específico dentro del análisis del espesor óptico del aerosol (AOT); éste generalmente es utilizado para interpretar la concentración de partículas sólidas en la atmósfera y su conocimiento es útil en la realización de estudios como el análisis de humo proveniente de incendios forestales (Chia et al., 2008), la calidad del aire en zonas urbanas (Grosso et al., 2007), la relación entre el AOT y la velocidad del viento sobre la superficie del océano (Glantz, 2006), la influencia de los aerosoles de origen antropogénico en el cambio climático (Charlson et al., 1992), y en numerosos estudios de validación por medio de instrumentos ubicados en la superficie terrestre (Bai et al., 2008;Correia and Pires, 2006;Ichoku et al., 2002;Ichoku et al., 2003;Liang et al., 2006) entre otros.

Para la adquisición de datos del AOT a través de MODIS, el sensor se basa en la aplicación de algoritmos para el cálculo del espesor óptico, estos empezaron a funcionar en 1996 y son útiles para las mediciones tanto sobre superficies continentales como oceánicas, sin embargo en el presente trabajo se aborda solamente el primero, ya que los puntos de validación utilizados para el análisis del aerosol se localizan en la parte continental.

El algoritmo utilizado es referido como parte de la colección 005 (C005)⁴, y fue inicialmente previsto para la medición del balance de radiación y aplicaciones climáticas a través de un amplio rango espectral y una resolución espacial elevada. Estas características, únicas de MODIS permiten un excelente rechazo de la capa nubosa mientras mantienen estadísticas confiables en los píxeles que no son influenciados por las nubes (Remer et al., 2006).

⁴ Cada grupo de algoritmos usados por MODIS cuenta con una clave la cual puede ser ubicada en el formato con el que se nombran los archivos originales para conocer el contenido básico de la información de cada uno.

Algoritmo C005

La reflectancia en el tope de la atmósfera es una función de órdenes sucesivas de interacciones en la radiación dentro del sistema Tierra-Atmósfera ^(d) para diferentes longitudes de onda (λ) y resulta del esparcimiento de la radiación dentro de la atmósfera sin intervención de la superficie llamada trayectoria de reflectancia atmosférica, la reflexión de la radiación incidente en la superficie que es transmitida directamente hacia el tope de la atmósfera (la función de superficie), y la reflexión de la radiación desde fuera del campo de visión de los sensores (la función ambiental) de todas estas interacciones es la que se encuentra más descuidada es la función ambiental, sin embargo la expresión que describe las interacciones mencionadas a través de una buena aproximación es (Remer et al., 2006):

$$(d) \quad (P_{\lambda}(\theta_0, \theta, \phi)) = P_{\lambda}^a(\theta_0, \theta, \phi) + \frac{T_{\lambda}(\theta_0)T_{\lambda}(\theta)P_{\lambda}^s(\theta_0, \theta, \phi)}{1 - S_{\lambda}P_{\lambda}^s(\theta_0, \theta, \phi)}$$

Donde:

P_{λ} , la reflectancia espectral angular en el tope de la atmósfera y a cierta longitud de onda.

θ_0 , zenit solar.

θ , zenit observado hacia el satélite.

ϕ , ángulos acimutales relativos.

P_{λ}^a , trayectoria de la reflectancia atmosférica.

$T_{\lambda}(\theta_0)$, transmisión atmosférica hacia la superficie.

$T_{\lambda}(\theta)$, transmisión atmosférica hacia el exterior de la atmósfera.

P_{λ}^s , reflectancia angular espectral de la superficie.

S_{λ} , la proporción de esparcimiento atmosférico.

En la ecuación anterior, excepto por la reflectancia de la superficie, cada término en el lado derecho de la expresión es una función del tipo del aerosol y asumiendo que una pequeña serie de las características del tipo de partículas suspendidas pudiese describir el conjunto del aerosol global se puede establecer una tabla de referencia que contiene simulaciones previamente realizadas en computadora de esas condiciones del aerosol.

El objetivo del algoritmo es ser usado como referencia para determinar las condiciones en una mejor emulación de la reflectancia espectral observada por MODIS (P_{λ}^m) y captar las propiedades asociadas a los aerosoles, aunque la dificultad recae en hacer las suposiciones más apropiadas acerca de las contribuciones tanto de la superficie como de la atmósfera.

Para la formulación del C005, de acuerdo con Remer y colaboradores, (2006) se usó una extensa colección de datos nivel 2⁵ de la red de fotómetros AERONET, correlacionando las mediciones con la información del algoritmo anterior de MODIS (C004). En el caso de la base de datos utilizada de AERONET, se usó una combinación de mediciones directas en cuatro longitudes de onda (0.44, 0.67, 0.87 y 1.02 μm) y mediciones indirectas de radiación en almucántar que fueron previamente descritas en relación a sus propiedades ópticas del aerosol y distribución de tamaños. Las mediciones directas fueron realizadas cada 15 minutos mientras que las de almucántar fueron hechas aproximadamente cada hora.

Adquisición de los Datos

Los datos obtenidos por MODIS para la medición del AOT pueden ser descargados de la red a través del Sistema de Distribución de Archivos Nivel 1 y Atmosféricos (LAADS por sus siglas en inglés), administrado por el GSFC (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>).

El producto aerosol obtenido de MODIS monitorea el AOT del ambiente sobre los océanos de manera global y sobre una porción de la superficie continental, además de que es posible identificar la distribución de partículas suspendidas de acuerdo con su tamaño sobre el océano y el tipo de aerosol sobre los continentes (NASA[b], 2010).

⁵ Este nivel de datos es el que ofrece un mayor refinamiento de la información de los fotómetros de la red AERONET y es denominado como de calidad asegurada.

Diariamente los datos nivel 2 son producidos con una resolución de 10 x 10 km (al nadir) y pueden ser obtenidos en dos tipos de archivos:

- MOD04 L2. Contiene los datos colectados por el sensor a bordo de la plataforma Terra.
- MYD04 L2. Contiene los datos colectados por el sensor a bordo de la plataforma Aqua.

Una vez descargados los datos para el procesamiento de las imágenes se puede notar que éstos tienen una estructura similar en el formato con el que se le asigna nombre a cada archivo, éste se denomina *Formato Jerárquico de Datos* (HDF por sus siglas en inglés) y se explica de la siguiente manera en base a un archivo con el que se trabajó en la presente investigación:

MOD04_L2.A2001260.1805.005.2006303180720.hdf

MOD04_L2 = Tipo de producto MODIS, este caso se refiere a Aerosoles nivel 2 de Terra.

A = Indica que los datos siguientes se refieren a la fecha de adquisición.

2001260 = Fecha de adquisición, el ejemplo indica el año 2001 y el día juliano 260.

1805 = Hora de la toma de los datos en hora del meridiano de Greenwich (GMT).

005 = Colección a la que pertenece el algoritmo utilizado.

2006303180720 = Fecha y hora del procesamiento en los mismos formatos que la adquisición.

hdf = Extensión del archivo.

La selección de los archivos se hace tanto en sus características espaciales como temporales, ya que se deben establecer los parámetros de latitud y longitud o bien determinar a qué sección del mosaico global de cobertura de MODIS pertenece la zona de interés, así como delimitar el rango de tiempo del cual se pretende obtener datos.

Cabe señalar que el sistema de adquisición de datos presenta una vista previa (Figura 5) de cada toma para que el usuario pueda identificar si el área de interés aparece dentro de la región con datos de las propiedades del aerosol, ya que como se ha mencionado anteriormente los datos MODIS se ven representados en imágenes discretas (Lira, 1995) que no pueden ser visualizadas sin un tratamiento previo y que de otra manera harían que la selección de los datos resultara altamente aleatoria, ya que el sensor no cubre de manera exacta la misma extensión geográfica en cada toma.

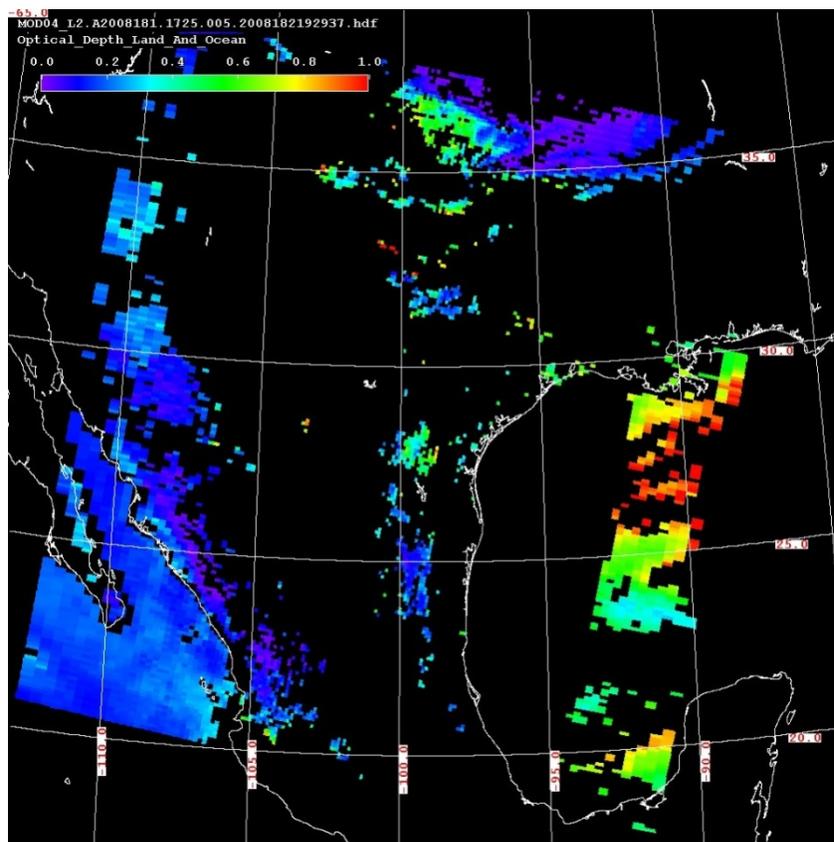


Figura 5. Vista previa de la zona de cobertura en una toma de MODIS de espesor óptico. Fecha. 26-Junio-2008.
Fuente:http://ladsweb.nascom.nasa.gov/browse_images/high.html?fileID=189995688

2.2 Las Técnicas de Validación por medio de Fotómetros

Como se ha visto con anterioridad, las mediciones del sensor MODIS en torno al AOT deben ser validadas por medio de instrumentos en superficie que den certeza a los datos, esto resulta lógico si se considera que el desarrollo del algoritmo C005 se basa en una colección de mediciones de fotómetros que identifican el espesor óptico desde la superficie, además de que en numerosos trabajos se efectúa una correlación entre los datos del sensor y los de los instrumentos en tierra previa al análisis de los mismos y a la interpretación de su comportamiento en relación con diversos fenómenos atmosféricos (Bai et al., 2008;Correia y Pires, 2006;Ichoku et al., 2002;Ichoku et al., 2003;Liang et al., 2006).

2.2.1 Medición de los Aerosoles desde la Superficie Terrestre

La obtención de datos de las propiedades generales de las partículas aerosoles como se ha visto en capítulos anteriores no sólo se obtienen por medio de sensores remotos como es el caso de MODIS sino que también es posible adquirir información a través de instrumentos que no se encuentran fuera de la atmósfera y que han sido utilizados en el análisis de los procesos atmosféricos desde hace décadas.

Las mediciones *in situ* empezaron a ser realizadas en muestreos con filtros e instrumentos de impacto de partículas sólidas, subsecuentemente, el procesamiento de estas mediciones fue sustituido con el uso de microscopios de electrones y con aparatos ópticos que permitían además un análisis químico de los componentes de cada elemento en lo individual (Kondratyev et al., 2006). Durante el proceso además se utilizaban membranas y filtros de cuarzo para el refinamiento de los datos, sobre todo en el estudio de componentes orgánicos.

La adquisición de toda esta información se realiza en la superficie a diferentes altitudes y bajo distintas condiciones atmosféricas tanto en el día como en la noche por medio de la utilización de varios dispositivos simultáneamente, lo que permite realizar análisis comparativos entre diferentes zonas para obtener principalmente perfiles verticales de la concentración de partículas aerosoles en la atmósfera.

Además de estos métodos de recolección de datos se han utilizado también naves aéreas que realizan las mediciones espectrales de la atmósfera a altitudes superiores a 8.4 km, adquiriendo información acerca de la polarización de las partículas, sus características de dispersión, el estudio de la dinámica de los aerosoles cerca de su fuente y mediciones de la estructura vertical de la atmósfera y del coeficiente de radiación que es reflejado y esparcido, esto se hace por encima de la troposfera para que las mediciones puedan resultar representativas.

En algunos estudios referidos por Kondratyev et al., (2006), se menciona que el procesamiento de datos ha demostrado que las propiedades ópticas de las partículas aerosoles en la tropósfera coinciden con las propiedades de las partículas obtenidas desde la superficie terrestre, mientras que en los estratos superiores de la atmósfera estas mismas propiedades difieren significativamente, además de demostrar que los perfiles verticales de varias características espectrales en la radiación solar que ingresa a la atmósfera están determinadas por absorción en determinadas longitudes de onda.

Como parte de la validación de los datos MODIS en el Noroeste de México, se utilizan las mediciones del fotómetro de la red AERONET que se encuentra en el centro regional del Instituto de Geología en la ciudad de Hermosillo (Figura 6), aunque es posible también adquirir datos del espesor óptico mediante el uso de fotómetros portátiles (Figura 7) para confrontar los valores del sensor MODIS en puntos donde no existen sitios de observación AERONET.



Figura 6. Centro regional del Instituto de Geología en la ciudad de Hermosillo, Sonora. Fuente: Observatorio de Radiación Solar, Instituto de Geofísica, UNAM. http://rayenari.geofisica.unam.mx/~hector/cimel_hillo.html



Figura 7. Fotómetro portátil MICROTOPS II utilizado en la campaña de medición del Espesor Óptico en el Noroeste de México por el Instituto de Geofísica, UNAM, durante diciembre de 2009.

2.2.2 Características de la Red de Fotómetros AERONET

El programa AERONET (Aerosol Robotic Network), está compuesto por una federación de redes de precepción remota para la medición de los aerosoles desde la superficie terrestre establecida por la NASA, y está compuesta por un gran número de colaboradores en agencias nacionales, institutos de investigación y universidades, además de científicos de manera individual. El programa provee una amplia base de datos de las propiedades ópticas, microfísicas y radiativas de las partículas aerosoles, a través de un conjunto de mediciones de largo plazo, continuas y que son de dominio público.

La información es utilizada con fines de investigación para la caracterización, validación de mediciones satelitales y sinergismo con otras bases de datos, además de que la red AERONET establece los criterios de estandarización para los instrumentos utilizados, la calibración, el procesamiento y la distribución de los datos.

Entre los diversos parámetros de los cuales proporciona información la red de fotómetros, el AOT es el que resulta de más utilidad para la validación de los datos del sensor MODIS. La red ofrece las mediciones del espesor óptico en tres niveles.

- Nivel 1.0 – Datos en bruto.
- Nivel 1.5 – Datos procesados con la omisión de la capa nubosa.
- Nivel 2.0 – Datos procesados con la omisión de la capa nubosa y de calidad garantizada.

El sistema de medición, está compuesto por un radiómetro espectral CIMEL modelo 318 A robótico (Figura 8), el cual es un sensor con cilindros colimadores de 25 cm que está soportado por una base robótica de 40 cm que genera el movimiento para que el instrumento apunte sistemáticamente hacia el sol de acuerdo con una rutina preprogramada.

El instrumento realiza dos mediciones básicas, directa al sol en ocho bandas espectrales a través de la interfaz con filtros de 340, 380, 440, 500, 670, 870, 940 y 1020 nm, en un periodo que abarca de las 7 hasta las 19 horas en periodos normales de quince minutos, además del conjunto de mediciones en el almucántar solar pero que no son utilizadas para el desarrollo de esta investigación.

La red AERONET, efectúa el cálculo del Espesor Óptico a partir de la extinción espectral de la radiación en un rayo directo del sol para cada longitud de onda basado en la Ley de Beer-Bouguer⁶, además de la atenuación debida al parámetro de esparcimiento de Rayleigh, absorción por ozono y gases contaminantes es estimada y removida para obtener el AOT (GSFC, 2010)

En México, existen 13 puntos de adquisición de datos de la red AERONET (Figura 9) de entre un conjunto de estaciones de cobertura global, sin embargo, no todos los fotómetros en el territorio nacional cuentan con un registro a lo largo de un número considerable de años ni tampoco con mediciones continuas que puedan ser utilizadas en estudios de validación que resulten representativos, es por eso que en este trabajo se utilizan los datos de Hermosillo que forman parte de un amplio registro útil para el análisis del espesor óptico.



Figura 8. Fotómetro CIMEL de la red AERONET en la ciudad de Hermosillo, Sonora. Fuente: Observatorio de Radiación Solar, Instituto de Geofísica, UNAM. http://rayenari.geofisica.unam.mx/~hector/cimel_hillo.ht

⁶ La ley de Beer-Lambert-Bouguer relaciona la intensidad de la luz entrante en un medio con la intensidad saliente después de que en dicho medio se produzca absorción (Puigserver and Carrascal, 2008).



Figura 9. Localización de los puntos de medición de la red AERONET en la república mexicana. Fuente: Google Earth, 2010.

2.3 Aspectos Físico - Geográficos de la Región Noroeste, Sonora

En relación con la ubicación y la descripción de lugares desde una perspectiva geográfica, es importante que se mantenga un orden que pueda ayudar al análisis de los elementos del espacio para relacionarlos con el estudio específico de un fenómeno en particular (Sánchez, 2006), el discurso ortodoxo en geografía es la manera tradicional en la que se examinan los componentes de un territorio para su estudio, partiendo de la ubicación del lugar a la caracterización del medio físico, social, económico y político del mismo, aunque se debe tomar en cuenta sólo aquellos elementos que guardan relación con el fenómeno de estudio.

2.3.1 Ubicación

El estado de Sonora (Figura 10), se localiza en la porción noroeste de la República Mexicana, sus coordenadas extremas son: al norte $30^{\circ} 50' N$, al sur $26^{\circ} 58' N$, al este $108^{\circ} 20' W$, y al oeste $115^{\circ} 03' W$. Es el segundo estado con mayor extensión territorial en el país y representa el 9.2 % de la superficie continental de México con $184,934 \text{ km}^2$. Además de contar con un perímetro territorial de 2,505 km, de los cuales 1,208 conforman el litoral sonorense.

El relieve de la entidad puede clasificarse en tres regiones (BANAMEX, 1984):

- **Oriental**; extremadamente montañosa que se inicia en los límites con Chihuahua,
- **Central**; surcada por las derivaciones de la Sierra Madre Occidental con largas cañadas y extensos valles en los márgenes de los ríos,
- **Occidental**; plana y constituida por 916 km. de litoral de playas bajas y casi uniformes que se extienden hasta Sinaloa.

Sonora limita hacia el este con el estado de Chihuahua y una porción del estado de Sinaloa con el cual colinda mayoritariamente en la parte sureste de la entidad; hacia el oeste se extiende la costa sonorense con una orientación NO-SE que limita con las aguas del golfo de Baja California; en el extremo noroeste del estado se sitúa la colindancia con Baja California a lo largo del río Colorado desde la frontera con los Estados Unidos hasta su desembocadura en el golfo; y al norte, Sonora

limita con el estado de Arizona en la mayor parte de la franja fronteriza, aunque comparte también límites con el estado de Nuevo México, EUA.

La entidad está compuesta por 72 municipios y la capital estatal se encuentra en el municipio de Hermosillo y en la ciudad que lleva el mismo nombre, que se encuentra a 29° 07' N y 110° 58' W con una altitud media de 210 msnm. Otros municipios que resultan importantes en el estado por la cantidad de población que poseen y por el desarrollo económico de los mismos son: Ciudad Obregón, Nogales, Guaymas-Empalme, Navojoa, San Luis Río Colorado, Agua Prieta, Caborca, Puerto Peñasco, Cananea, Huatabampo, Magdalena de Kino, Álamos y Villa Juárez (INEGI, 2009).

Para el presente trabajo además es importante ubicar las ciudades en las que se obtuvieron datos del espesor óptico del aerosol *in situ* (Figura 12) durante la campaña de medición realizada por el Instituto de Geofísica de la UNAM durante diciembre de 2009 (Tabla 5), aunque estos datos no son utilizados porque el número de mediciones es muy bajo, la caracterización de puntos dentro del territorio del estado con diferentes características es conveniente para el análisis de la influencia de los factores físico-geográficos en la presencia de partículas suspendidas en la atmósfera.

<i>Ciudad</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>
<i>Caborca</i>	<i>30°42'55'' N</i>	<i>112°09'50'' W</i>
<i>Empalme</i>	<i>27°57'49'' N</i>	<i>110°48'32'' W</i>
<i>Hermosillo</i>	<i>29°05'22'' N</i>	<i>110°57'43'' W</i>
<i>Magdalena de Kino</i>	<i>30°37'38'' N</i>	<i>110°57'51'' W</i>
<i>Navojoa</i>	<i>27°04'31'' N</i>	<i>109°26'28'' W</i>
<i>Puerto Peñasco</i>	<i>31°19'06'' N</i>	<i>113°32'12'' W</i>

Tabla 5. Sitios de medición del Espesor Óptico durante la campaña de diciembre de 2009.



Figura 10. Ubicación del estado de Sonora.

2.3.2 Rasgos Geológicos y Relieve

El territorio sonorense comprende una variedad de paisajes derivados de las distintas provincias fisiográficas (Tabla 6) que componen el estado y que determinan las características físicas de cada una de las regiones de Sonora. La entidad se encuentra situada en la zona noroeste de México, principalmente en la vertiente exterior de la Sierra Madre Occidental y en la porción más septentrional de la llanura costera del Pacífico. El estado es mayormente montañoso aunque sus elevaciones no son de mucha altitud en relación con las sierras del centro del país, mientras que las llanuras principales dentro del territorio estatal se sitúan en la fracción norte del estado donde este adquiere dimensiones mayores en su extensión este-oeste.

Las provincias fisiográficas que ocupa el estado son:

PROVINCIA	SUBPROVINCIA	% DE LA SUPERFICIE ESTATAL
<i>Llanura Sonorense</i>	<i>Desierto de Altar</i>	6.67
	<i>Sierra del Pinacate</i>	0.75
	<i>Sierras y Llanuras Sonorenses</i>	45.21
<i>Sierra Madre Occidental</i>	<i>Sierras y Valles del Norte</i>	18.23
	<i>Sierras y Cañadas del Norte</i>	13.00
	<i>Pie de la Sierra</i>	4.28
	<i>Gran Meseta y Cañones</i>	2.43
	<i>Chihuahuenses</i>	
<i>Sierra y Llanuras del Norte</i>	<i>Llanura y Médanos del Norte</i>	3.78
<i>Llanura Costera del Pacífico</i>	<i>Llanura Costera y Delta de Sonora y Sinaloa</i>	5.65

Tabla 6. Provincias Fisiográficas de Sonora. Fuente: (INEGI, 2009).

Así mismo, las principales elevaciones dentro del estado (Tabla 7) se localizan en la porción noreste, en la parte más elevada de la sierra madre occidental dentro del estado y cerca de la colindancia con Chihuahua, dichas elevaciones son:

NOMBRE	ALTITUD (MSNM)
<i>Cerro Pico Guacamayas</i>	2 620
<i>Sierra Los Ajos</i>	2 620
<i>Sierra San José</i>	2 540
<i>Sierra La Charola</i>	2 520
<i>Sierra San Luis</i>	2 520
<i>Sierra La Mariquita</i>	2 500
<i>Sierra Hachita Hueca</i>	2 480
<i>Sierra La Madera</i>	2 360
<i>Sierra Aconchi</i>	2 180
<i>Sierra Mazatan</i>	1 540
<i>Sierra Libre</i>	1 180

Tabla 7. Principales elevaciones en el estado de Sonora. Fuente: (INEGI, 2010).

La región noroeste de México, se caracteriza por una geología principalmente de origen extrusivo y rocas sedimentarias, además de grandes extensiones de territorio formadas por la acumulación de sedimentos que forman el suelo, también existen pequeñas zonas donde se presentan afloramientos de rocas metamórficas del Mesozoico y Paleozoico principalmente. La mayor parte de la superficie estatal corresponde a una génesis del Cenozoico, con formaciones mayoritariamente del periodo Terciario 43 % y acumulaciones del Cuaternario 38.91 % (INEGI, 2009).

En el estado de Sonora, el conjunto de elevaciones que conforman la Sierra Madre Occidental (Figura 11) es donde se localizan principalmente las formaciones de origen ígneo, mientras que las geoformas sedimentarias y los principales depósitos aluviales se localizan cerca de las cuencas bajas de los ríos Yaqui y Mayo, así como en una gran extensión del municipio de Hermosillo.

En la parte noroeste del estado que representa el desierto de Altar, es donde se encuentran las unidades geológicas más antiguas que van desde formaciones rocosas del Mesozoico hasta afloramientos del Precámbrico que son complejos metamórficos.

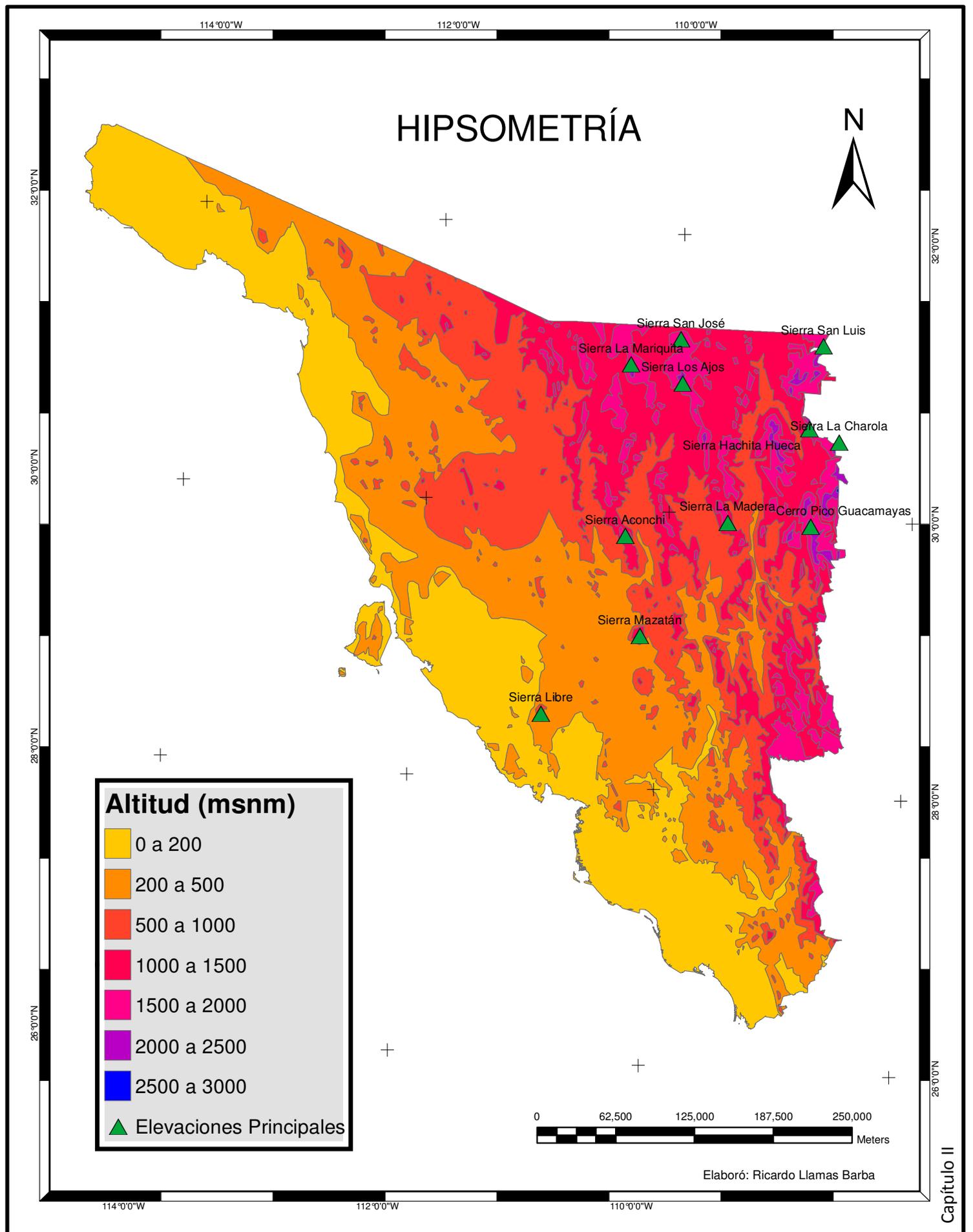


Figura 11. Hipsometría y principales elevaciones del estado de Sonora.

2.3.3 Clima

Sonora se sitúa al norte del Trópico de Cáncer y por consiguiente forma parte de las grandes zonas desérticas que se extienden hasta el sur de los Estados Unidos (BANAMEX, 1984) y que comparten rasgos fisiográficos con regiones en las mismas latitudes en otras regiones del planeta.

Aproximadamente en el 95 % del territorio sonorenses los climas son muy secos, secos y semisecos (Tabla 8); se caracterizan por su alta temperatura y escasa precipitación. Como consecuencia de lo anterior, es en este estado donde se localiza la zona más árida del país que es el Desierto de Altar. Por su parte la influencia altitudinal de la Sierra Madre Occidental, ubicada en el oriente de la entidad, se manifiesta en las temperaturas menos extremas y en las lluvias más abundantes con respecto a las de las zonas muy secas, secas y semisecas (INEGI, 2010).

Muy Secos

Estos tipos de climas que también son llamados desérticos, abarcan cerca del 46 % de la superficie de Sonora, y se caracterizan por su precipitación inferior a los 400 mm anuales, además de una temperatura media anual de 18.0 °C a 26.0 °C, se consideran como muy extremos ya que la oscilación térmica es mayor a los 14.0 °C (INEGI, 2010). En el estado este tipo de clima se distribuye en una extensa franja de territorio que corre paralela a la costa y que va desde el límite con Sinaloa hasta la porción noroccidental en la frontera con el estado de Arizona.

Secos

Este tipo de climas influyen en las áreas que se localizan al este de las que presentan climas muy secos, ocupan aproximadamente 20 % de la superficie estatal y se extienden en una franja orientada de NO-SE con prolongaciones hacia las zonas montañosas. También se encuentran en la zona comprendida entre Agua Prieta, Villa Hidalgo y Bavispe. La altitud de estas áreas varía de 600 a 1 400 m, pero dominan las menores a 1 000 m. Con respecto a su temperatura media anual, se dividen en: cálidos con valores de 22.0 °C y mayores, distribuyéndose del centro hacia el sur del estado; en el caso de los semicálidos que presentan temperaturas que oscilan entre 18.0 °C y 22.0° C se localizan hacia el norte y finalmente los templados que van de 12.0 °C a 18.0 °C, en el noreste (INEGI, 2010).

En la porción restante del estado la variedad climática presenta climas templados que representan el 4 % de la superficie y se localizan principalmente en los límites con Chihuahua donde la altitud oscila entre los 1 000 m y 1 200 m, así como condiciones de semifríos en la porción oriental con temperaturas que van de los 5.0 °C a los 12.0 °C en las zonas con una elevación superior a 2 000 msnm. Una pequeña área del estado que representa apenas el 1.5 % es semicálida con bajas precipitaciones en verano que no rebasan los 40 mm en el mes más seco y que representan la zona de menos humedad en la entidad (INEGI, 2010).

CLIMA	CLASIFICACIÓN	% DE LA SUPERFICIE ESTATAL
<i>Cálido subhúmedo con lluvias en verano</i>	A(w)	0.24
<i>Semicálido subhúmedo con lluvias en verano</i>	Acw	1.45
<i>Semifrío subhúmedo con lluvias en verano</i>	C(E) w	0.06
<i>Templado subhúmedo con lluvias en verano</i>	Cw	3.82
<i>Semiseco muy cálido y cálido</i>	BS1(h')	3.18
<i>Semiseco semicálido</i>	BS1h	11.78
<i>Semiseco Templado</i>	BS1k	12.49
<i>Seco muy cálido y cálido</i>	BS(h')	6.99
<i>Seco semicálido</i>	BSh	11.43
<i>Seco templado</i>	BSk	1.77
<i>Muy seco muy cálido y cálido</i>	BW(h')	12.54
<i>Muy seco semicálido</i>	BWh	34.25

Tabla 8. Distribución climática de Sonora por porcentaje de superficie. Fuente: (INEGI, 2010)

En el estado de Sonora así como en todo el noroeste del país existen fenómenos meteorológicos que interactúan con el comportamiento de la atmósfera, uno de los más importantes es el llamado Monzón Mexicano, también llamado Monzón Norteamericano o Monzón del suroeste de Norteamérica, ya que según estudios realizados en la región identifican a la Sierra Madre Occidental, particularmente prodiga en la formación de sistemas convectivos de mesoescala y en la generación de lluvia durante el verano, como un centro de convergencia de las masas de aire húmedo originadas en los trópicos de México y el Caribe (Reyes et al., 1994).

En los meses de verano, el desierto sonorense que comprende la Península de Baja California, Sonora y Arizona, el inicio de las lluvias de verano se relaciona con el flujo de humedad del sur sobre el Golfo de California y con la formación de un centro de baja presión centrado en Sonora y Arizona, el cual está a su vez asociado con una gran convergencia y vorticidad ciclónica sobre la Sierra Madre Occidental y la vertiente del Pacífico mexicano (Reyes et al., 1994).

Existen trabajos que estudian de manera profunda este fenómeno y se han realizado campañas de medición en los meses en los que se presentan estas fuertes precipitaciones, ejemplo de estos son el proyecto conjunto de *Transporte atmosférico de vapor de agua y su relación con el campo de precipitación de verano en el desierto sonorense* (TRAVASON) y el *South West Area Monsoon Project* (SWAMP), realizados en 1993 (Reyes et al., 1994), así como el proyecto de medición del Monzón mexicano, *Northamerican Monsoon Experiment* (NAME), iniciado en el verano del 2004 (Martínez, 2006).

También existen en la región noroeste de México patrones de circulación atmosférica que deben ser tomados en cuenta para el estudio de la concentración de aerosoles, reconociéndose que en las zonas áridas, el principal agente transportador de partículas es el viento. En el caso del noroeste de México, los vientos Santa Ana en el océano pacífico frente a Baja California transportan material desde la región desértica y están asociados a alta temperatura ambiente y baja humedad relativa. Los vientos se presentan generalmente entre octubre y marzo con intensidades de hasta 80 km/h y su efecto es perceptible desde la costa hasta cientos de kilómetros mar adentro (Sosa et al., 2005).

Para el objeto de este trabajo resulta importante considerar la presencia de estos fenómenos ya que la formación de nubes originadas por esta circulación monzónica y los partículas incorporadas a la atmósfera bajo influencia de los vientos Santa Ana, influye directamente en las propiedades ópticas de la atmósfera en los meses de verano y es un elemento de referencia para el análisis de los resultados de la presente investigación.

Sitios de Medición de AOT

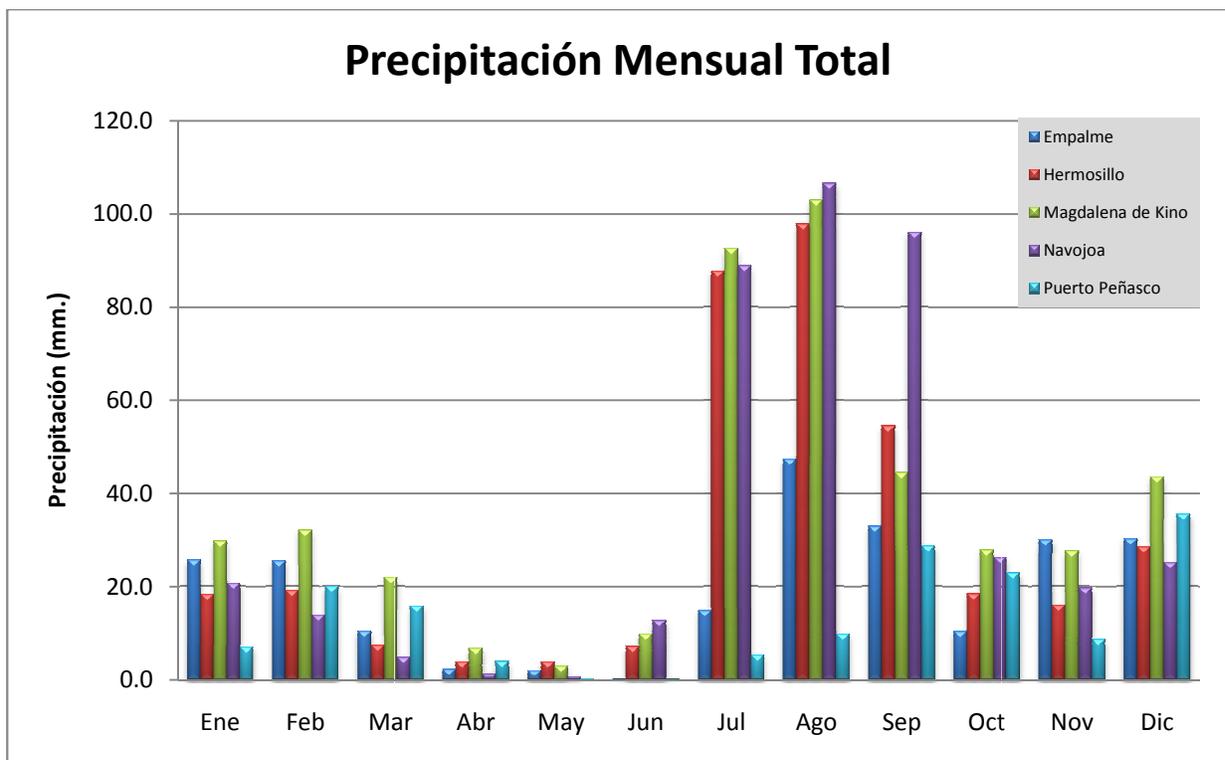


Elaboró: Ricardo Llamas Barba

Figura 12. Localización de los puntos de medición del AOT durante la campaña realizada por el Instituto de Geofísica en diciembre del 2009.

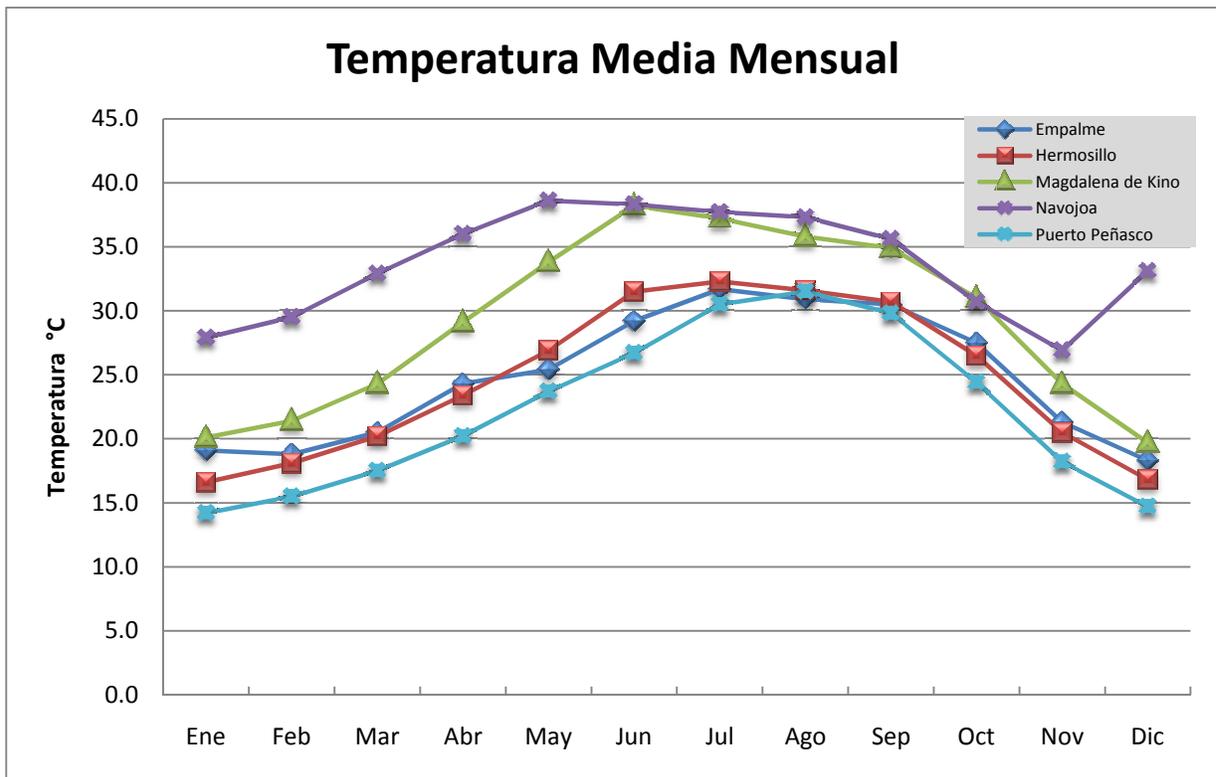
Para el presente trabajo se muestran además datos del comportamiento regular de la atmósfera en cinco de las seis ciudades del estado en donde se realizó la campaña de medición del AOT por el Instituto de Geofísica (Figura 12), esto con el fin de poder relacionar los resultados del procesamiento digital de las imágenes del noroeste con las condiciones físico-geográficas de la región.

En la gráfica 1 se observa claramente como de acuerdo con lo mencionado anteriormente en relación al monzón mexicano, los meses de mayor precipitación no sólo se corresponden con la estación de verano sino que además la variación entre los meses de la temporada de estiaje y el periodo de máximas lluvias resulta bastante amplia (más de 80 mm); lo cual indica más que una tendencia normal en el régimen de precipitación como sucede en los climas Cw, una influencia de fenómenos meteorológicos que introducen gran cantidad de humedad al territorio continental como en el caso del monzón mexicano o monzón del suroeste de Norteamérica.



Gráfica 1. Análisis de la precipitación media mensual total en los sitios de medición del AOT.

En la gráfica de temperatura media mensual (Gráfica 3) es evidente que los valores más altos no coinciden plenamente con los más elevados en la gráfica de precipitación, ya que el mes de máxima en este caso es el de menor lluvia en los datos presentados en la página anterior, esto presenta una evidencia más de que en los meses de Julio, Agosto y Septiembre la entrada de humedad es originada no sólo por la evaporación provocada por las altas temperaturas normales de esta estación, sino que además existen fenómenos que deben ser tomados en cuenta para el análisis del comportamiento regular de la atmósfera en el noroeste de México y su relación con las variaciones espacio-temporales del Aerosol (Reyes et al., 1994).



Gráfica 2. Análisis de la temperatura media mensual en los sitios de medición del AOT.

Capítulo III

Metodología y Conjunto de Datos

Los sensores remotos actuales son capaces de producir imágenes de alta calidad en forma analógica o digital, es decir que pueden proporcionar una imagen continua o discreta de la escena⁷, y son catalogadas dependiendo del grado de resolución que tenga el sensor y del detalle que se desee discernir (Lira, 1995), basado en esto es que se considera que sólo las imágenes ópticas pueden catalogarse como continuas, mientras que se identifican como digitales aquellas en las que cada punto está determinado no por una tonalidad sino por un valor numérico que hace posible su manejo por medios computacionales.

Las imágenes obtenidas para este trabajo por medio del sensor MODIS, son imágenes digitales multiespectrales, lo cual implica que cuando el instrumento recibe la radiación reflejada por el campo instantáneo de visión (CIV) obtiene en forma simultánea un conjunto de números que representan la energía luminosa vista a través de un conjunto de filtros (Lira, 1995) a los cuales llamamos bandas espectrales.

En el estudio de las ciencias atmosféricas resulta muy importante poder obtener datos y mediciones acerca de los parámetros que se utilizan para el análisis del comportamiento de la atmósfera en cualquier lugar del planeta. Uno de los parámetros más importantes en la adquisición de datos es la reflectancia; esta se refiere a la relación entre la potencia electromagnética incidente con respecto a la potencia que es reflejada en una interface (Chiron de la Casinière y Cachorro Revilla, 2008), además de que se puede considerar a la reflectancia direccional de superficie como el parámetro más básico en la percepción remota de las longitudes de onda de la energía solar reflejadas, y en consecuencia provee el primer medio de adquisición de datos para esencialmente todos los parámetros geofísicos de superficie, incluyendo índices de vegetación, albedo, áreas incendiadas, cobertura actual del suelo y cambios en ésta (Vermote et al., 2007).

⁷ Una imagen continua es aquella donde la variación de tonos de gris o de color se presenta sin discontinuidades, líneas o fronteras, aparte de las que pudiera tener la escena misma. Una imagen discreta por su parte, es la que está compuesta por elementos definidos y diferenciados como puntos o cuadrados (Lira, 1995).

El rango de longitudes de ondas electromagnéticas que el ser humano ha podido descubrir en la naturaleza es extremadamente amplio, ya que alcanza desde los 10^{-15} m de los rayos cósmicos, hasta los millones de kilómetros de las frecuencias bajas extremas, sin embargo una gran cantidad de la energía que recibe la Tierra del Sol se concentra en las longitudes de onda del infrarrojo cercano, la porción visible del espectro y el ultravioleta a partir de los 250 nm , estas ondas cubren un rango que alcanza desde el Angström (10^{-10} m), hasta los 10 km, pero más del 99.8 % de la energía irradiada por el Sol se concentra en la estrecha banda ya mencionada que abarca de $0.25 \mu\text{m}$ hasta $25 \mu\text{m}$ (Chiron de la Casinière y Cachorro Revilla, 2008).

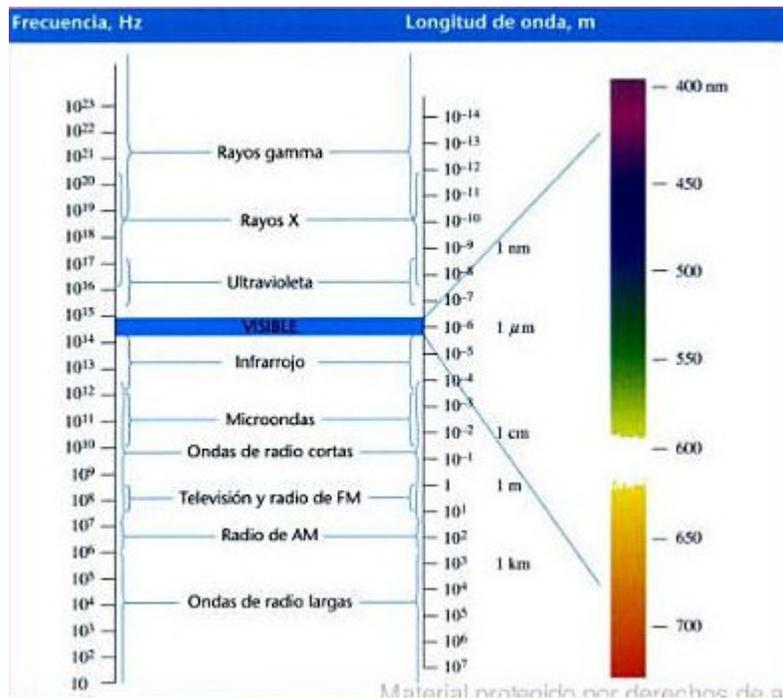


Figura 13. Espectro Electromagnético. Fuente: (Tipler and Mosca, 2006)

3.1 Procesamiento digital de las imágenes y obtención de datos

Para el estudio de la región Noroeste de México, en el presente trabajo se toma como referencia el estado de Sonora, ya que este, por su gran extensión territorial resulta representativo en la manera en la que se comportan las partículas suspendidas en esa porción del país, además de que dentro del estado, existen todas las variante fisiográficas, climáticas y de paisaje en el Noroeste, desde las extensas zonas desérticas en la porción norte, una amplia llanura costera y las elevadas cimas de la Sierra Madre Occidental en los límites con el estado de Chihuahua.

Además de que como se menciona en el capítulo II, el estado de Sonora es la principal zona de influencia del monzón mexicano (Reyes et al., 1994), por lo que sumado a los criterios expuestos anteriormente, representa una región que está bajo la influencia de fenómenos meteorológicos cíclicos y que conserva un patrón regular de comportamiento de la atmósfera.

Uno de los objetivos del presente trabajo como se menciona al inicio del mismo, es poder encontrar un coeficiente de correlación entre los datos del sensor MODIS y los valores obtenidos por el fotómetro de la red AERONET en el noroeste de México, para ello el procesamiento digital de las imágenes resulta primordial en la obtención de los datos que serán comparados y validados en los días dentro del periodo de estudio.

Conociendo la necesidad de validar las mediciones obtenidas por el sensor MODIS con estaciones en superficie como se menciona en incisos anteriores, se procedió a la adquisición y procesamiento de los datos tanto de las imágenes de satélite como los proporcionados por la red de fotómetros AERONET y el instrumento MICROTOPS II para compararlos y obtener la correlación estos grupos de datos.

Como menciona Lira (1995), la observación directa de ciertos puntos de la escena de la cual se obtuvo la imagen digital es necesaria para la correcta validación de las observaciones, esto porque en general las mediciones hechas por un sensor remoto son relativas al sensor mismo, además de que en el caso del AOT, las propiedades de la superficie influyen en los datos obtenidos a causa de la reflectancia de la misma (Liang et al., 2006).

Para la obtención de datos del sensor MODIS en este estudio, se trabajó con las imágenes adquiridas del sistema LAADS WEB generadas con los datos obtenidos por el sensor a bordo de la plataforma Terra, ya que esta, como se menciona en capítulos anteriores posee un registro de datos desde diciembre de 1999 y contiene la información necesaria para evaluar las variaciones espacio-temporales del AOT en el periodo 2001 – 2003 del cual fueron procesados los datos proporcionados por AERONET, además que de manera general el instrumento en la plataforma Terra cuenta con mucho más datos que el de la plataforma Aqua y por consiguiente resulta más conveniente para la obtención de valores que sean útiles en la correlación de ambas fuentes.

3.1.1 Datos MODIS

Los datos que fueron descargados, corresponden al nivel 2, en el cual se encuentran las mediciones del producto MOD04L2 referente al aerosol (Figura 14). La selección temporal de la información que fue del periodo 2001 – 2003 se obtuvo en diferentes descargas ya que la verificación visual de cada una de las imágenes previas proporcionadas representó una importante carga de trabajo que no pudo ser realizada en una sola ocasión, ya que por cada día existen varios archivos de los cuales no todos presentan un área de cobertura sobre el noroeste de México y la depuración de las imágenes que no serían utilizadas en el estudio fue necesaria para disminuir el volumen de información y facilitar el manejo de la misma.

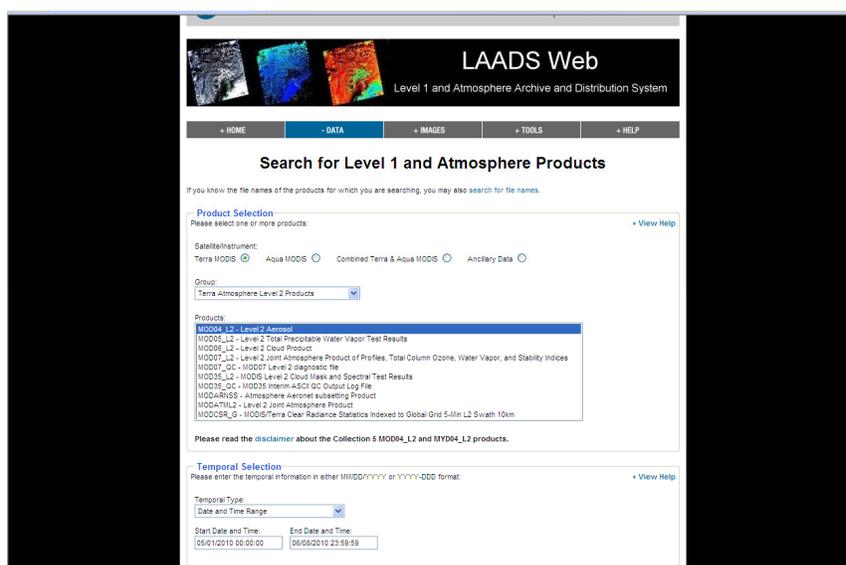


Figura 14. Selección de tipo de producto y periodo de los datos. Fuente: (LAADS Web, 2010)

Posteriormente, se seleccionaron los datos de la colección 5, ya que ésta es la que presenta la información con un procesamiento previo mayor y la cual se espera que fuera la más adecuada para su validación, además, se seleccionó el área de cobertura en la opción de mosaico dentro de la cuadrícula que el sistema proporciona para la selección espacial, utilizando la sección 6 del orden vertical y 8 del orden horizontal (Figura 15), ya que ésta es la que cubre la mayor parte del territorio nacional y en la cual se encuentran los datos del noroeste de México.

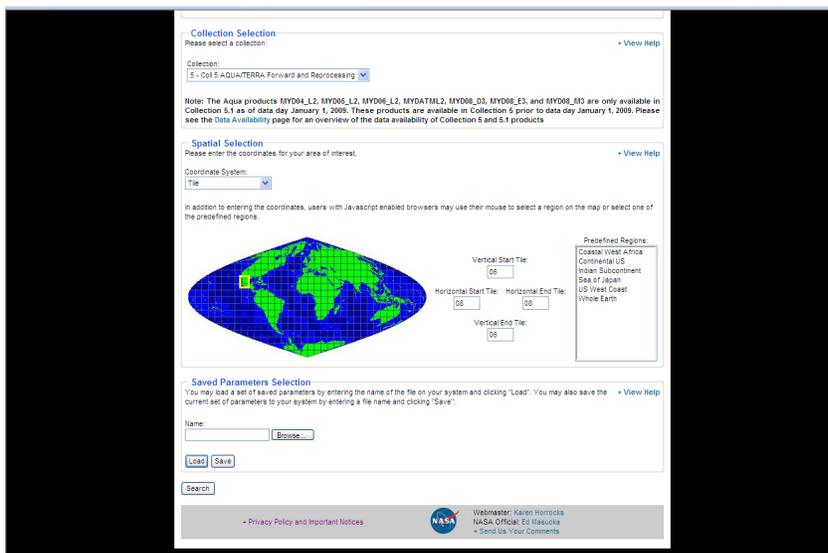


Figura 15. Selección espacial de la información. Fuente: (LAADS Web, 2010)

Una vez realizada la selección espacial y temporal en que fueron requeridos los datos, se obtiene una serie de archivos (Figura 16) los cuales deben ser seleccionados como se mencionó anteriormente a través de la opción de vista previa, debiendo ser verificados uno por uno para constatar que cubren el área representativa del noroeste de México o al menos los puntos de los que se tiene mediciones en superficie.

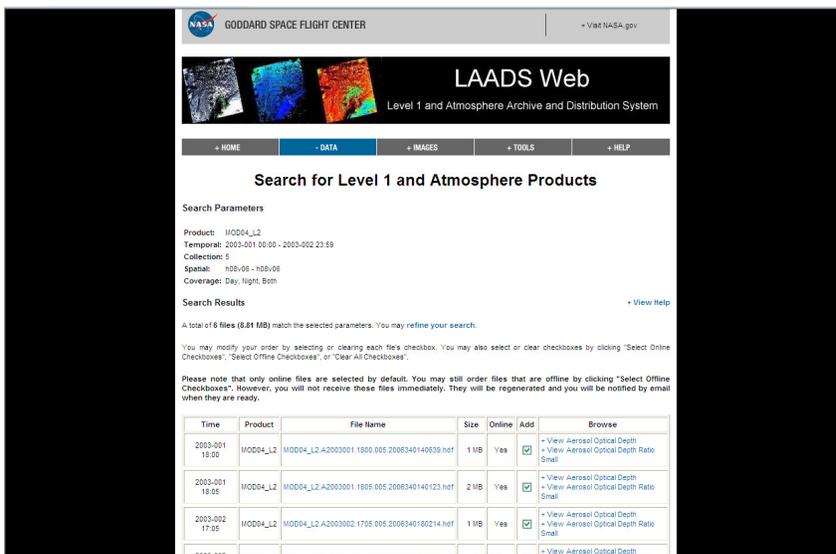


Figura 16. . Conjunto de archivos MOD04L2. Fuente: (LAADS Web, 2010)

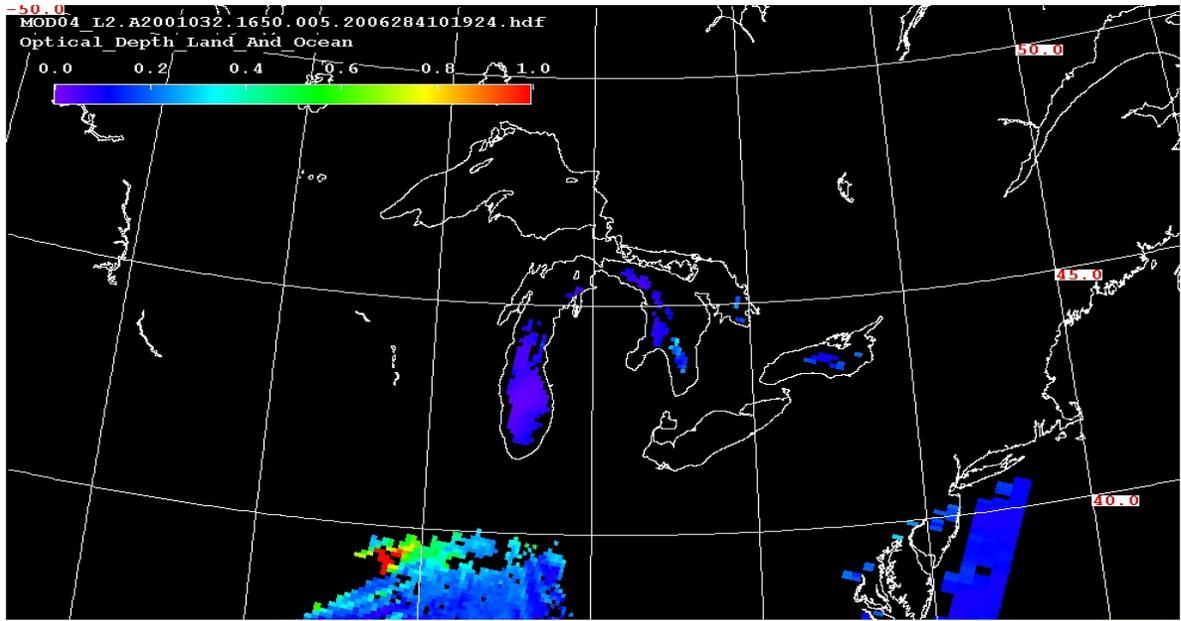


Figura 17. Selección visual de imágenes MODIS. 1

Como se observa en esta serie de imágenes (Figura 17, Figura 18), no todos los archivos proporcionan una cobertura adecuada del área de estudio, por lo que la selección fue un paso necesario del procesamiento y obtención de los datos.

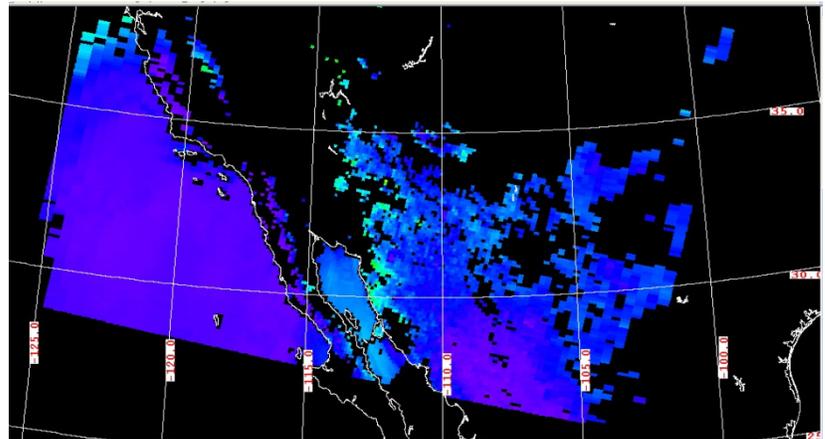


Figura 18. Selección visual de imágenes MODIS. 2

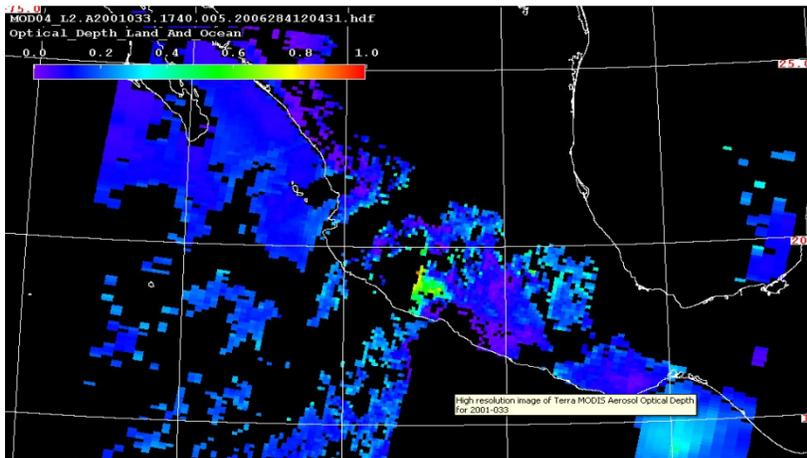


Figura 19. Selección visual de imágenes MODIS. 3

Además de buscar y obtener información del noroeste de México, se adquirieron datos de la zona centro del país (Figura 19) en donde se encuentra el sitio AERONET en el Instituto de Geofísica, esto para futuros trabajos de validación y correlación.

Una vez seleccionados todos los archivos, estos tuvieron que ser procesados, ya que los datos proporcionados por el sensor MODIS representan datos abstractos a los cuales les deben ser otorgadas propiedades cartográficas además de refinar la información a través de la selección de las bandas que proporcionan datos directos del AOT.

Dicho procesamiento fue realizado mediante software especializado en el tratamiento digital de imágenes y a través de éste se asignaron propiedades cartográficas adecuadas para el área representada a los archivos que se encontraban en un formato nativo de coordenadas Latitud/Longitud, además de extraer la información del espesor óptico corregido para superficies continentales de entre 60 opciones de procesamiento que ofrecen los archivos originales.

Las características de la proyección cartográfica utilizada (Tabla 9) para las imágenes trabajadas que cubren gran parte del territorio de México y sur de Estados Unidos fueron seleccionadas en base a la conveniencia que presentan las proyecciones cónicas conformes para la representación de territorios cuya mayor extensión se da en sentido Este – Oeste (Caire, 2002), además de ser la proyección oficial establecida por el INEGI.

Características de la Proyección utilizada.		
Tipo de Proyección	Cónica Conforme de Lambert	
Datum	North American Datum (1927)	
Elipsoide	Clarke 1866	
Falso Este	2 500 000	
Falso Norte	0.000	
Latitud de la Proyección de Origen	0.000	
Longitud del Meridano Central	-102.000	
Paralelos Estándar	17° 30' N	29° 30' N

Tabla 9. Propiedades cartográficas asignadas a las imágenes procesadas.

Finalmente, se asignó un nombre de salida a cada archivo para facilitar su ubicación y ordenamiento, ya que el volumen de información procesada hizo necesaria la implementación de un formato para la clasificación de las imágenes procesadas, el cual se describe a continuación:

jul04a_Swath_3D_1_1_georef.hdr | **jul04a_Swath_3D_1_1_georef.img**

jul = Se refiere al mes en el cual fue tomada la imagen y el objetivo de utilizar las abreviaturas en inglés es para hacer más accesible la información en caso de la realización de trabajos futuros o revisión del presente por parte de cualquier investigador.

04 = Este número proporciona el día del mes al que corresponde la imagen y se presenta un formato diferente al original, el cual estaba descrito por días julianos.

a = La literal dentro del nombre del nombre del archivo hace referencia al orden de la secuencia en la cual fue tomada la imagen del área de estudio, ya que se pueden tener varias imágenes de la región de interés en un solo día.

Swath_3D_1_1 = Esta denominación es el formato que otorga el software de procesamiento digital de imágenes a los archivos del AOT.

georef = Se refiere a que la imagen contenida en el archivo ha sido re proyectada y está georeferenciada.

hdr y img = Son las extensiones de los dos archivos que se generan después del procesamiento, la primera es la del *header*, sin la cual el segundo archivo que posee la imagen para la adquisición de los datos no puede ser abierto.

3.1.2 Valores del AOT mediante MODIS

Es importante tomar en cuenta que el algoritmo de MODIS proporciona valores del espesor óptico en ventanas espectrales de 0.47 y 0.66 μm , interpolando a 0.55 μm sobre superficies continentales, mientras que los fotómetros de la red AERONET lo hacen a 0.34, 0.38, 0.44, 0.50, 0.675, 0.87 y 1.02 μm , lo cual hace que los datos más pertinentes para la correlación entre MODIS y AERONET sean 0.66 y 0.675 μm respectivamente, además de que en varios estudios anteriores relacionados a este tema se hace referencia al confrontamiento de datos en estas longitudes de onda (Bai et al., 2008; Ichoku et al., 2002; Remer et al., 2002).

Una vez procesadas todas las imágenes del periodo de análisis, fue posible obtener los valores del AOT para cada pixel de 10 x 10 km que presentaba datos. Sin embargo aunque resultaría lógico ubicar el pixel que se encuentra en las mismas coordenadas de los puntos de medición en superficie para la posterior validación, de acuerdo con Ichoku et al., (2002) esto carece de congruencia por varias razones:

Primero; el valor en el pixel de la imagen representa un promedio sobre la superficie del mismo y no puede ser justificablemente igualado con el valor de un punto medido por el fotómetro de la red AERONET.

Segundo; incluso si el pixel fuera lo suficientemente pequeño como para representar un punto, es en extremo poco probable que éste representara las mismas condiciones que las del dato en el punto de ubicación del fotómetro, ya que sus ejes de observación son diferentes y la atmósfera está en constante movimiento.

Además de esto, las nubes pueden oscurecer el pixel MODIS directamente sobre el sitio de observación en la superficie, pero pueden no afectar los pixeles cercanos y aunado a esto, se debe considerar que rara vez coinciden el momento de las mediciones del fotómetro con el paso de las plataformas y que los datos más cercanos con frecuencia empiezan desde los 5 minutos de separación entre la medición de un instrumento y otro (Ichoku et al., 2002).

Tomando en cuenta que la comparación de datos entre un solo pixel dentro de la imagen y las mediciones de los fotómetros en superficie no puede ser representativa del comportamiento del AOT, se debe establecer una selección espacial para poder confrontarla con los datos de la red AERONET.

En trabajos anteriores se han evaluado distintas áreas de selección, principalmente 30 x 30 km, 50 x 50 km, 70 x 70 km y 90 x 90 km (Figura 20), sin embargo no todas estas resultan convenientes para obtener datos representativos. De acuerdo a como lo menciona Ichoku et al., (2002), en el caso de las áreas más grandes es de esperarse que se produzcan errores debido a la influencia de la topografía y a la heterogeneidad de los aerosoles en zonas tan extensas.

Respecto al área más pequeña de 30 x 30 km, si se toma en cuenta que la resolución espacial de MODIS para el AOT es de 10 km, ofrecería tan sólo 9 pixeles para la obtención de estadísticas de la región de interés, por lo que basado en los argumentos anteriores, la selección de 50 x 50 km resulta la más conveniente, además de ofrecer 25 pixeles de los cuales se obtienen los valores de media y desviación estándar del AOT.

Además, se sabe que la velocidad promedio de viaje frontal de una partícula aerosol es de 50 km/h, lo que significa que una ventana de 50 x 50 km pueda representar una hora en el rango de datos AEROENT (Ichoku et al., 2002), proporcionando así un mayor conjunto de datos durante el lapso en el cual la plataforma Terra realiza su cobertura sobre México.

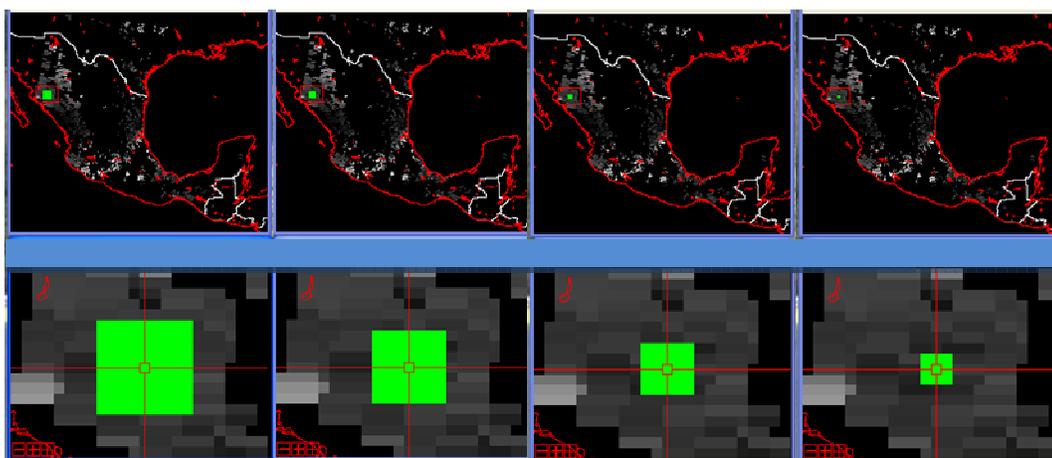


Figura 20. Diferentes áreas de selección, 90 x 90 km, 70 x 70 km, 50 x 50 km y 30 x 30 km respectivamente.

Tomando en cuenta los criterios expuestos, se decidió utilizar un área de 50 x 50 km para el análisis del AOT en el noroeste de México, sin embargo, la obtención de datos estadísticos a partir de cada una de las imágenes representa un procedimiento complejo y que requiere de un largo periodo de trabajo, por lo que se realizó un agrupamiento de los archivos en periodos mensuales a través del proceso de apilamiento (*stack*), de manera que en la imagen final se pudiera realizar la selección del área de interés y obtener los valores de media aritmética y desviación estándar para cualquier día del mes en el que estuvieran relacionados todos los archivos.

La ubicación del pixel central en cada selección se corresponde con las coordenadas del instrumento de validación en la superficie, principalmente fueron utilizados los datos del fotómetro AERONET que se localiza en la ciudad de Hermosillo (Figura 21), aunque de igual manera se obtuvieron estadísticas de los puntos en los que se realizaron mediciones durante la campaña de medición de diciembre de 2009 a la cual se hace referencia en incisos anteriores.

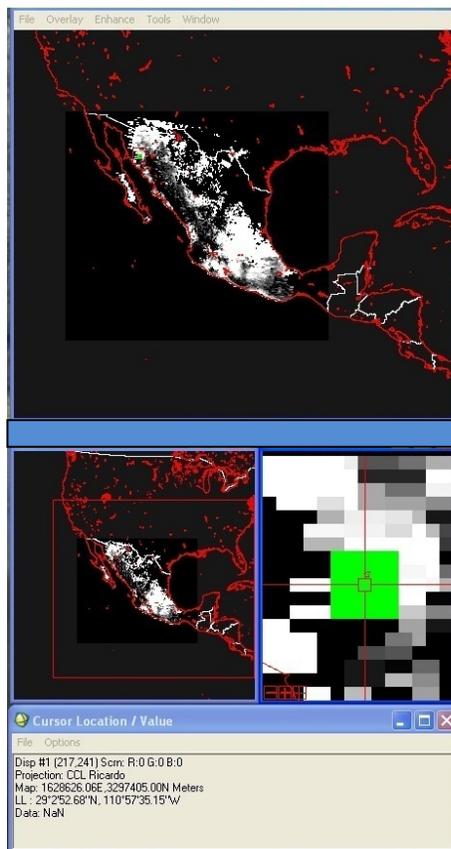


Figura 21. Selección del la región de interés (5x 5 pixeles) en la ciudad de Hermosillo.

Las estadísticas proporcionadas por el procesador de imágenes nos indican los valores mínimos, máximos, medias y desviaciones estándar para cada día del mes, representados en la tabla inferior como bandas de información (Figura 22). Una vez obtenidos, estos datos son transformados a un archivo de texto y posteriormente importados en una hoja de cálculo para facilitar el manejo de la información a través de un sistema manejador de base de datos.

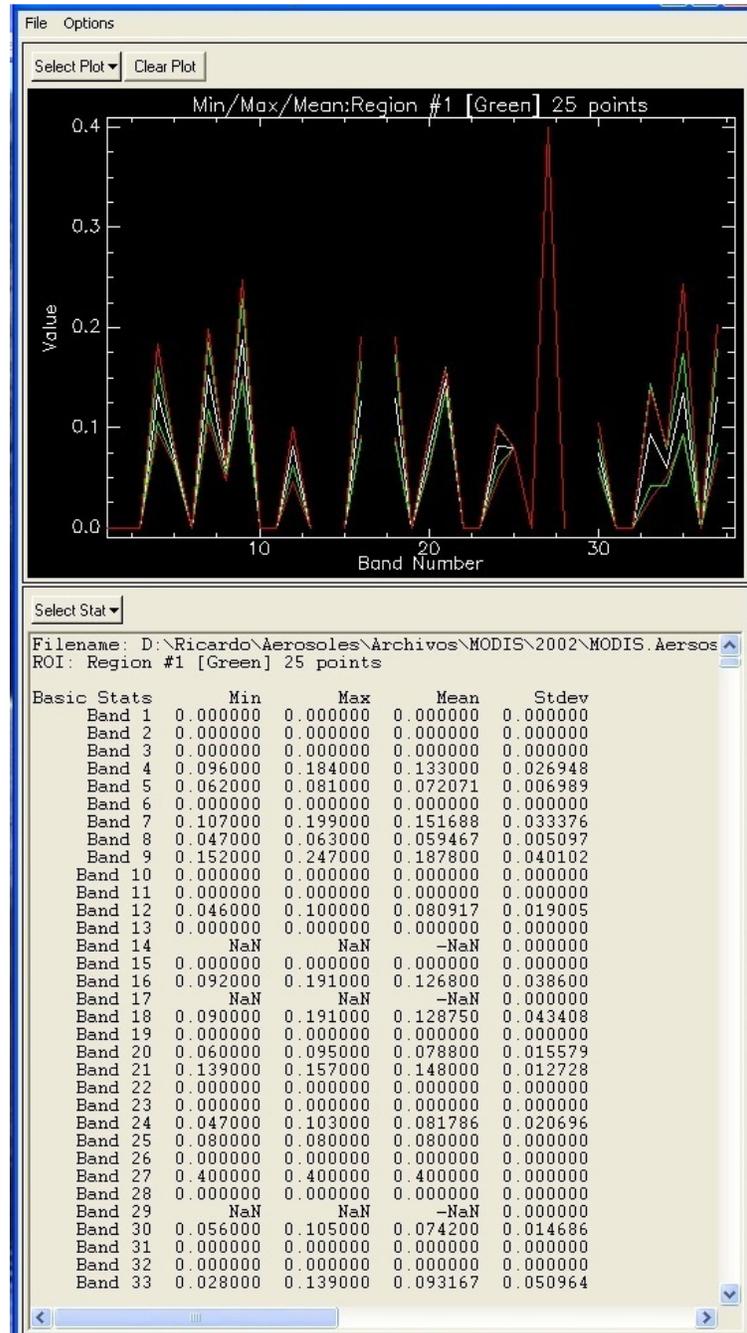


Figura 22. Estadísticas del AOT en el área de selección de la ciudad de Hermosillo para un periodo mensual.

3.1.3 Datos AERONET

La adquisición de los valores del AOT de la red AERONET para el periodo de estudio se realizó a través de la herramienta de descarga de su sitio electrónico, en este proceso se ubicaron los datos de la ciudad de Hermosillo (Figura 23) de entre todos los sitios de la red global, posteriormente se hizo el requerimiento de las mediciones nivel 2 (Figura 24) que aunque representan un volumen menor de datos, son aquellos que poseen una mejor calidad en el procesamiento posterior a la adquisición de los datos in situ, y finalmente, se seleccionó el rango de tiempo de la información requerida, el cual fue de año por año⁸ para el periodo de estudio con el fin de facilitar el filtrado de los valores a través de un sistema manejador de base de datos.

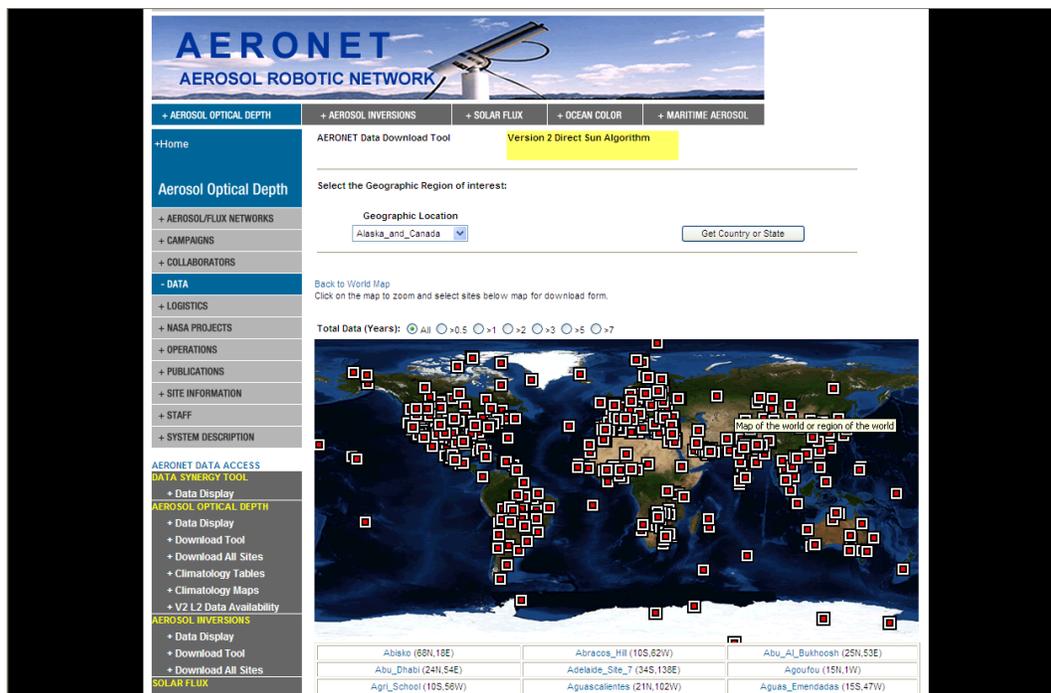


Figura 23. Selección del sitio de medición de los valores del AOT en la red AEROENT. Fuente: (GSFC, 2010)

⁸ El sistema de descarga de AEROENT ofrece la posibilidad de obtener promedios diarios o mensuales de todas las mediciones, sin embargo, dado que sólo se requieren los valores cercanos a la hora de paso del satélite sobre el punto de validación, fue necesario obtener todos los datos para su procesamiento selectivo.

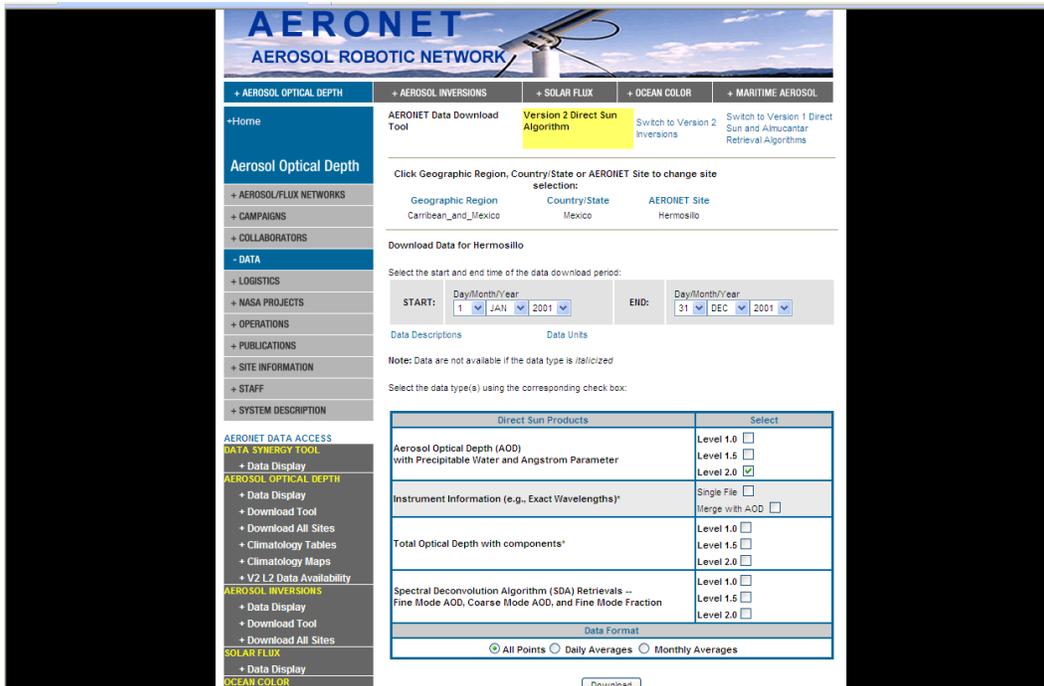


Figura 24. Selección del tipo y periodo de los datos. Fuente: (GSFC, 2010).

Una vez obtenidos los datos, al igual que los valores extraídos de las imágenes MODIS, son importados a una hoja de cálculo para realizar la selección de las mediciones de acuerdo con la fecha, el parámetro, la longitud de onda del filtro espectral y la hora de la medición.

A diferencia de trabajos relacionados con la comparación entre los datos MODIS y AEROENT en los que se considera un periodo de una hora en las mediciones del fotómetro que concuerde con la hora del paso del satélite (Ichoku et al., 2002), en la presente investigación se considera un lapso de tres horas, ya que el análisis de los archivos MODIS demuestra que el lapso de tiempo en que la plataforma Terra se posiciona sobre el noroeste de México diariamente es de tres horas, (entre 10:30 am y 1:30 pm), además de que se debe tomar en cuenta que el volumen de datos nivel 2.0 de AEROENT es menor al de los niveles 1.5 y 1.0, y la disponibilidad de valores del AOT a través de MODIS tampoco es muy extensa.

3.1.4 Valores del AOT mediante AERONET

Para este proceso, los datos descargados fueron importados a un sistema manejador de bases de datos a través del cual y mediante el uso de queries⁹ específicos en lenguaje SQL (Figura 25), se seleccionaron únicamente los datos disponibles entre las 10:30 y 13:30 hrs (hora central de México) y correspondientes al filtro espectral de 675 nm para ser confrontados con los datos del sensor MODIS en un filtro de 660 nm y así elaborar las gráficas de dispersión correspondientes y hallar el coeficiente de correlación entre ambos.

La base de datos creada fue establecida con siete columnas para la búsqueda y procesamiento de información, las cuales son:

FECHA HORA AOT_1020 AOT_870 AOT_675 AOT_500 AOT_440

El Query utilizado para el filtrado de los datos requeridos es descrito a continuación:

```
SELECT `FECHA`, AVG (`AOT_675`) FROM `AERONET` WHERE `FECHA` >= 20010101 AND  
`FECHA` <= 20021231 AND `HORA` >= 163000 AND `HORA` <= 193000 GROUP BY DAY  
(`FECHA`)
```

Por medio de esta instrucción se obtuvo el promedio los valores diarios del AOT en el filtro de 675 nm entre las 16:30 y 19:30 GMT (Figura 26), hora en la que se sabe que la plataforma Terra pasa sobre México, además de que se agrupó la información por fecha para el periodo completo de los años 2001 y 2002¹⁰.

⁹ Los Queries, son oraciones mediante las cuales se realiza la petición de búsqueda en un sistema manejador de base de datos y poseen una sintaxis lógica que puede ser interpretada por cualquier sistema.

¹⁰ En capítulos anteriores, se hace referencia a un periodo de análisis entre 2001 y 2003, sin embargo no hay valores disponibles para el último año en la base de datos de AERONET por lo que se trabajó con los primeros dos.

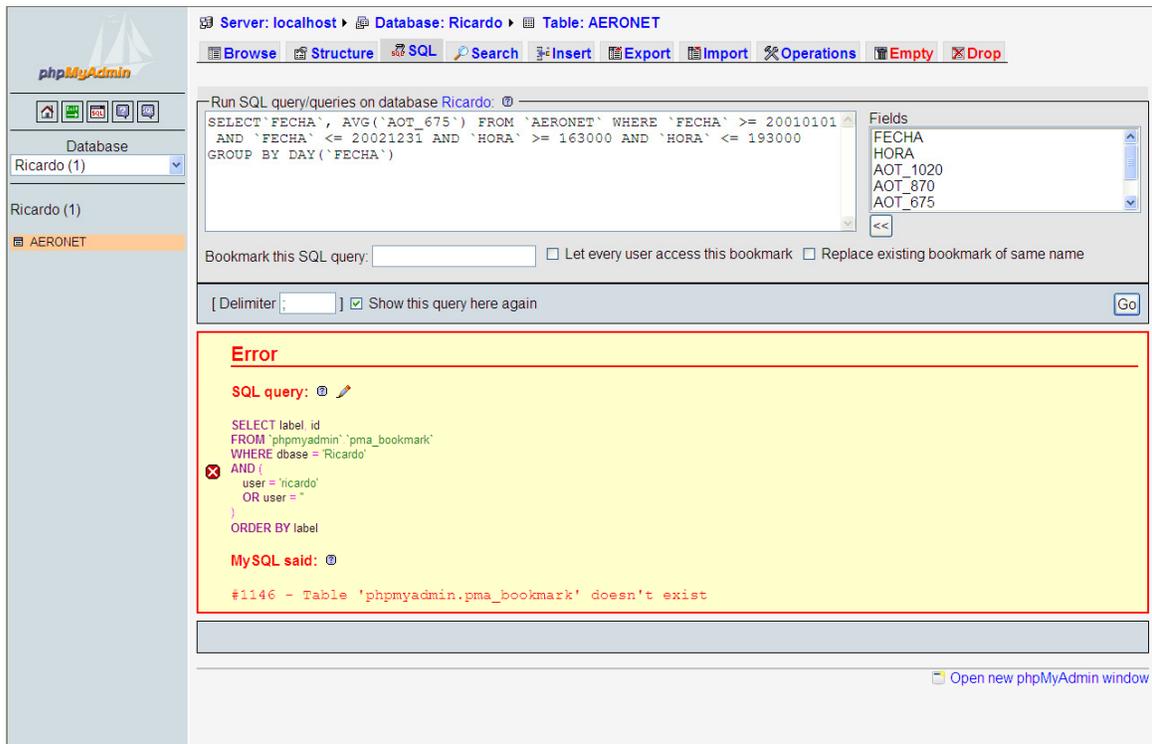


Figura 25. Selección de de datos AEROENT en SQL. Fuente: <http://rayenari.geofisica.unam.mx/phpMyAdmin>

FECHA	AVG(`AOT_675`)
2001-12-01	0.079914785855051
2001-12-02	0.078483511585482
2001-12-03	0.10108041740023
2002-04-04	0.068354363750779
2002-01-05	0.068491361922874
2002-01-06	0.085291437877459
2002-01-07	0.023439583135769
2002-01-08	0.084844814613461
2002-04-09	0.098244946047261
2002-02-10	0.082379000468387
2002-02-11	0.069794333367436
2002-02-12	0.10364239998162
2001-12-13	0.043604999625434
2001-12-14	0.08387392112299
2001-11-15	0.085353479981422
2001-11-16	0.067872646303537
2001-11-17	0.057166722396182
2001-12-18	0.079726166216036
2001-11-19	0.056120262389667
2001-11-20	0.053278404892095
2001-11-21	0.053420840953053
2001-12-22	0.066325499815866
2001-12-23	0.052653885632753
2001-12-24	0.055309772491455
2001-11-25	0.067794792755539
2001-12-26	0.080749295893367
2001-11-27	0.10370526642849
2001-11-28	0.073377059005639
2002-01-30	0.10969335169477

Figura 26. Resultados de la selección después de la indicación con los queries en SQL. Fuente: <http://rayenari.geofisica.unam.mx/phpMyAdmin>

Fecha	MODIS 660 nm	AERONET 675 nm	Fecha	MODIS 660 nm	AERONET 675 nm
15/11/2001	0.04700000	0.02151636	05/06/2002	0.36271400	0.13462458
16/11/2001	0.16315000	0.03446177	08/06/2002	0.34577800	0.14995492
17/11/2001	0.08700000	0.03355362	09/06/2002	0.36500000	0.06558950
19/11/2001	0.11037500	0.04732900	12/06/2002	0.39087500	0.14424058
20/11/2001	0.14760000	0.03939413	14/06/2002	0.64200000	0.15638400
21/11/2001	0.09800000	0.04258614	15/06/2002	0.31950000	0.14523883
25/11/2001	0.13984600	0.03491987	16/06/2002	0.73900000	0.11349450
27/11/2001	0.13450000	0.03744760	17/06/2002	0.26223100	0.10734983
28/11/2001	0.09730800	0.04334970	18/06/2002	0.35000000	0.10298600
01/12/2001	0.06888900	0.03290827	19/06/2002	0.34133300	0.09602550
02/12/2001	0.12005000	0.02228500	21/06/2002	0.43933300	0.09180567
03/12/2001	0.02214300	0.01115900	25/06/2002	0.61500000	0.13830422
13/12/2001	0.10826300	0.01001254	26/06/2002	0.42800000	0.17784543
16/12/2001	0.10182600	0.03282064	27/06/2002	0.40100000	0.19024858
17/12/2001	0.04766700	0.01083812	30/06/2002	0.67433300	0.16896028
18/12/2001	0.10073700	0.03201989	01/09/2002	0.15400000	0.11731225
19/12/2001	0.02538500	0.01651793	02/09/2002	0.40400000	0.18827701
20/12/2001	0.11694700	0.02131789	05/09/2002	0.25728000	0.10057900
21/12/2001	0.05042900	0.02466560	12/09/2002	0.15733300	0.06258500
22/12/2001	0.09714300	0.01854000	13/09/2002	0.11600000	0.05697200
23/12/2001	0.06014300	0.02065667	14/09/2002	0.14095700	0.05644433
24/12/2001	0.06525000	0.02142057	16/09/2002	0.25866700	0.08315050
25/12/2001	0.08965000	0.00585738	21/09/2002	0.17252400	0.09421967
26/12/2001	0.02520000	0.02577600	22/09/2002	0.15100000	0.04333180
05/01/2002	0.13368400	0.01517575	23/09/2002	0.12840000	0.04876790
06/01/2002	0.05433300	0.00776320	25/09/2002	0.17500000	0.06890750
07/01/2002	0.08514300	0.02254000	27/09/2002	0.21233300	0.08882033
08/01/2002	0.08156300	0.01104217	28/09/2002	0.22000000	0.08812280
03/06/2002	0.30212500	0.09941730			

Tabla 10. Disponibilidad de datos MODIS/AERONET.

Una vez procesada toda la información se elaboró una tabla de disponibilidad de datos para el periodo 2001 – 2002, ya que el análisis de los archivos de MODIS y de AERONET demostró que en la mayoría de los casos la existencia de datos que puedan ser comparados es muy baja; esto debido a que se presentan largos periodos sin datos AERONET donde hay disponibilidad de datos MODIS y viceversa, obteniéndose al final tan sólo 57 casos (días) a lo largo del periodo 2001 – 2003 en los que existen valores tanto del sensor MODIS como del fotómetro AERONET en Hermosillo, Sonora (Tabla 10).

Capítulo IV

Análisis de Resultados

4.1 Validación MODIS/AERONET

Una vez obtenidos los 57 casos (días) en los que existen valores de los dos instrumentos y con los cuales se haría la validación, se realizó un análisis estadístico de éstos para poder conocer con mayor detalle el conjunto de mediciones obtenidas por los dos instrumentos.

A través del análisis de los 57 datos disponibles mediante la obtención de la estadística descriptiva (Tabla 11), fue posible identificar una elevada disparidad entre ambos conjuntos de datos, además de que a través de los parámetros obtenidos se observó que el sensor MODIS presenta siempre valores mayores en relación con el fotómetro AERONET, principalmente en los máximos, mínimos y media para cada instrumento.

En el caso de la Curtosis¹¹, este dato indica que para el caso de los datos MODIS, estos presentan una distribución mesocúrtica (1.46), mientras que los datos AERONET se encuentran en una distribución platicúrtica (-0.485), esto si se toma en cuenta que una distribución normal representa un valor de 3.0 (Spiegel, 2001).

El coeficiente de asimetría o sesgo en ambos conjuntos de datos es positivo y aún cuando en el caso de los valores MODIS es superior en relación a los de AERONET, ambos están sesgados hacia la derecha ya que en un conjunto de datos que no es simétrico se considera el sesgo en base a la sección de la gráfica de distribución en la que se concentra un menor número de valores (Spiegel, 2001). Este dato indica finalmente que a pesar de la disparidad encontrada en los demás parámetros estadísticos, ambos grupos de datos son similares en su distribución y es conveniente realizar el cálculo del coeficiente de correlación entre ellos.

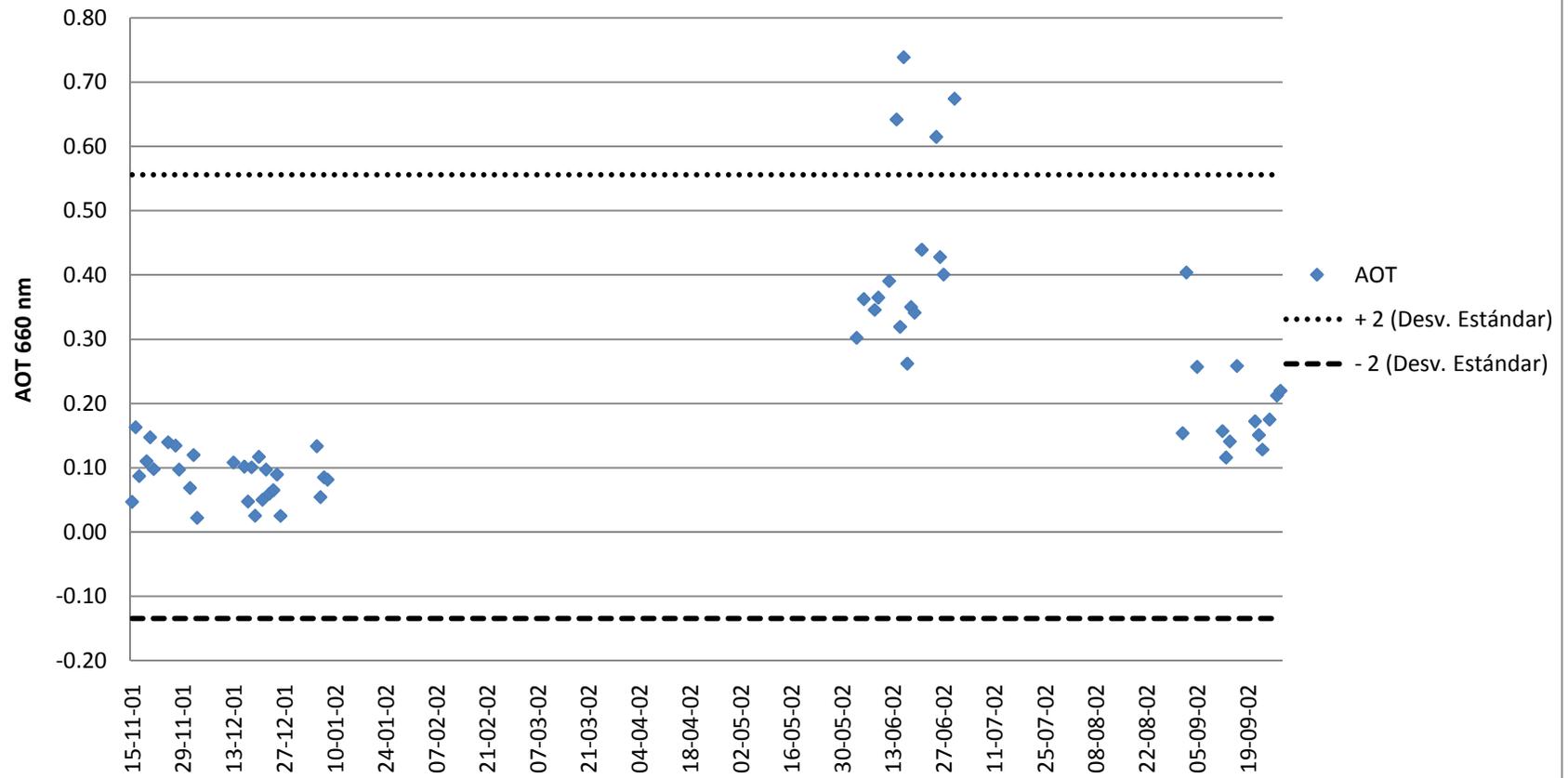
¹¹ En algunos casos una distribución puede tener sus valores concentrados cerca de la media, así que la distribución tiene un pico grande en el centro de la gráfica que lo representa, semejándose a la forma de una campana de gauss y en otros casos la distribución puede ser relativamente plana; a la medida del grado de apuntamiento de una distribución se le llama coeficiente de curtosis (Spiegel, 2001).

Sin embargo, al elaborar las gráficas de distribución (Gráficas 4 y 5) con un margen de (+/-) dos desviaciones estándar tanto para los valores MODIS como AERONET, se determinó que sólo 7 datos que representan el 12.3% del conjunto se encuentran fuera del rango mencionado, lo que representa un porcentaje cercano al de una distribución normal en donde el 95.45% de los valores se localizan dentro de las +/- dos desviaciones estándar (Spiegel, 2001), por lo que la omisión de los casos restantes no afecta significativamente el conjunto original de datos y es posible determinar cuáles son los datos que bajo un criterio estadístico no deberían ser tomados en cuenta para el análisis, esto con el objeto de identificar valores espurios y refinar el conjunto final de datos utilizado para la validación de ambos instrumentos.

Estadísticas Básicas	MODIS	AEROENET
Media	0.21061	0.06803
Error típico	0.02286	0.00701
Mediana	0.14096	0.04733
Moda	#N/A	#N/A
Desviación estándar	0.1726	0.0529
Varianza de la muestra	0.02979	0.0028
Curtosis	1.4623	-0.485
Coefficiente de asimetría	1.38627	0.80227
Rango	0.71686	0.18439
Mínimo	0.02214	0.00586
Máximo	0.739	0.19025
Suma	12.0049	3.87783
Número de casos	57	57

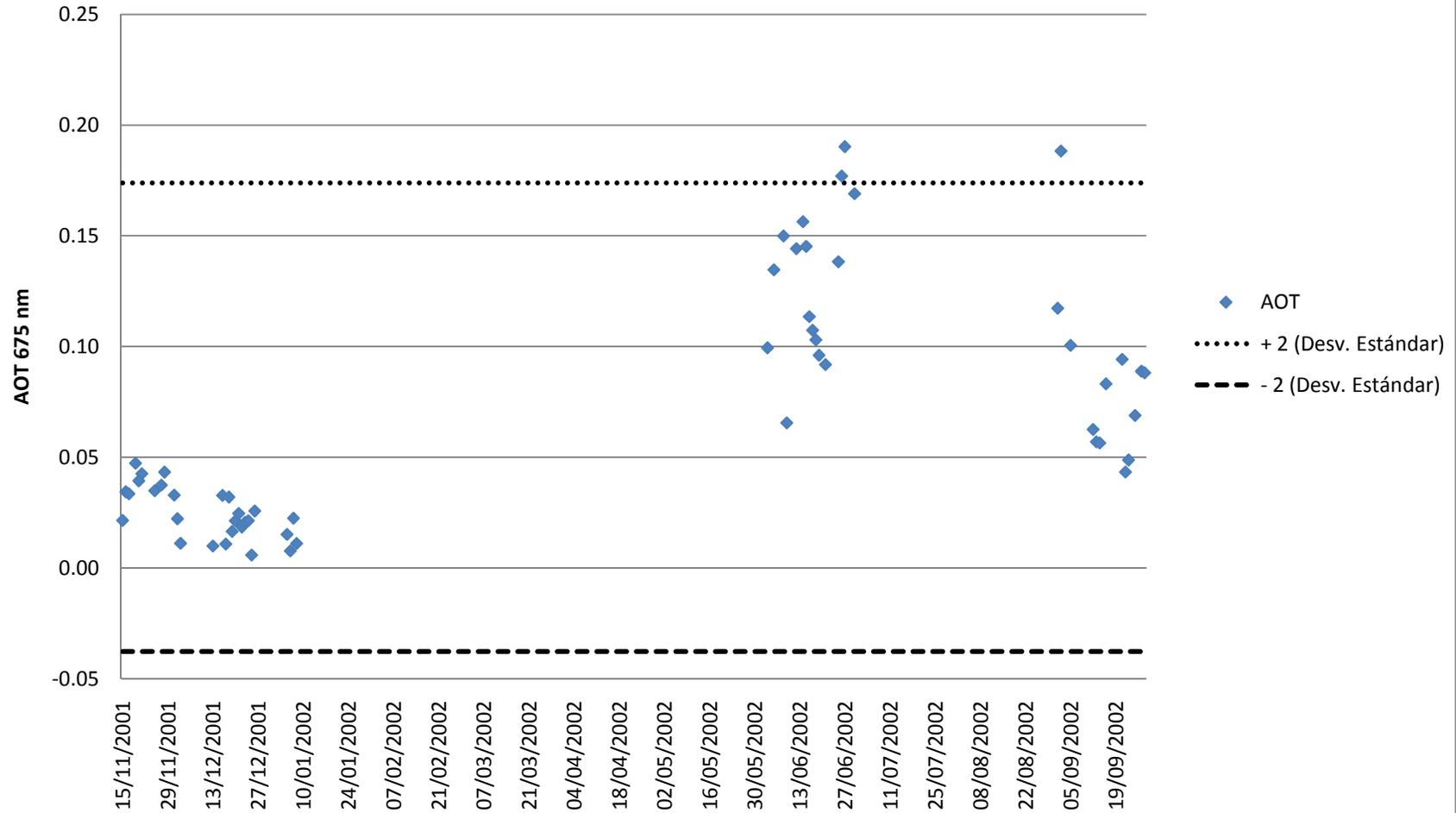
Tabla 11. Estadísticas básicas del conjunto de datos MODIS/AERONET.

Análisis de la Desviación Estándar de datos MODIS



Gráfica 3. Desviación Estándar de los datos MODIS disponibles.

Análisis de la Desviación Estándar de datos AERONET

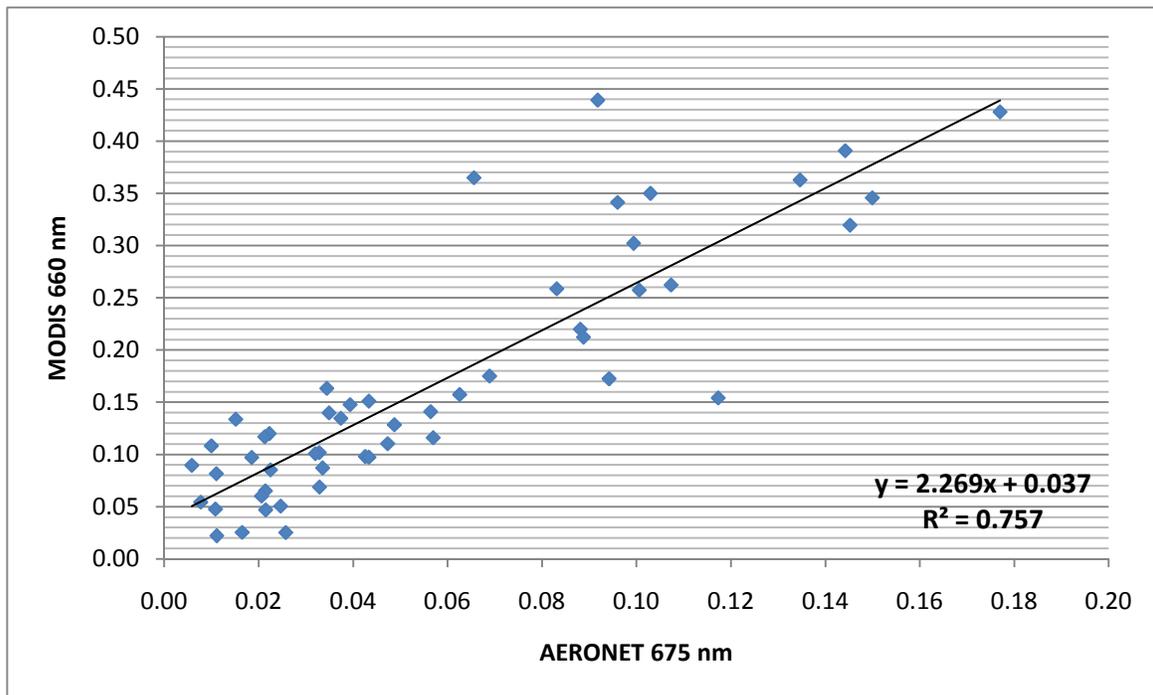


Gráfica 4. Desviación Estándar de los datos AERONET disponibles.

En las gráficas se observa que el número de datos que se encuentran fuera del rango señalado es de cuatro valores en el caso del conjunto MODIS (Gráfica 3) y tres valores en el conjunto AERONET (Gráfica 4) que además no se presentan de manera aleatoria sino que coinciden en las mismas fechas para ambos casos.

Una vez identificados los valores que se encuentran fuera del rango de ± 2 desviaciones estándar se obtiene un conjunto de datos el cual excluye los cuatro datos de MODIS y los tres de AERONET con los valores respectivos de un instrumento contra otro para una misma fecha.

Finalmente se elaboró un gráfico de dispersión de puntos con los 50 datos restantes (Gráfica 5) en el que se observa que la correlación entre ambos conjuntos de datos es de $R^2 = 0.757$, valor que puede ser relacionado con los resultados obtenidos en trabajos anteriores bajo parámetros similares, donde la correlación obtenida es de $R^2 = 0.729$ (Ichoku et al., 2002) y de $R^2 = 0.9245$ (Bai et al., 2008), sin embargo debe tomarse en cuenta que mediante el análisis estadístico del conjunto inicial de datos no se encontró una relación estrecha que indicara una distribución normal mediante los valores de la curtosis y el rango de ± 2 desviaciones estándar, así que si bien este método presenta una aproximación en la identificación de que valores pudieran representar datos espurios en el conjunto es necesario confrontarlo con otros procedimientos que pudieran dar mayor congruencia a las mediciones que deben ser omitidas en la correlación final.



Gráfica 5. Correlación MODIS/AERONET con los 50 datos de ± 2 desviaciones estándar.

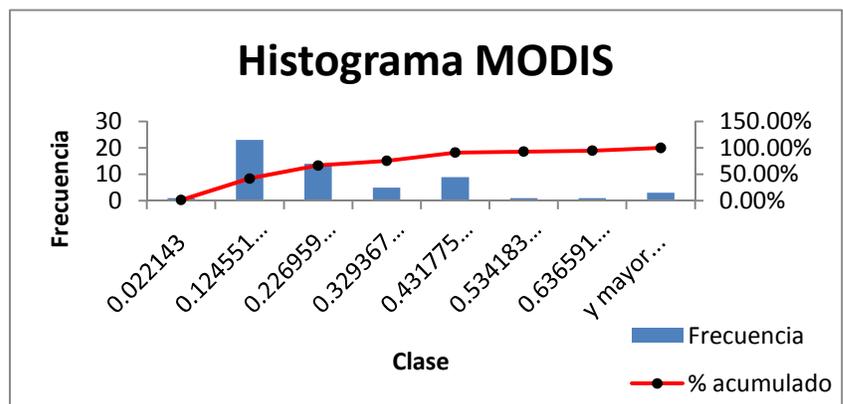
Así que no sólo se utilizó el criterio de ± 2 desviaciones estándar para analizar los datos, sino que también se elaboraron los histogramas de frecuencias acumuladas para cada conjunto de datos y así observar el comportamiento de todos los valores disponibles, buscando un criterio estadístico adecuado para poder decidir cuáles serían los datos a utilizar en la validación final de ambos instrumentos y si sería conveniente omitir datos o no en la correlación de los dos instrumentos.

La información contenida en los histogramas muestra la frecuencia con la que se presentan todos los valores de un conjunto en determinados rangos de clases (Spiegel, 2001) y en el caso de los datos utilizados representa en que rangos específicos se concentran los valores del AOT dentro del conjunto de las mediciones que pueden ser correlacionadas.

En el primer Histograma (Gráfica 6), se observa que la mayoría de los valores se concentran en los rangos de clase de 0.125 a 0.432, siendo únicamente seis datos los que corresponden a frecuencias bajas.

Eliminando este pequeño conjunto de datos se podría realizar de nuevo el cálculo de la correlación entre los valores de MODIS y AERONET, sin embargo es necesario utilizar un criterio que involucre la relación entre ambos conjuntos de datos y no de un solo grupo de manera aislada, por lo que se analizó también el histograma de de datos AERONET para comparar las frecuencias bajas en ambos grupos de datos

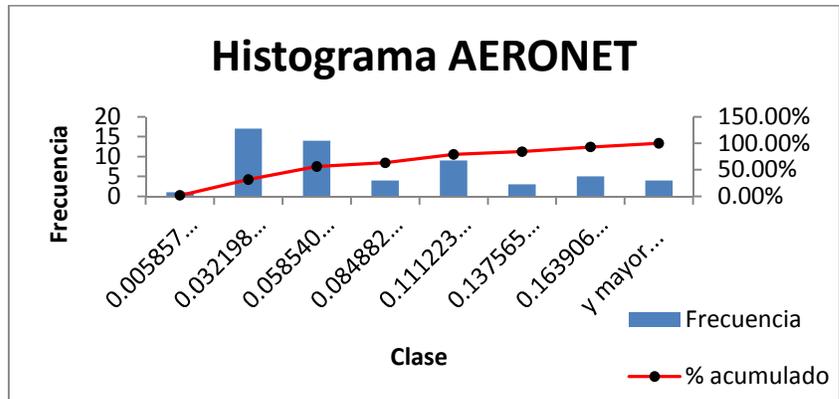
Clase	Frecuencia	% acumulado
0.022143	1	1.75%
0.12455114	23	42.11%
0.22695929	14	66.67%
0.32936743	5	75.44%
0.43177557	9	91.23%
0.53418371	1	92.98%
0.63659186	1	94.74%
y mayor...	3	100.00%



Gráfica 6. Histograma de Frecuencias Acumuladas de los datos MODIS disponibles para la correlación.

En el Histograma de los datos AERONET (Gráfica 7), es evidente una distribución más uniforme de los datos en comparación con los valores de MODIS, presentándose únicamente una columna con frecuencia baja, esto podría suponer una mayor facilidad en el tratamiento estadístico de los datos, pero como se observa en el histograma anterior, la distribución entre ambos conjuntos es poco similar por lo que el análisis de estos Histogramas es de utilidad más en el entendimiento de cómo se comportan los datos que en la identificación de datos espurios dentro del conjunto.

Clase	Frecuencia	% acumulado
0.00585738	1	1.75%
0.03219898	17	31.58%
0.05854058	14	56.14%
0.08488218	4	63.16%
0.11122378	9	78.95%
0.13756538	3	84.21%
0.16390698	5	92.98%
y mayor...	4	100.00%



Gráfica 7. Histograma de Frecuencias Acumuladas de los datos AERONET disponibles para la correlación.

Finalmente, como otro criterio estadístico en la selección de los datos utilizados en la correlación final se calculó el error absoluto¹² entre MODIS y AERONET ya que este dato relaciona de manera directa ambos conjuntos y presenta un grupo de valores que pueden ser analizados tomando en cuenta todos los datos y no sólo los de cada conjunto de manera aislada como en los histogramas anteriores, además de que en estudios anteriores relacionados con el tema se hace referencia a este parámetro en el tratamiento estadístico de la información (Bai et al., 2008).

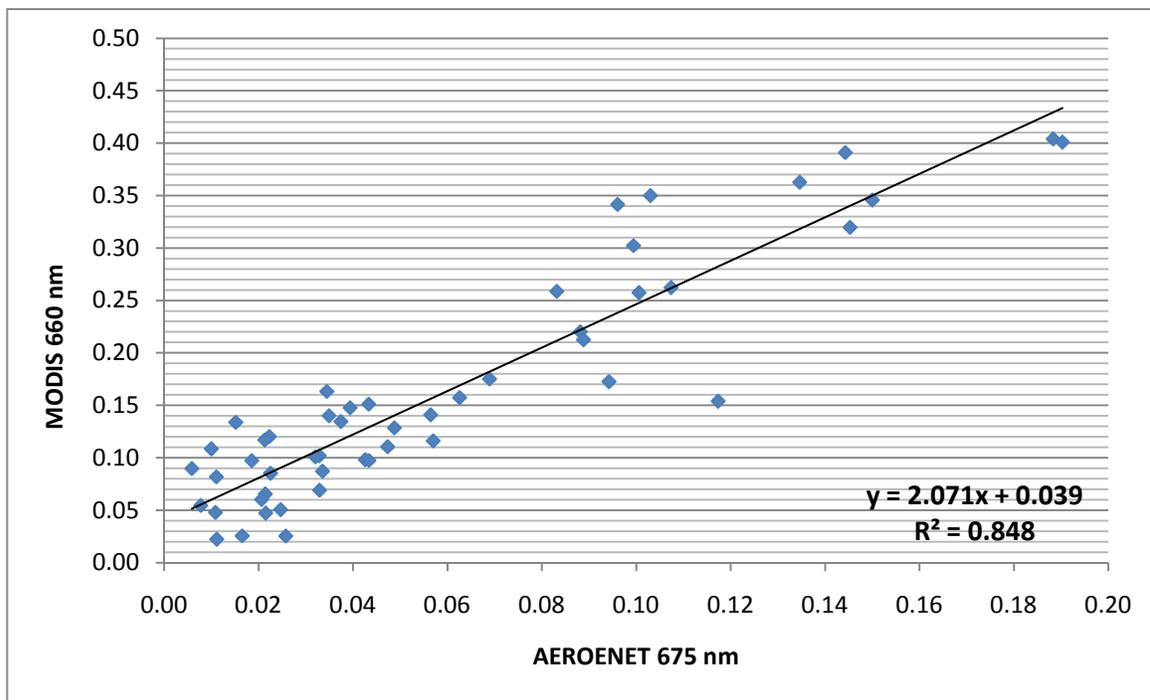
Como se observa en la Tabla 12, existen valores del error absoluto que presentan una diferencia muy elevada en relación con el total de los datos, principalmente los de las primeras siete filas, los que presentan valores de 0.25 hasta a 0.626 de diferencia entre las mediciones de las dos fuentes.

Al omitir estos siete datos del conjunto y realizar la correlación con los valores restantes (Gráfica 8) se obtiene un resultado de $R^2 = 0.848$, la cual resulta más elevada que la obtenida bajo el criterio de +/- 2 desviaciones estándar, sin embargo no existe sustento estadístico para la determinación del rango ≥ 0.25 en la elección de los datos para la correlación más allá de una suposición lógica.

¹² El error absoluto se refiere a la diferencia numérica entre los valores de cada conjunto de datos.

Fecha	MODIS 660 nm	AERONET 675 nm	Error Absoluto	Fecha	MODIS 660 nm	AERONET 675 nm	Error Absoluto
16/06/2002	0.739000	0.113495	0.625505	27/11/2001	0.134500	0.037448	0.097052
30/06/2002	0.674333	0.168960	0.505373	20/12/2001	0.116947	0.021318	0.095629
14/06/2002	0.642000	0.156384	0.485616	12/09/2002	0.157333	0.062585	0.094748
25/06/2002	0.615000	0.138304	0.476696	14/09/2002	0.140957	0.056444	0.084513
21/06/2002	0.439333	0.091806	0.347527	25/12/2001	0.089650	0.005857	0.083793
09/06/2002	0.365000	0.065589	0.299411	23/09/2002	0.128400	0.048768	0.079632
26/06/2002	0.428000	0.177000	0.251000	22/12/2001	0.097143	0.018540	0.078603
18/06/2002	0.350000	0.102986	0.247014	21/09/2002	0.172524	0.094220	0.078304
12/06/2002	0.390875	0.144241	0.246634	08/01/2002	0.081563	0.011042	0.070521
19/06/2002	0.341333	0.096026	0.245307	16/12/2001	0.101826	0.032821	0.069005
05/06/2002	0.362714	0.134625	0.228089	18/12/2001	0.100737	0.032020	0.068717
02/09/2002	0.404000	0.188277	0.215723	19/11/2001	0.110375	0.047329	0.063046
27/06/2002	0.401000	0.190249	0.210751	07/01/2002	0.085143	0.022540	0.062603
03/06/2002	0.302125	0.099417	0.202708	13/09/2002	0.116000	0.056972	0.059028
08/06/2002	0.345778	0.149955	0.195823	21/11/2001	0.098000	0.042586	0.055414
16/09/2002	0.258667	0.083151	0.175516	28/11/2001	0.097308	0.043350	0.053958
15/06/2002	0.319500	0.145239	0.174261	17/11/2001	0.087000	0.033554	0.053446
05/09/2002	0.257280	0.100579	0.156701	26/12/2001	0.025200	0.025776	0.050976
17/06/2002	0.262231	0.107350	0.154881	06/01/2002	0.054333	0.007763	0.046570
28/09/2002	0.220000	0.088123	0.131877	24/12/2001	0.065250	0.021421	0.043829
16/11/2001	0.163150	0.034462	0.128688	23/12/2001	0.060143	0.020657	0.039486
27/09/2002	0.212333	0.088820	0.123513	17/12/2001	0.047667	0.010838	0.036829
05/01/2002	0.133684	0.015176	0.118508	01/09/2002	0.154000	0.117312	0.036688
20/11/2001	0.147600	0.039394	0.108206	01/12/2001	0.068889	0.032908	0.035981
22/09/2002	0.151000	0.043332	0.107668	21/12/2001	0.050429	0.024666	0.025763
25/09/2002	0.175000	0.068907	0.106093	15/11/2001	0.047000	0.021516	0.025484
25/11/2001	0.139846	0.034920	0.104926	03/12/2001	0.022143	0.011159	0.010984
13/12/2001	0.108263	0.010013	0.098250	19/12/2001	0.025385	0.016518	0.008867
02/12/2001	0.120050	0.022285	0.097765				

Tabla 12. Error absoluto entre los datos MODIS y AEROENT útiles para la correlación.

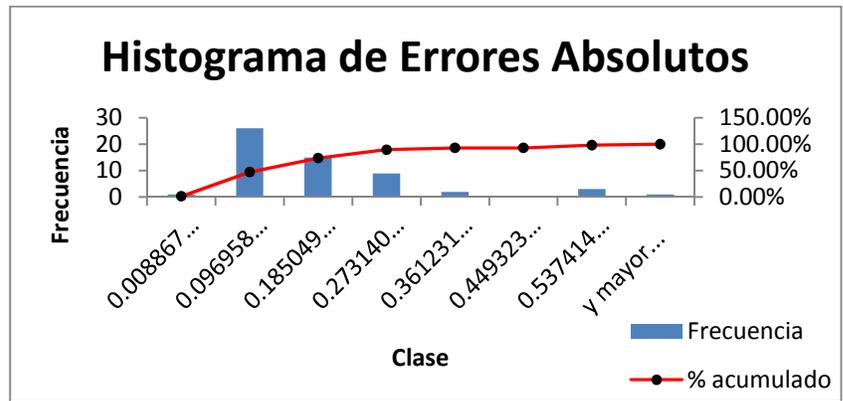


Gráfica 8. Correlación MODIS/AEROENT eliminando los valores ≥ 0.25 unidades.

Para determinar mediante el análisis de los datos cuales deberían ser utilizados en el conjunto final, se realizó el histograma de frecuencias acumuladas de los valores del error absoluto (Gráfica 9) para que de igual manera que las mediciones independientes de cada instrumento, fuera posible identificar las frecuencias más bajas de todo el conjunto pero a diferencia del primer caso mediante un parámetro que involucra a los valores de ambos instrumentos relacionados entre sí.

El criterio que fue utilizado en este caso al igual que en los histogramas anteriores fue el de la omisión de las frecuencias más bajas para la selección de los datos utilizados en la correlación final pero a diferencia de los valores de cada instrumento, el error absoluto entre las mediciones de MODIS y AERONET representa un dato que relaciona ambas fuentes por lo que se espera que la identificación de mediciones que pudieran resultar espurias presente finalmente el conjunto de datos adecuados para la validación entre los dos instrumentos basado en un sustento estadístico diferente y más sólido que los criterios anteriores.

Clase	Frecuencia	% acumulado
0.00886707	1	1.75%
0.09695827	26	47.37%
0.18504948	15	73.68%
0.27314068	9	89.47%
0.36123189	2	92.98%
0.44932309	0	92.98%
0.53741429	3	98.25%
y mayor...	1	100.00%



Gráfica 9. Histograma de Frecuencias Acumuladas de Errores absolutos entre los valores de MODIS y AERONET.

Los valores que fueron omitidos en la selección son aquellos con una frecuencia ≤ 3 por el valor tan bajo que representa dentro de los rangos de clases incluidos en el histograma, excluyendo finalmente un conjunto de siete valores similares a los eliminados tomando en cuenta el criterio de errores absolutos ≥ 0.25 y el de ± 2 desviaciones estándar.

En la Tabla 13, se presenta el conjunto final de los datos utilizados en el cálculo del coeficiente de correlación, los cuales otorgan veracidad a través del desarrollo metodológico expuesto en el presente trabajo a los datos obtenidos por el sensor MODIS para el análisis espacio-temporal de las variaciones del AOT en el Noroeste de México.

Este conjunto final de datos es el resultado de un extenso proceso de selección de todos los valores disponibles de ambas fuentes, además del análisis estadístico de las mediciones cada vez más depuradas para el cálculo del coeficiente de correlación entre los dos instrumentos bajo un criterio lógico, sin embargo debe tomarse en cuenta que ninguno de los procedimientos abordados determina de manera definitiva los valores que proporcionan el coeficiente de correlación más adecuado y todos pueden ser tomados como referencia para la validación del sensor MODIS con los valores del fotómetro AERONET, ya que además, como se mencionaba al inicio de este apartado, algunos de los valores no considerados en el conjunto final se corresponden en la fecha de la medición, por lo que nos posible determinar con exactitud si fueron provocados por errores instrumentales o por distintas variables temporales que son comunes en la atmósfera terrestre.

Fecha	MODIS 660 nm	AERONET 675 nm	Error Absoluto	Fecha	MODIS 660 nm	AERONET 675 nm	Error Absoluto
15/11/2001	0.047000	0.021516	0.025484	07/01/2002	0.085143	0.022540	0.062603
16/11/2001	0.163150	0.034462	0.128688	08/01/2002	0.081563	0.011042	0.070521
17/11/2001	0.087000	0.033554	0.053446	03/06/2002	0.302125	0.099417	0.202708
19/11/2001	0.110375	0.047329	0.063046	05/06/2002	0.362714	0.134625	0.228089
20/11/2001	0.147600	0.039394	0.108206	08/06/2002	0.345778	0.149955	0.195823
21/11/2001	0.098000	0.042586	0.055414	12/06/2002	0.390875	0.144241	0.246634
25/11/2001	0.139846	0.034920	0.104926	15/06/2002	0.319500	0.145239	0.174261
27/11/2001	0.134500	0.037448	0.097052	17/06/2002	0.262231	0.107350	0.154881
28/11/2001	0.097308	0.043350	0.053958	18/06/2002	0.350000	0.102986	0.247014
01/12/2001	0.068889	0.032908	0.035981	19/06/2002	0.341333	0.096026	0.245307
02/12/2001	0.120050	0.022285	0.097765	26/06/2002	0.428000	0.177000	0.251000
03/12/2001	0.022143	0.011159	0.010984	27/06/2002	0.401000	0.190249	0.210751
13/12/2001	0.108263	0.010013	0.098250	01/09/2002	0.154000	0.117312	0.036688
16/12/2001	0.101826	0.032821	0.069005	02/09/2002	0.404000	0.188277	0.215723
17/12/2001	0.047667	0.010838	0.036829	05/09/2002	0.257280	0.100579	0.156701
18/12/2001	0.100737	0.032020	0.068717	12/09/2002	0.157333	0.062585	0.094748
20/12/2001	0.116947	0.021318	0.095629	13/09/2002	0.116000	0.056972	0.059028
21/12/2001	0.050429	0.024666	0.025763	14/09/2002	0.140957	0.056444	0.084513
22/12/2001	0.097143	0.018540	0.078603	16/09/2002	0.258667	0.083151	0.175516
23/12/2001	0.060143	0.020657	0.039486	21/09/2002	0.172524	0.094220	0.078304
24/12/2001	0.065250	0.021421	0.043829	22/09/2002	0.151000	0.043332	0.107668
25/12/2001	0.089650	0.005857	0.083793	23/09/2002	0.128400	0.048768	0.079632
26/12/2001	0.025200	0.025776	0.050976	25/09/2002	0.175000	0.068907	0.106093
05/01/2002	0.133684	0.015176	0.118508	27/09/2002	0.212333	0.088820	0.123513
06/01/2002	0.054333	0.007763	0.046570	28/09/2002	0.220000	0.088123	0.131877

Tabla 13. Conjunto final de datos utilizados para el cálculo del coeficiente de correlación MODIS/AERONET.

Al igual que el conjunto inicial de datos descritos al principio de este capítulo, se muestra la estadística descriptiva (Tabla 14) del universo final de valores con los que se realizó la última correlación entre el sensor MODIS y el fotómetro de la red AERONET ubicado en la ciudad de Hermosillo, Sonora.

Estadísticas Básicas	MODIS	AERONET
Media	0.17009778	0.06251874
Error típico	0.01605866	0.00719362
Mediana	0.134092	0.042959
Moda	#N/A	#N/A
Desviación estándar	0.11355189	0.05086661
Varianza de la muestra	0.01289403	0.00258741
Curtosis	-0.36295472	0.1529001
Coefficiente de asimetría	0.90479288	1.0429696
Rango	0.405857	0.184392
Mínimo	0.022143	0.005857
Máximo	0.428	0.190249
Suma	8.504889	3.125937
Número de casos	50	50

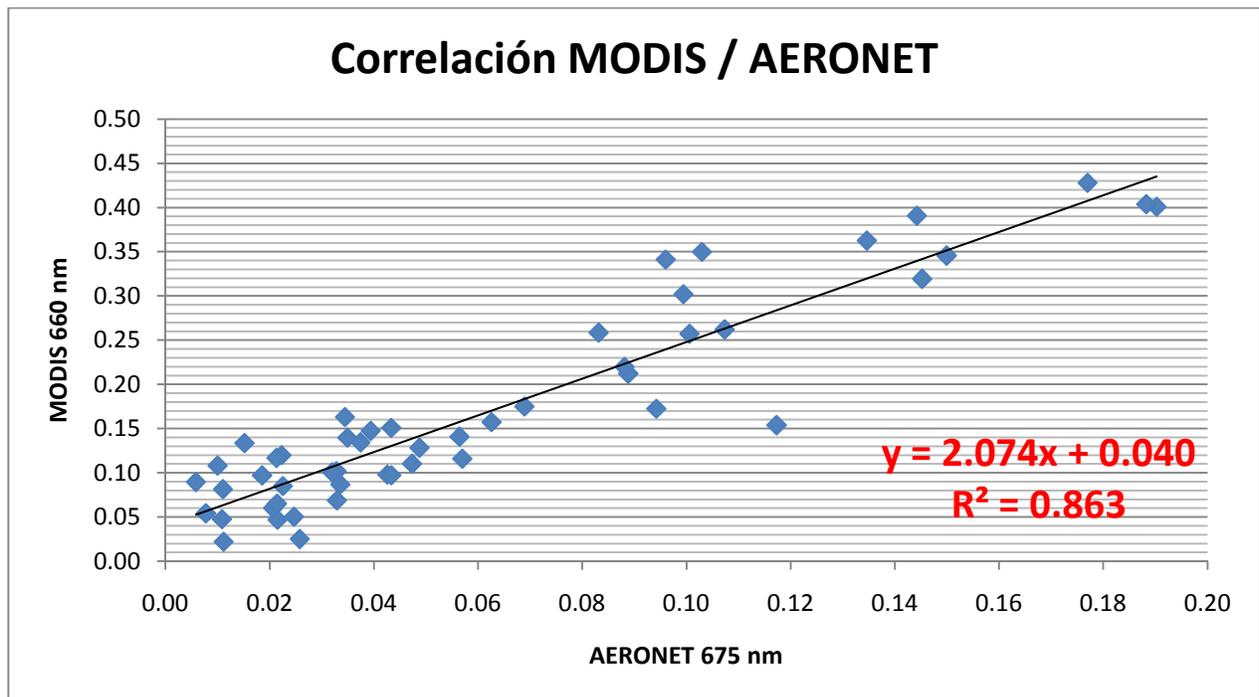
Tabla 14. Estadísticas básicas del conjunto final de datos MODIS/AERONET.

Como se observa en los valores de estos parámetros, una vez seleccionados los datos finales (de 57 a 50 datos), la diferencia entre ambos instrumentos disminuye aunque el sensor MODIS presenta al igual que en la primera estadística descriptiva, los valores más altos en relación con AERONET.

Resulta importante analizar la Curtosis entre ambas columnas que en relación con los primeros valores presentados al inicio del capítulo en donde la diferencia entre ambos datos fue de 1.94 en contraste con 0.516 observados en esta tabla, lo cual genera en ambos conjuntos de datos una distribución de tipo platicúrtica pero mucho más similar entre sí, lo que también se refleja en la disminución del coeficiente de asimetría en el conjunto de MODIS y el aumento en el conjunto de

AERONET, acortando la separación entre ambos valores y generando finalmente una correlación mayor entre los dos grupos de datos.

En la gráfica de dispersión final (Gráfica 10), se observa el coeficiente de correlación final obtenido $R^2 = 0.863$ para un conjunto de 50 datos entre los años 2001 y 2002, este coeficiente es superior al valor obtenido en la correlación anterior bajo el criterio de selección de errores absolutos ≥ 0.25 y el criterio de ± 2 desviaciones estándar, además, el dato final en relación con estudios anteriores presenta una correlación mayor confrontado con coeficientes de $R^2 = 0.729$ (Ichoku et al., 2002) y no muy inferior al compararlo con resultados donde la correlación obtenida es de $R^2 = 0.9245$ (Bai et al., 2008), aunque debe tomarse en cuenta que éstos fueron obtenidos con mediciones de regiones distintas y con diferentes universos de datos con otras cantidades de valores por lo que los resultados se utilizan como parámetro de comparación y no de validación de los obtenidos en este trabajo.



Gráfica 10. Coeficiente de correlación final entre los valores de MODIS y AERONET.

Por último, si bien se obtuvo un coeficiente de correlación elevado ($R^2 = 0.863$) en relación con los calculados inicialmente, resulta conveniente presentar la referencia de los coeficientes obtenidos antes de la depuración de datos ($R^2 = 0.700$), con el criterio de ± 2 desviaciones estándar ($R^2 = 0.757$), con errores absolutos ≥ 3 ($R^2 = 0.848$) y los resultados de estudios similares ($R^2 = 0.729$ y $R^2 = 0.9245$), (Bai et al., 2008; Ichoku et al., 2002).

4.2 Comportamiento Espacio-Temporal del Aerosol en el Noroeste de México

Con base en los datos obtenidos del sensor MODIS y una vez realizada la validación de éstos con las mediciones del fotómetro AERONET en la sección anterior, se puede considerar que los datos del primero son convenientes para estudiar no sólo de manera temporal el comportamiento del espesor óptico del aerosol en la ciudad de Hermosillo, sino que de acuerdo con los coeficientes de correlación obtenidos es posible utilizar los valores MODIS para el análisis espacial del AOT en toda la zona de cobertura de las imágenes que corresponde a la región Noroeste de México aún cuando los datos de referencia fueron obtenidos del estado de Sonora.

En este subcapítulo se presenta el análisis en las variaciones temporales del espesor óptico en Hermosillo, así como el análisis espacial en toda la región citada.

4.2.1 Análisis Temporal

Las gráficas que se presentan en este apartado, hacen referencia al comportamiento de la media del AOT en el polígono de 2500 km² sobre la ciudad de Hermosillo, del cual se obtuvieron las mediciones para la validación de los datos MODIS, y no precisamente de las variaciones en el espesor óptico en toda la región noroeste, ya que para este segundo caso sería necesario realizar el procesamiento digital de las imágenes iniciales para poder obtener el valor en diferentes puntos, aunque dentro de este estudio, se presenta posteriormente el análisis espacial en base a la información plasmada en los mapas finales.

El conjunto de gráficas expuestas, representa las variaciones en periodos mensuales para los tres años del estudio, aunque como se mencionó durante el proceso de validación, la falta de datos en algunos lapsos obedece a la poca disponibilidad de imágenes digitales para esos periodos en específico, además de que en muchas de ellas no existieron valores del AOT en ninguno de los píxeles del polígono de selección o muy pocos, lo cual hacía que la media fuera calculada con tres o cuatro valores de un total de 25 posibles, por lo que estadísticamente no representaban datos sólidos, siendo que finalmente fueron considerados los valores presentados en la Tabla 15 como el conjunto definitivo de información para el área seleccionada en la ciudad de Hermosillo.

Fecha	AOT 660 nm						
2001-01-02	0.357143	2001-03-17	0.16212	2001-05-13	0.3687	2001-08-20	0.165667
2001-01-05	0.0875	2001-03-18	0.1906	2001-05-14	0.3635	2001-08-21	0.1945
2001-01-06	0.102333	2001-03-19	0.149889	2001-05-15	0.270375	2001-08-23	0.1422
2001-01-07	0.065667	2001-03-20	0.141	2001-05-16	0.206	2001-08-24	0.151913
2001-01-08	0.0442	2001-03-21	0.190167	2001-05-17	0.313	2001-08-25	0.277
2001-01-09	0.2364	2001-03-23	0.234875	2001-05-20	0.249143	2001-08-26	0.370333
2001-01-11	0.096947	2001-03-24	0.1925	2001-05-21	0.443	2001-08-27	0.421
2001-01-12	0.119722	2001-03-25	0.241	2001-05-22	0.304909	2001-08-28	0.307
2001-01-12	0.074833	2001-03-26	0.145611	2001-05-24	0.391	2001-08-29	0.16
2001-01-14	0.08412	2001-03-27	0.134	2001-05-25	0.21725	2001-08-30	0.376
2001-01-16	0.023786	2001-03-28	0.2375	2001-05-30	0.366	2001-08-31	0.1783
2001-01-18	0.12655	2001-03-29	0.1205	2001-05-31	0.331333	2001-09-02	0.1702
2001-01-21	0.098667	2001-03-30	0.276	2001-06-08	0.329	2001-09-02	0.2685
2001-01-23	0.125652	2001-04-01	0.370333	2001-06-09	0.5745	2001-09-04	0.201792
2001-01-24	0.051	2001-04-04	0.250083	2001-06-12	0.2026	2001-09-04	0.1439
2001-01-25	0.137667	2001-04-06	0.222	2001-06-13	0.653	2001-09-06	0.142909
2001-01-29	0.115909	2001-04-07	0.07625	2001-06-14	0.2291	2001-09-08	0.2694
2001-01-30	0.1932	2001-04-08	0.278667	2001-07-04	0.389111	2001-09-09	0.287667
2001-01-31	0.07375	2001-04-11	0.170813	2001-07-13	0.325333	2001-09-11	0.202714
2001-02-01	0.1634	2001-04-12	0.289	2001-07-14	0.268833	2001-09-13	0.177045
2001-02-03	0.14975	2001-04-13	0.337	2001-07-16	0.345111	2001-09-15	0.246
2001-02-06	0.084611	2001-04-14	0.143	2001-07-17	0.291182	2001-09-16	0.2982
2001-02-09	0.093	2001-04-15	0.3678	2001-07-18	0.332	2001-09-17	0.15336
2001-02-10	0.331	2001-04-17	0.472	2001-07-20	0.325667	2001-09-18	0.1362
2001-02-12	0.143143	2001-04-18	0.2392	2001-07-22	0.517	2001-09-19	0.144667
2001-02-15	0.117682	2001-04-21	0.197	2001-07-23	0.232176	2001-09-20	0.222174
2001-02-17	0.278375	2001-04-22	0.2519	2001-07-25	0.2268	2001-09-21	0.147
2001-02-19	0.181091	2001-04-23	0.121111	2001-07-27	0.472	2001-09-22	0.256333
2001-02-20	0.10412	2001-04-24	0.569	2001-07-30	0.1806	2001-09-25	0.157696
2001-02-21	0.137	2001-04-25	0.1662	2001-08-02	0.1335	2001-09-26	0.205
2001-02-26	0.267	2001-04-26	0.463	2001-08-03	0.333429	2001-09-27	0.24915
2001-03-02	0.1356	2001-04-27	0.218182	2001-08-05	0.201615	2001-09-28	0.114667
2001-03-03	0.129895	2001-04-28	0.299667	2001-08-07	0.2354	2001-10-02	0.2105
2001-03-04	0.275	2001-04-30	0.2045	2001-08-08	0.34536	2001-10-03	0.362667
2001-03-06	0.0631	2001-05-01	0.343333	2001-08-10	0.269286	2001-10-04	0.209
2001-03-08	0.107955	2001-05-04	0.324	2001-08-11	0.219	2001-10-05	0.1797
2001-03-09	0.140333	2001-05-06	0.250556	2001-08-13	0.018364	2001-10-06	0.16595
2001-03-12	0.665	2001-05-07	0.258	2001-08-15	0.197708	2001-10-07	0.081
2001-03-13	0.1055	2001-05-08	0.393	2001-08-16	0.204667	2001-10-08	0.178
2001-03-14	0.205917	2001-05-09	0.250286	2001-08-17	0.24	2001-10-10	0.127727
2001-03-15	0.144	2001-05-10	0.6335	2001-08-18	0.175538	2001-10-11	0.097083
2001-03-16	0.468	2001-05-11	0.412111	2001-08-19	0.207421	2001-10-12	0.07875
2001-10-13	0.090222	2001-12-13	0.108263	2002-03-06	0.158	2002-09-21	0.172524

Fecha	AOT 660 nm						
2001-10-14	0.0762	2001-12-16	0.101826	2002-03-08	0.179462	2002-09-22	0.151
2001-10-15	0.124588	2001-12-17	0.047667	2002-03-10	0.3735	2002-09-23	0.1284
2001-10-16	0.0762	2001-12-18	0.100737	2002-03-11	0.0958	2002-09-25	0.175
2001-10-17	0.1784	2001-12-19	0.025385	2002-03-12	0.18375	2002-09-27	0.212333
2001-10-18	0.081381	2001-12-20	0.116947	2002-03-13	0.129923	2002-09-28	0.22
2001-10-19	0.1008	2001-12-21	0.050429	2002-03-15	0.222615	2002-11-01	0.126533
2001-10-20	0.137833	2001-12-22	0.097143	2002-03-29	0.175643	2002-11-02	0.10275
2001-10-21	0.1523	2001-12-23	0.060143	2002-03-31	0.173	2002-11-03	0.125429
2001-10-23	0.0405	2001-12-24	0.06525	2002-03-31	0.235333	2002-11-04	0.048
2001-10-24	0.123333	2001-12-25	0.08965	2002-06-01	0.539474	2002-11-05	0.127667
2001-10-28	0.1615	2001-12-26	0.0252	2002-06-02	0.463	2002-11-06	0.082071
2001-10-29	0.129167	2001-12-27	0.115895	2002-06-03	0.302125	2002-11-07	0.1705
2001-10-30	0.1305	2001-12-29	0.117923	2002-06-05	0.362714	2002-11-08	0.114846
2001-10-31	0.149938	2001-12-30	0.068619	2002-06-07	0.675	2002-11-09	0.075667
2001-11-03	0.103083	2002-01-01	0.088105	2002-06-08	0.345778	2002-11-10	0.104067
2001-11-04	0.28575	2002-01-02	0.05975	2002-06-09	0.365	2002-11-12	0.1229
2001-11-06	0.193714	2002-01-03	0.148	2002-06-10	0.217889	2002-11-14	0.174833
2001-11-07	0.182737	2002-01-04	0.031	2002-06-12	0.390875	2002-11-15	0.072467
2001-11-08	0.112	2002-01-05	0.133684	2002-06-13	0.1925	2002-11-16	0.1355
2001-11-11	0.139231	2002-01-06	0.054333	2002-06-14	0.642	2002-11-17	0.146833
2001-11-12	0.091267	2002-01-07	0.085143	2002-06-15	0.3195	2002-11-18	0.198
2001-11-13	0.107	2002-01-08	0.081563	2002-06-16	0.739	2002-11-19	0.1354
2001-11-14	0.256667	2002-01-10	0.157421	2002-06-17	0.262231	2002-11-20	0.063
2001-11-15	0.047	2002-01-11	0.157	2002-06-18	0.35	2002-11-21	0.1569
2001-11-16	0.16315	2002-01-12	0.155056	2002-06-19	0.341333	2002-11-22	0.076105
2001-11-17	0.087	2002-01-13	0.065	2002-06-21	0.439333	2002-11-24	0.102944
2001-11-19	0.110375	2002-01-14	0.103556	2002-06-24	0.282125	2002-11-25	0.129
2001-11-20	0.1476	2002-01-16	0.097	2002-06-25	0.615	2002-11-27	0.147
2001-11-21	0.098	2002-01-17	0.098579	2002-06-26	0.428	2002-11-30	0.155333
2001-11-24	0.0774	2002-01-18	0.0905	2002-06-27	0.401	2002-12-03	0.133
2001-11-25	0.139846	2002-01-19	0.522	2002-06-30	0.674333	2002-12-04	0.072071
2001-11-27	0.1345	2002-01-20	0.025	2002-09-01	0.154	2002-12-07	0.151688
2001-11-28	0.097308	2002-01-21	0.1558	2002-09-02	0.404	2002-12-08	0.059467
2001-11-29	0.359	2002-01-22	0.066353	2002-09-03	0.303833	2002-12-09	0.1878
2001-11-30	0.1464	2002-01-23	0.1336	2002-09-04	0.264	2002-12-10	0.080917
2001-12-01	0.068889	2002-01-24	0.108824	2002-09-05	0.25728	2002-12-14	0.1268
2001-12-02	0.12005	2002-01-25	0.10625	2002-09-06	0.295	2002-12-14	0.12875
2001-12-03	0.022143	2002-01-26	0.131176	2002-09-09	0.396	2002-12-17	0.0788
2001-12-04	0.140846	2002-01-27	0.072	2002-09-11	0.264857	2002-12-18	0.148
2001-12-07	0.074	2002-03-01	0.5525	2002-09-12	0.157333	2002-12-19	0.081786
2001-12-08	0.079714	2002-03-03	0.173	2002-09-13	0.116	2002-12-20	0.08
2001-12-09	0.12095	2002-03-04	0.108353	2002-09-14	0.140957	2002-12-21	0.4
2001-12-10	0.07	2002-03-05	0.084	2002-09-16	0.258667	2002-12-24	0.0742
2002-12-26	0.093167	2003-07-08	0.106092	2003-09-15	0.02355	2003-10-30	0.155617

Fecha	AOT 660 nm						
2002-12-27	0.060333	2003-07-13	0.050352	2003-09-17	0.046735	2003-11-01	0.052175
2002-12-28	0.134182	2003-07-15	0.063517	2003-09-18	0.032685	2003-11-02	0.004986
2002-12-30	0.131	2003-07-17	0.139496	2003-09-19	0.098534	2003-11-04	0.025759
2003-04-01	0.028706	2003-07-18	0.064917	2003-09-20	0.037889	2003-11-05	0.029113
2003-04-03	0.058183	2003-07-19	0.004619	2003-09-21	0.096985	2003-11-06	0.04142
2003-04-05	0.064374	2003-07-20	0.064	2003-09-25	0.016559	2003-11-07	0.005
2003-04-08	0.024064	2003-07-24	0.090187	2003-09-26	0.035013	2003-11-08	0.050884
2003-04-10	0.043019	2003-07-26	0.083339	2003-09-27	0.009238	2003-11-09	0.018615
2003-04-15	0.00391	2003-07-28	0.089338	2003-09-28	0.077799	2003-11-15	0.059452
2003-04-17	0.087681	2003-07-29	0.046623	2003-09-30	0.081373	2003-11-17	0.047495
2003-04-19	0.066522	2003-08-02	0.0999	2003-10-01	0.036578	2003-11-18	0.014436
2003-04-21	0.085356	2003-08-04	0.199709	2003-10-02	0.062667	2003-11-19	0.041701
2003-04-24	0.035143	2003-08-07	0.052165	2003-10-03	0.039429	2003-11-20	0.019675
2003-04-26	0.02588	2003-08-08	0.012728	2003-10-04	0.047163	2003-11-21	0.022608
2003-04-28	0.118829	2003-08-09	0.065977	2003-10-05	0.015064	2003-11-22	0.033013
2003-05-01	0.103704	2003-08-14	0.020227	2003-10-11	0.023793	2003-11-23	0.02785
2003-05-05	0.061713	2003-08-16	0.044959	2003-10-12	0.029988	2003-11-24	0.048063
2003-05-07	0.101325	2003-08-20	0.161084	2003-10-13	0.008343	2003-11-25	0.014162
2003-05-10	0.038138	2003-08-22	0.005196	2003-10-14	0.062199	2003-11-26	0.051321
2003-05-12	0.050922	2003-08-24	0.036434	2003-10-16	0.071945	2003-11-27	0.018813
2003-05-14	0.14336	2003-08-25	0.014222	2003-10-17	0.019579	2003-11-28	0.051421
2003-05-15	0.024175	2003-08-26	0.050701	2003-10-18	0.035349	2003-11-29	0.023517
2003-05-16	0.149907	2003-08-27	0.173404	2003-10-19	0.034434	2003-11-30	0.012656
2003-05-17	0.032909	2003-08-29	0.389616	2003-10-20	0.019561	2003-12-01	0.037955
2003-05-19	0.052021	2003-08-30	0.024431	2003-10-21	0.047892	2003-12-04	0.01317
2003-05-21	0.081465	2003-08-31	0.065863	2003-10-22	0.0135	2003-12-06	0.052348
2003-05-26	0.045996	2003-09-01	0.07631	2003-10-23	0.060737	2003-12-10	0.042349
2003-05-30	0.123117	2003-09-02	0.001643	2003-10-24	0.016152	2003-12-11	0.010927
2003-07-01	0.117142	2003-09-03	0.147379	2003-10-25	0.040999	2003-12-12	0.043811
2003-07-02	0.010529	2003-09-06	0.017899	2003-10-26	0.04979	2003-12-13	0.021167
2003-07-04	0.016863	2003-09-07	0.112206	2003-10-27	0.009192	2003-12-15	0.047301
2003-07-05	0.027135	2003-09-12	0.075755	2003-10-28	0.02837	2003-12-26	0.042448
2003-07-06	0.057038	2003-09-14	0.107062	2003-10-29	0.10475	2003-12-29	0.008397

Tabla 15. Comportamiento temporal del AOT en el áreas de selección (50x50 km) sobre la ciudad de Hermosillo, 2001 – 2003.

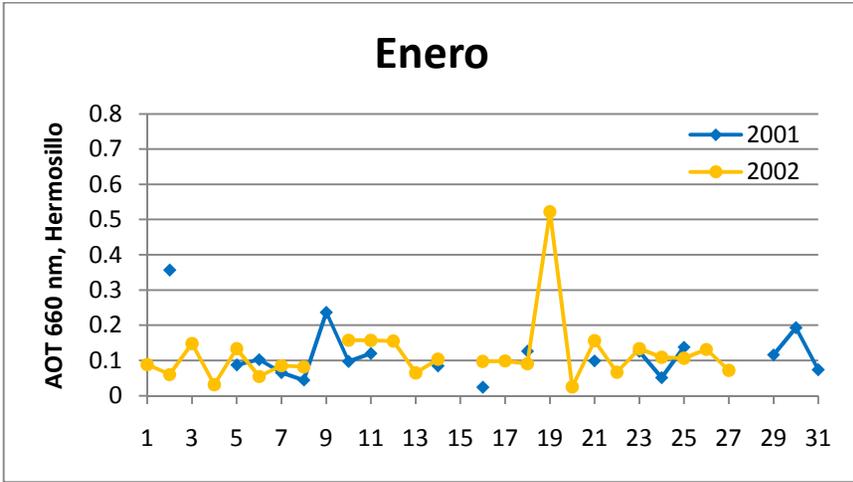
En la Tabla 15, se observa el comportamiento del AOT en la ciudad de Hermosillo en el periodo 2001 – 2003, presentando en cada año diferente disponibilidad de datos respecto a los conjuntos mensuales, sin embargo existen meses de los cuales se cuenta con valores en los tres años del periodo para ser comparados entre sí.

El año 2001, es el único que presenta mediciones en todos los meses, aunque con un conjunto de datos menor en el mes de junio, sin embargo, la gran disponibilidad de valores a lo largo de los doce meses resulta útil para efectos de comparación con los años 2002 y 2003.

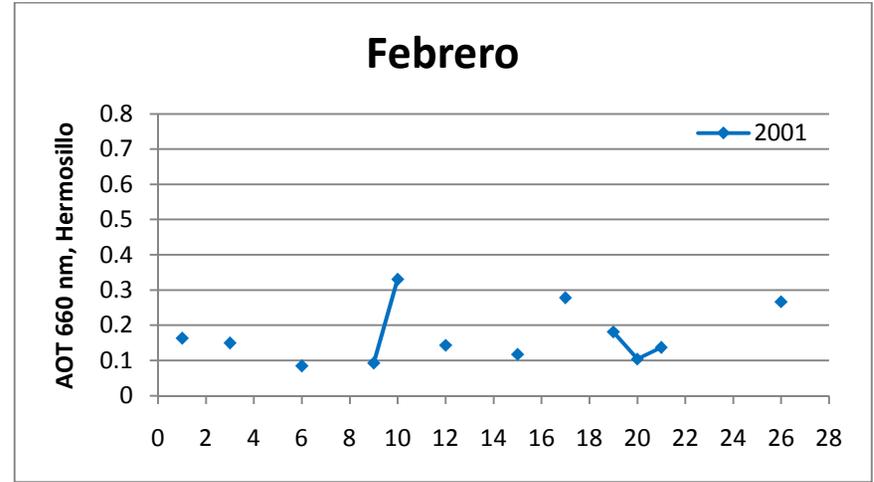
En el segundo año, sólo se cuenta con seis meses en los que existen valores por lo que el análisis de estos datos representa una mayor dificultad, sobre todo porque los vacíos mensuales amplios generan periodos de incertidumbre que no representan realmente el comportamiento del AOT en los meses con carencia de datos y además no otorgan una explicación evidente a los dos aumentos bruscos de los valores del espesor óptico que se presentan a lo largo del año.

En el año 2003, se presentan ocho meses con valores disponibles, observándose principalmente un pico muy pronunciado en el mes de septiembre y una recta generada por la falta de datos en el mes de junio que si bien indica que los valores finales del mes de mayo y los iniciales de julio son similares no denota de manera clara el comportamiento del AOT durante el sexto mes del año.

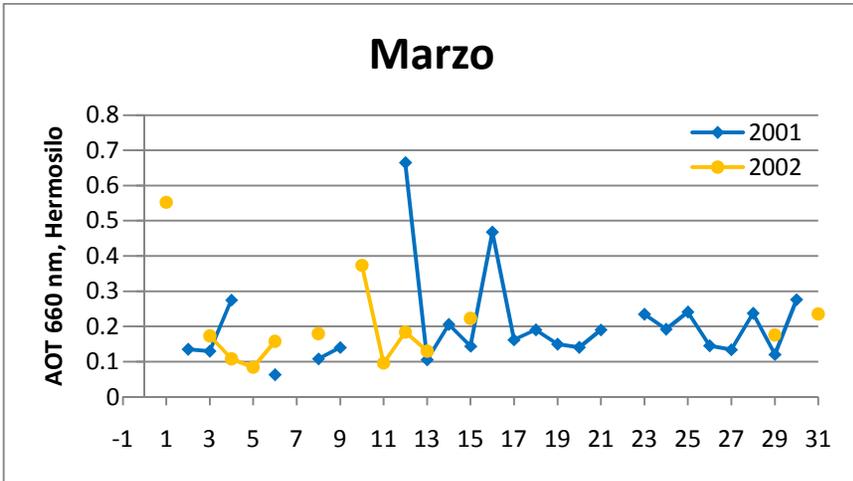
A continuación se presentan también los datos de las variaciones temporales del AOT durante periodos mensuales que además son comparados con los mismos lapsos dentro de los demás años del estudio en gráficas de dispersión en las cuales pueden observarse las fluctuaciones principales, la similitud de los valores en relación con los años en los que existen datos disponibles y el comportamiento del espesor óptico de acuerdo con la estacionalidad.



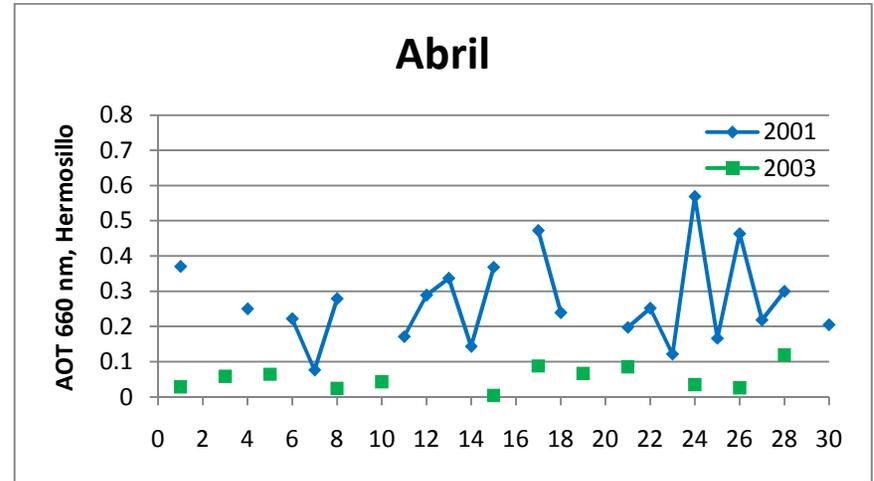
Gráfica 11. Variaciones en el comportamiento del AOT, Enero.



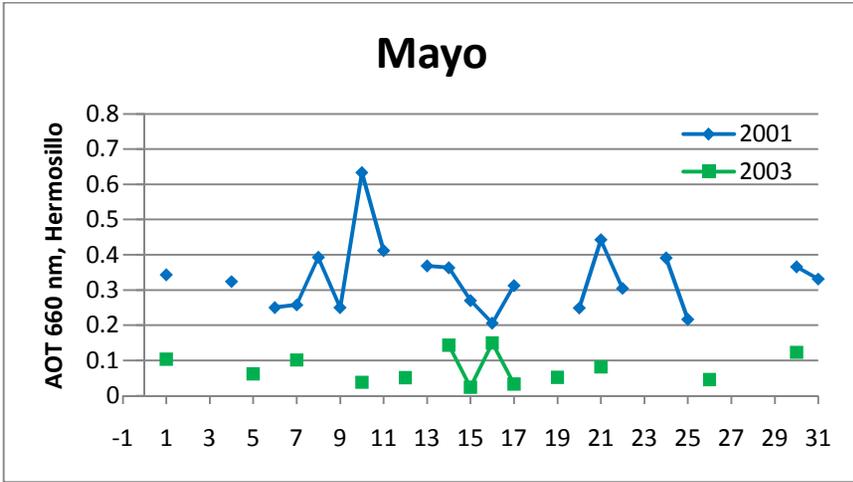
Gráfica 12. Variaciones en el comportamiento del AOT, Febrero.



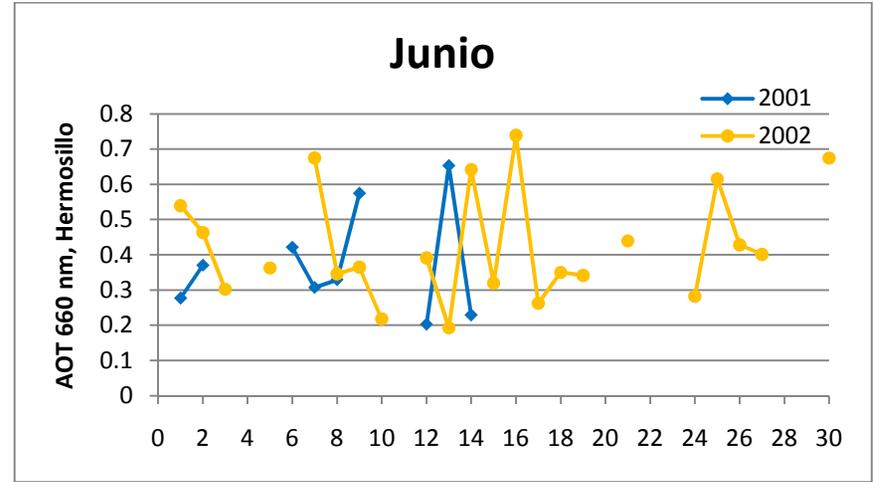
Gráfica 13. Variaciones en el comportamiento del AOT, Marzo.



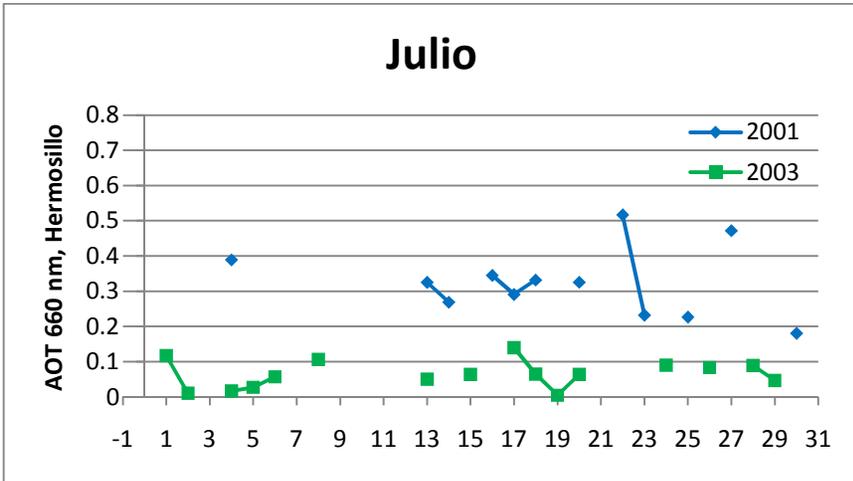
Gráfica 14. Variaciones en el comportamiento del AOT, Abril.



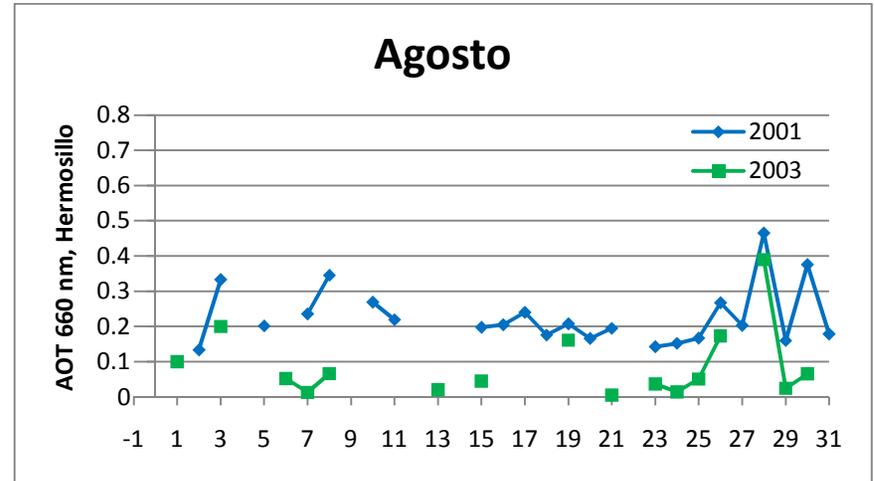
Gráfica 15. Variaciones en el comportamiento del AOT, Mayo.



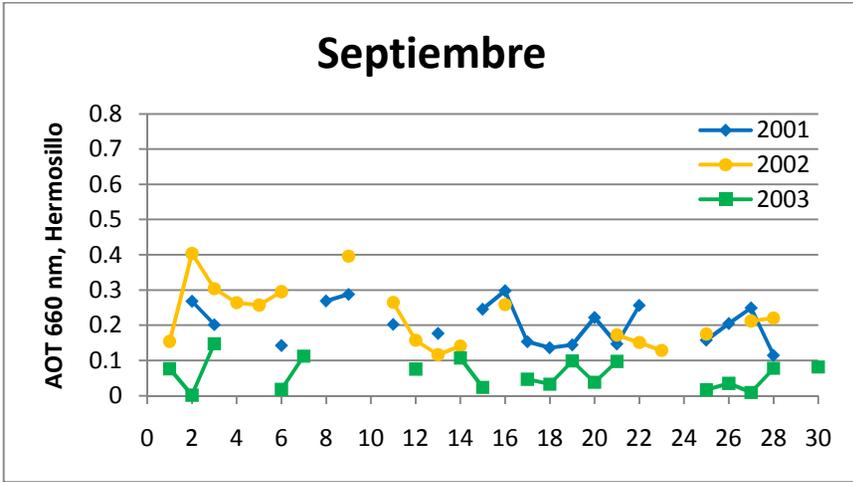
Gráfica 16. Variaciones en el comportamiento del AOT, Junio.



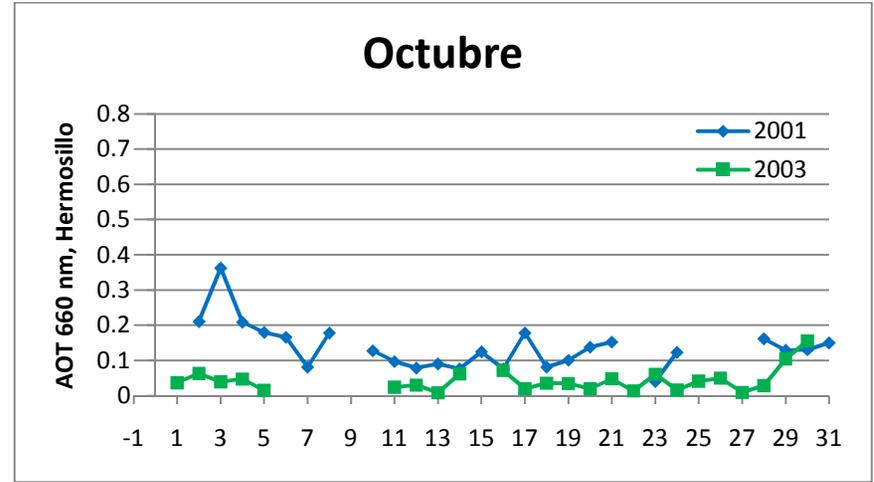
Gráfica 17. Variaciones en el comportamiento del AOT, Julio.



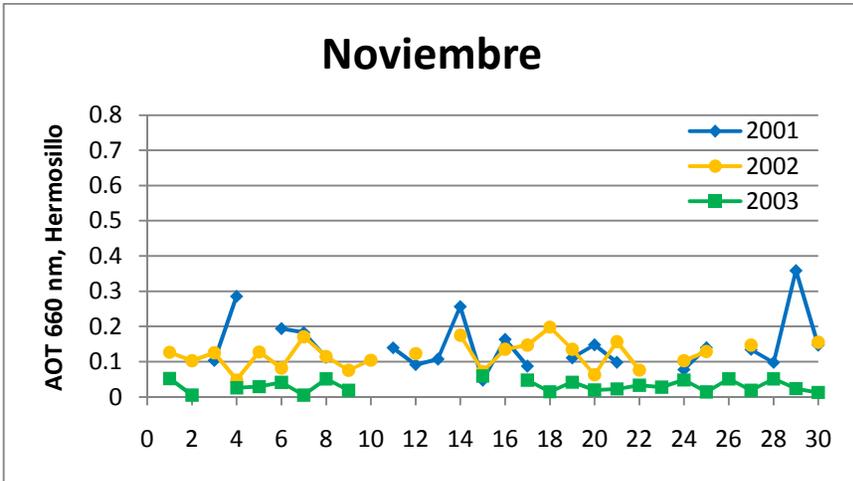
Gráfica 18. Variaciones en el comportamiento del AOT, Agosto.



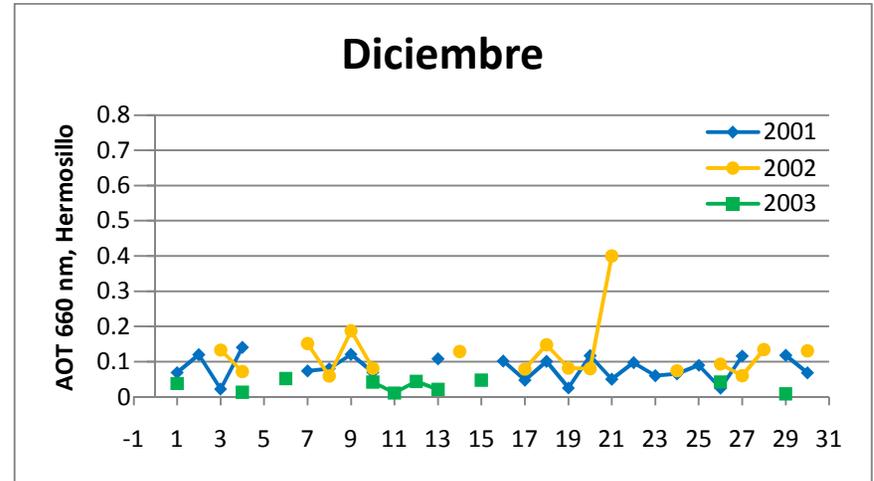
Gráfica 19. Variaciones en el comportamiento del AOT, Septiembre.



Gráfica 20. Variaciones en el comportamiento del AOT, Octubre.



Gráfica 21. Variaciones en el comportamiento del AOT, Noviembre.



Gráfica 22. Variaciones en el comportamiento del AOT, Diciembre.

Al interpretar los datos del comportamiento del AOT en el polígono de Hermosillo de enero a febrero en el periodo 2001 – 2003 (Gráfica 11 – 23), se observa que presentan diferentes crestas con valores mayores a 0.6 en los meses de marzo, abril y junio, los cuales de manera general presentan los datos del AOT más elevados, mientras que los meses con los valores más bajos son diciembre y enero, esto, muestra una disminución del espesor óptico en los meses más secos (Gráfica 1).

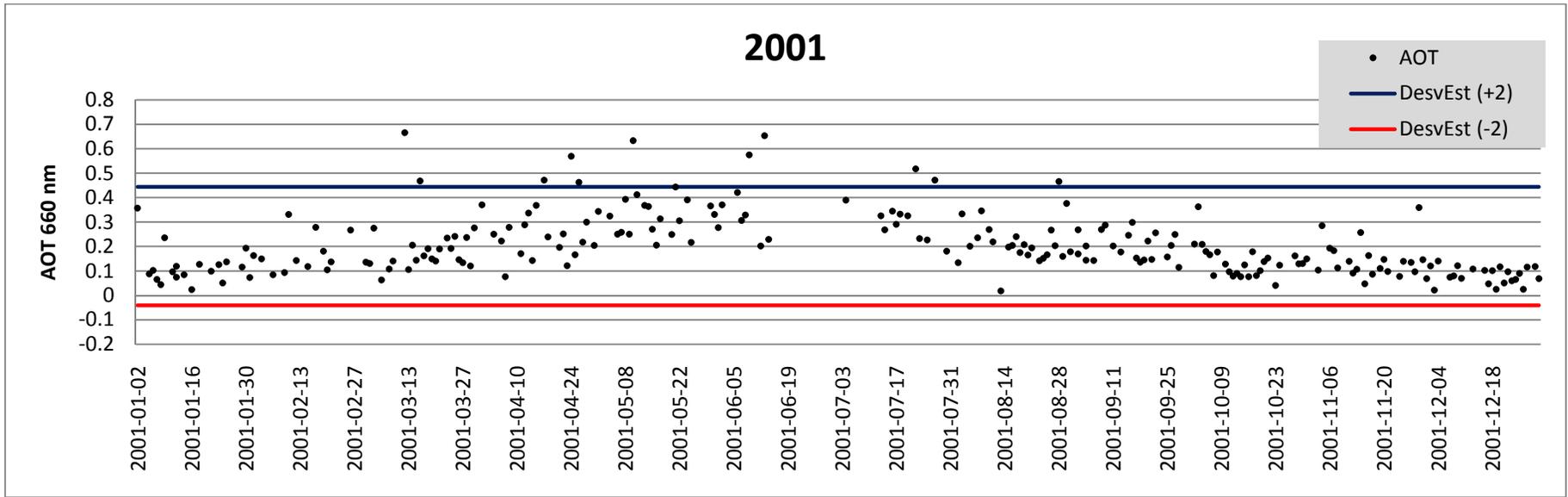
Este comportamiento visto de manera simple resulta abstracto, pero el análisis comparativo de los valores de los tres años del periodo intenta deducir patrones en la presencia de las partículas suspendidas o bien demostrar que no existe estacionalidad en las mediciones que explican el comportamiento del AOT y que son otros factores los que determinan la concentración de aerosoles en la atmósfera.

En el caso de las líneas correspondientes al comportamiento del AOT en el año 2002, a pesar de la poca disponibilidad de datos, denotan que la concentración de partículas atmosféricas es relativamente uniforme en periodos mensuales, a excepción de los meses de enero y diciembre en los que se observa un pico que difiere del patrón general del espesor óptico en esos lapsos.

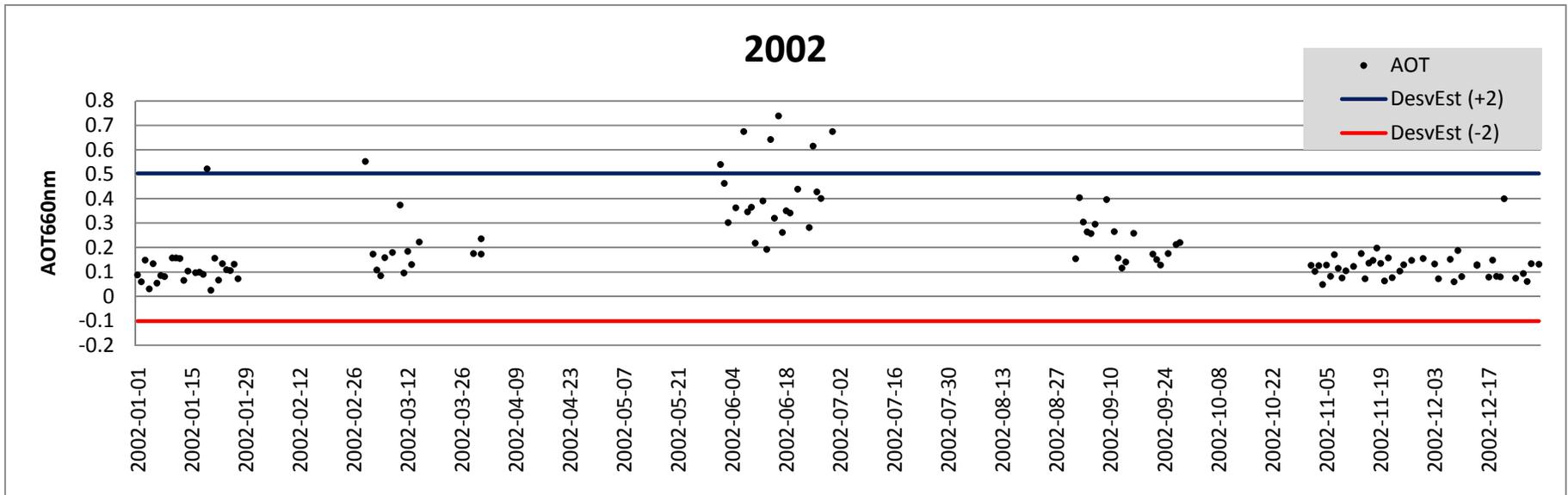
En el mes de junio de 2002, se observa un aumento muy brusco en los valores del AOT, el cual es difícil determinar si es el resultado de un incremento gradual durante la primera mitad del año, debido a que no existen datos de los meses de febrero, abril y mayo, además de que tampoco se puede comparar con las mediciones de los meses posteriores ya que éstos no presentan datos y no es posible inferir de manera directa si el espesor óptico manifiesta un comportamiento similar a una campana de ascenso y descenso a lo largo del año.

Para esto, es necesario analizar de manera general las líneas de los tres años en las gráficas para interpretar los datos en base a los meses que cuentan con valores y deducir el comportamiento en los meses en los que no existen mediciones.

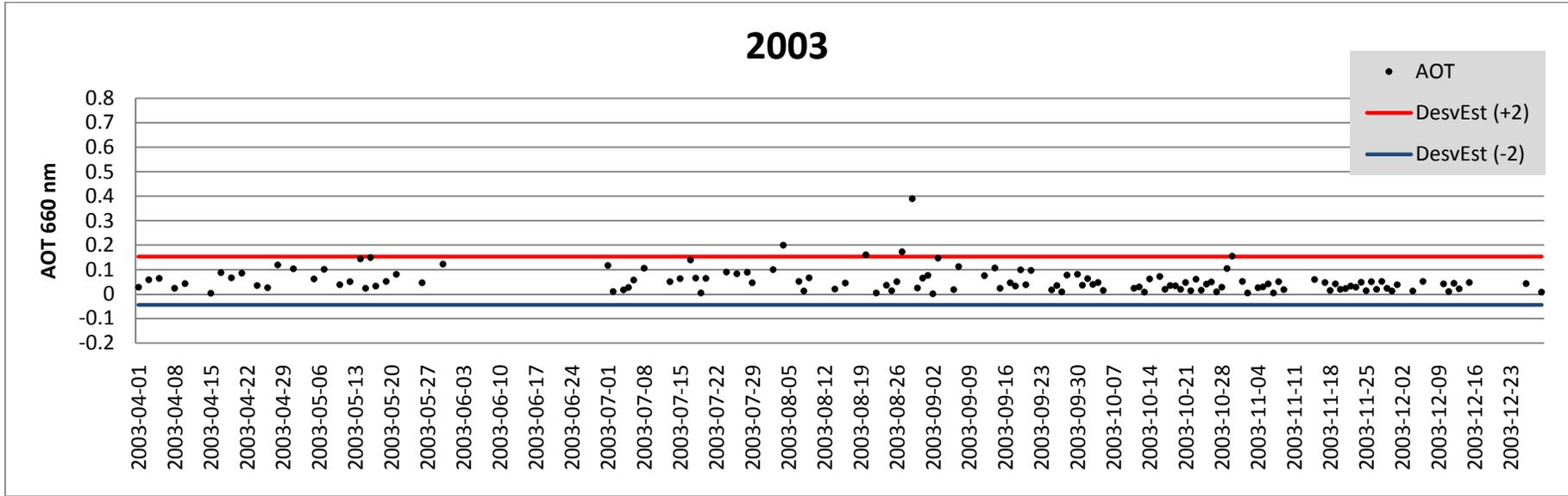
Por lo que se elaboraron también las gráficas de comportamiento anual para cada uno de los años en el período de estudio y la gráfica final en la que se observa de manera continua el comportamiento del espesor óptico al ser comparado directamente con años anteriores y posteriores con el objetivo de identificar la existencia de patrones de estacionalidad en la concentración de partículas Aerosoles el Noroeste de México y finalmente deducir en relación a las características de la región su posible origen.



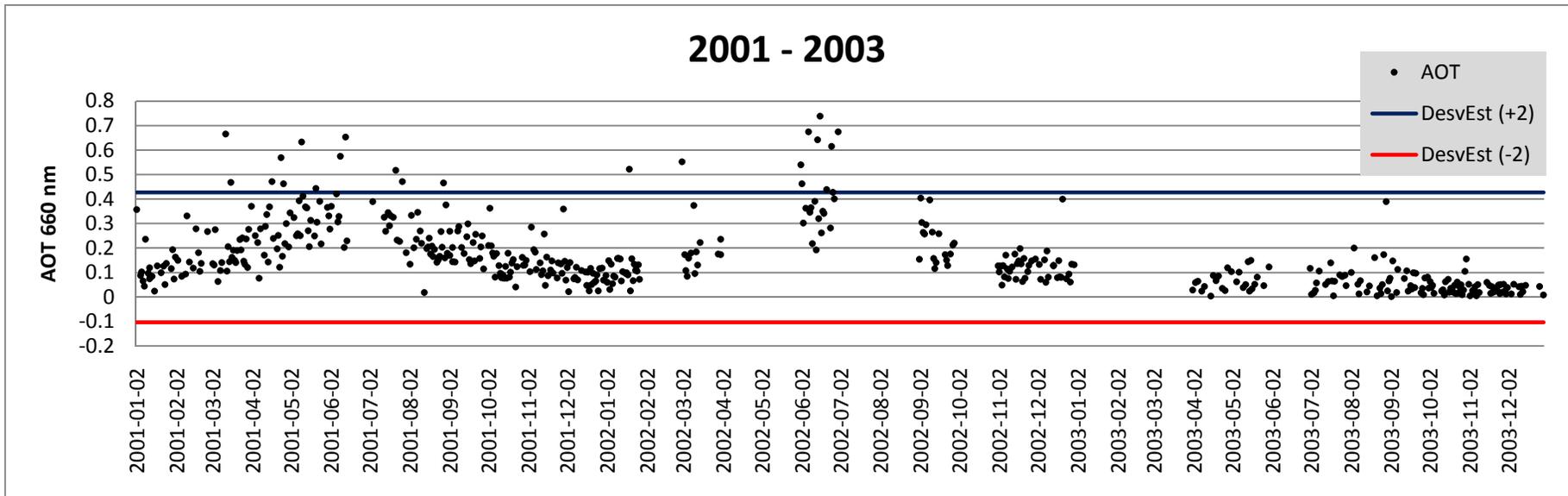
Gráfica 23. Comportamiento anual del AOT en Hermosillo, 2001.



Gráfica 24. Comportamiento anual del AOT en Hermosillo, 2002.



Gráfica 25. Comportamiento anual del AOT en Hermosillo, 2003.



Gráfica 26. Comportamiento general del AOT en Hermosillo, 2001 -2003.

Mediante la interpretación del comportamiento anual del AOT en los tres años (Gráfica 26), es evidente que el 2001 (Gráfica 23) y 2002 (Gráfica 24) presentan un comportamiento muy similar ya que se observa que los valores más altos corresponden al periodo entre los meses de junio y julio, con mediciones superiores a 0.5 unidades, mientras que los valores más bajos se presentan en los meses de noviembre, diciembre y enero en ambos casos, lo cual indica, en el caso de las mediciones con valores menores una concordancia con los meses de menor precipitación tanto en 2001 como en 2002.

Al igual que en el año anterior, en el 2002 tampoco se observa un comportamiento estacional del AOT durante todo el periodo en donde se presenten aumentos y descensos continuos de los valores del espesor óptico, pero se denota un patrón de ascenso y disminución de las mediciones en relación con el año 2001 que puede ser verificado a través el análisis de los datos del 2003 (Gráfica 25).

Es importante tomar en cuenta que los datos de 2002 (Gráfica 24) son escasos o inexistentes en algunos meses por lo que en este caso se deduce el comportamiento mediante la observación de los datos mensuales y el análisis en relación con los demás años para inferir tendencias del AOT durante todo el año, aunque el análisis conjunto del periodo de estudio completo es el que debe ser considerado para determinar si existen patrones en la concentración de partículas.

En el año 2003 (Gráfica 25), existen ocho meses con datos disponibles, excluyendo los primeros tres del año y junio, lo cual no permite analizar claramente el comportamiento del espesor óptico a lo largo de enero, febrero y marzo, además de que limita la comparación con junio en los años anteriores en los que hay disponibilidad de mediciones.

Al examinar también las gráficas mensuales, es notorio que el comportamiento en todos los meses presenta pocas variaciones en relación con la interpretación de los dos años anteriores, a excepción de agosto donde se observa un aumento drástico en relación con los valores de todo el mes y que después disminuye durante septiembre aunque éste último también es uno de los que presentan valores más altos del espesor óptico en relación con todo el año.

Además resulta interesante al comparar todos los meses con datos, que al igual que en los dos años anteriores los valores más altos del AOT se localizan en las gráficas después del primer tercio del año. También en el 2003 (Gráfica 25), se puede notar que de manera general, los valores del AOT son mucho más bajos al compararlos con los de los años 2001 y 2002, con mediciones que en su mayoría no rebasan 0.2 unidades a excepción de un pronunciado ascenso en septiembre. Igualmente

resulta lógico pensar que de acuerdo con la gráfica los primeros meses del año seguramente responden a un patrón de valores bajos del AOT, ya que en los últimos meses del año anterior las mediciones no fueron elevadas y no existe un ascenso brusco en la línea de la gráfica dentro de los primeros meses con datos en el 2003

Además de inferir que en el caso de junio, las variaciones de los valores del AOT no distan mucho del comportamiento real del espesor óptico debido a que los datos del mes anterior y posterior a éste son similares.

Finalmente, al comparar el comportamiento de AOT durante los tres años del periodo (Gráfica 26) es posible percatarse que si bien en las gráficas anuales no se observaba claramente un comportamiento cíclico de la concentración de partículas atmosféricas, al examinar todos los datos conjuntamente, es evidente un patrón estacional de ascenso y descenso en los valores del espesor óptico, en el que las mediciones más elevadas se presentan a partir del segundo tercio del año.

En el caso del 2001 y 2002, lo anterior se cumple al presentar los valores más altos en los meses de marzo y junio para ambos años con dos picos en sus respectivas gráficas, sin embargo el año 2003 difiere de este comportamiento y presenta los valores más elevados en los meses de agosto y septiembre, lo cual resultaría extraño si tomamos como referencia los años anteriores, sin embargo al examinar el comportamiento de la atmósfera éste último año (2003) es posible relacionar estas mediciones con la presencia de dos eventos ciclónicos de gran influencia en la región NO durante ese periodo.

De acuerdo con el Servicio Nacional de Huracanes de estados Unidos (National Hurricane Center, 2003a), en el año 2003, de manera atípica tocaron tierra en el noroeste de México los dos ciclones tropicales más fuertes de esa temporada, el primero de ellos, Ignacio, se convirtió en huracán el 26 de agosto y penetró en el golfo de Baja California con un movimiento lento el cual provocó fuertes precipitaciones, mientras que el segundo, Marty, empezó a desarrollarse el 10 de septiembre y alcanzó su máximo como huracán el día 22 del mismo mes (National Hurricane Center, 2003b).

Esto podría explicar parcialmente los elevados valores del AOT en esos meses debido a la presencia de gran número de núcleos higroscópicos en las grandes formaciones nubosas debidas a los eventos ciclónicos y que atenúan el paso de la radiación solar hacia la superficie terrestre como consecuencia de la alta concentración de partículas suspendidas.

Además como parte del discernimiento de los factores que generan estas variaciones, se analizaron los registros disponibles acerca de la ocurrencia del fenómeno del niño (El Niño Oscilación del Sur) que se presenta en las aguas del océano pacífico para identificar la posible relación de este con los valores del espesor óptico obtenido a través de la elaboración de las gráficas de comportamiento temporal.

En el caso del año 2002, en donde se presentan los máximos en el espesor óptico durante todo el periodo de estudio, es posible que el aumento en el umbral de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ en las temperaturas medias del océano generadas por el fenómeno del Niño (NOAA, 2010) favoreciera la formación de combustible natural por efecto de las altas temperaturas durante la época de secas para ser incorporado más tarde a la atmósfera en forma de partículas suspendidas que favorecen la formación de nubes durante los meses de verano en los que la región está bajo la influencia del monzón mexicano, aunque al considerarse sólo tres años en este trabajo no es posible afirmar una relación directa, ya que habrían de considerarse otros años con presencia de Niño y sus respectivas variaciones espacio-temporales en el AOT para validar esta hipótesis.

También es notable que a lo largo de los tres años los meses con valores menores del espesor óptico son los más secos que corresponden a diciembre y enero en 2001 y 2002, mientras que en el caso del año 2003, el mes de diciembre es el de valores más bajos y aún cuando no se cuenta con datos de Enero para este periodo, la gráfica de comportamiento de los tres años indica que en cada uno de éstos, los meses mencionados presentan las mismas características en cuanto a su concentración de partículas en la atmósfera.

4.2.2 Análisis Espacial

Además del análisis temporal del espesor óptico en el noroeste es posible también comparar periodos similares en años distintos por medio de las imágenes digitales procesadas con los datos del sensor MODIS, ya que éstas, una vez validadas con los datos de la ciudad de Hermosillo pueden ser utilizadas para la adquisición de datos del espesor óptico en toda el área de cobertura de las tomas del sensor.

Para la selección de las imágenes representativas del espesor óptico en el noroeste, se seleccionó la mediana de los datos en periodos mensuales obtenidos en la ciudad de Hermosillo para determinar el día que se muestra de mejor manera la distribución del AOT en la zona de estudio, todo esto,

tomando en consideración la disponibilidad de las imágenes que no es completa en todos los meses de los tres años del periodo y esto generaría que al usar otro parámetro como las medias mensuales como referencia, los datos utilizados para seleccionar la imagen adecuada estuvieran en periodos muy cercanos y no mostrarán el comportamiento de manera general en el mes sino en un determinado lapso intermensual para algunos casos.

En la elaboración de los mapas del espesor óptico, los parámetros de representación cartográfica de las imágenes fueron elegidos de manera independiente a algún código preestablecido, ya que en la elaboración de cartografía temática, la información contenida en el mapa está relacionada fundamentalmente con el perfil del autor, lo cual incluye el nivel de información del fenómeno y las actitudes hacia este, además de que se da por entendido que en toda imagen cartográfica, la realidad es interpretada y generalizada (Franco Mass y Valdez Pérez, 2003)

Con la elaboración de los mapas basados en la información contenida en las imágenes, finalmente se muestran las variaciones de la concentración de partículas aerosoles no sólo en el tiempo dentro del polígono de 2500 km² trazado sobre la ciudad de Hermosillo, sino también en el espacio para todo el noroeste de México, además de información expuesta en las imágenes realizadas con el producto “Tipo de Aerosol” de MODIS para conocer la génesis de las partículas en cada mapa.

En las imágenes que se presentan en este inciso (Figuras 27 – 52), se observa el comportamiento del espesor óptico en toda la región noroeste de México, además de que a través del análisis de las mismas, es posible no sólo interpretar los patrones en la concentración de partículas aerosoles sino que además se observa la distribución de las mismas, principalmente en el estado de Sonora que es representado en todas los mapas finales.

Estos mapas, en relación con el trabajo de correlación realizado previamente con las mediciones del fotómetro de la red AERONET en la ciudad de Hermosillo, representan datos validos para todas las zonas de México y parte de los Estados Unidos que aparecen representadas en los mapas finales y que coinciden con la zona de cobertura de cada imagen tomada por el sensor MODIS en diferentes días, no sólo por la validación realizada sino por la relación observada entre el comportamiento de las gráficas anteriores y los valores representados en los mapas.

En el 2001 (Figuras 27 – 38), a través del análisis de los mapas de todos los meses del año, es notorio un aumento gradual que alcanza su máximo en el mes de julio (Figura 33) y después decrece

paulatinamente hasta diciembre (Figura 38) en el que al igual que enero (Figura 27), se presentan los valores más bajos de espesor óptico para toda la región.

Durante el año 2002 (Figuras 39 – 44), aún cuando no se cuenta con mapas de todos los meses, es posible identificar un patrón similar de ascenso y descenso al del año anterior, presentándose los valores más elevados en el mes de junio (Figura 41), donde de acuerdo con la imagen mensual, se presenta un incremento brusco del AOT en relación con la información disponible de la primera mitad del año.

En el mismo año, después del valor máximo observado en junio (Figura 41), es evidente una disminución del espesor óptico, ya que incluso con la falta de mapas para todos los meses del segundo periodo de 2002, las imágenes de septiembre, noviembre y diciembre (Figuras 42 - 44), ejemplifican claramente un descenso gradual entre cada una de estas, lo que supone que este patrón concuerda con el comportamiento del AOT en los meses en los que no hay datos disponibles.

En el 2003 (Figuras 45 – 52), mediante la interpretación de las imágenes se puede concluir que aunque no se cuenta con mapas de los tres primeros meses de año, existe un aumento en los valores del espesor óptico a partir de abril (Figura 45), alcanzando de nuevo y al igual que en los dos años anteriores su máximo en entre los meses de junio y julio (Figura 47), pero en este caso presentando un segundo incremento en agosto y septiembre (Figuras 48 – 49).

De manera general los valores más elevados (> 0.5) se localizan porción noroeste de Sonora, cerca del desierto de Altar y la costa norte del estado como se observa en las figuras 27, 28, 29, 31, 32, 33, 35, 40, 41, 45, 46 y 49; aunque en el caso de los demás mapas es posible suponer una distribución similar aún cuando las imágenes no proporcionen datos de esa zona. Estos valores posiblemente están relacionados con las condiciones áridas del lugar, ya que la escasa vegetación y la presencia del desierto facilitan la incorporación de partículas a la atmósfera que finalmente son registradas por el sensor MODIS.

De igual modo, en relación a las variaciones temporales, se identifican los valores cercanos a 1.0 o mayores en el NO del estado durante los meses de julio, 2001 (Figura 33), junio, 2002 (Figura 41), mayo, 2003 (Figura 46) y junio, 2003 (Figura 47), lo que supone la existencia de un comportamiento estacional entre la temporada de lluvias y secas, ya que en base al análisis de los mapas finales referentes a los valores del espesor óptico en el noroeste de México es posible deducir que existe un patrón en el comportamiento anual de este, presentando los valores más elevados en los meses de

junio y julio para los tres años y los más bajos en los meses de diciembre y enero para el periodo 2001 - 2003, además de que se observa que existen un concordancia temporal entre los meses con mayor AOT y los de más precipitación en la región noroeste (Gráfica 1), lo que cobra sentido si se considera que la presencia de aerosoles en la atmósfera facilita la formación de núcleos higroscópicos necesarios para la condensación de la humedad proveniente del océano (Iqbal, 1983).

El patrón de comportamiento de incremento y disminución del AOT a lo largo de la primera y segunda mitad del año respectivamente, se presenta claramente en los años 2001 y 2002, mientras que en 2003, se observa tanto en las gráficas como en las imágenes, un segundo pico en la concentración de aerosoles (Figura 48 – 49), principalmente en la porción cercana al litoral del golfo de Baja California, el desierto de Altar y el centro de la península, el cual puede estar relacionado con la presencia de los dos de los eventos ciclónicos más fuertes de la temporada de huracanes de ese año mencionados en el inciso anterior, que fueron los ciclones Ignacio y Marty (National Hurricane Center, 2003a; National Hurricane Center, 2003b), mientras que en el mes de octubre (Figura 50), después del paso de ambos huracanes, se observa el restablecimiento del patrón de comportamiento presentado en los dos años anteriores con un decremento en los valores del AOT hacia el mes de diciembre (Figura 52).

Además de tomar en cuenta que los periodos con mayor precipitación, concuerdan con los meses de verano y los meses de otoño (año 2003) en los que se sabe que la precipitación es mayor en la región noroeste de México debido también a la entrada de humedad en el continente relacionada con el Monzón Mexicano o Monzón del Suroeste de Norteamérica (Reyes et al., 1994).

En el caso de la península de Baja California, durante todo el periodo de estudio, se identifican los valores más altos (0.5 - 1.0 y mayores), en los meses de mayo, junio, julio y agosto de 2001, junio de 2002, abril, mayo y julio de 2003 (Figuras 31, 32, 33, 34, 41, 45, 46, 47 respectivamente). Se observa de manera general que la península presenta valores más elevados durante todo el periodo, a diferencia de la parte continental de la región noroeste, esto posiblemente relacionado con estrecha extensión territorial de esta provincia fisiográfica en dirección este-oeste, lo que favorece la influencia de aerosoles de origen marino en toda la península y que se ve reflejada en las mediciones realizadas por el sensor y las imágenes procesadas.

También mediante el análisis de los histogramas de cada imagen y después de haber identificado las zonas con mayor concentración de partículas en toda la región y los patrones estacionales que éstas presentan, se puede notar que las imágenes con mayor concentración píxeles se localiza en los

rangos más bajos (0.00 – 0.24 y 0.25 – 0.99) durante los meses de enero, febrero, marzo y abril de 2001 (Figuras 27 –30), incrementándose a partir de mayo (Figura 31) y hasta el mes de julio (Figura 33) en los que aumentan los píxeles referentes a las clases o rangos entre 0.5 – 0.99, para después disminuir a partir de agosto y hasta diciembre del mismo año (Figuras 34 – 38).

Este comportamiento se repite de igual manera en los años siguientes abordados en el estudio, en donde también se presenta la mayor concentración de píxeles menores a 0.49 en los primeros y últimos meses de cada año, mientras la mayor presencia de valores superiores a 0.5 en relación con el total de píxeles existentes en las imágenes se presentan en los meses de junio, 2002 (Figura 41), mayo, 2003 (Figura 46) y julio, 2003 (Figura 47).

En relación a estos histogramas, se debe tomaren cuenta que su análisis es relativo, debido a que la cantidad y ubicación de los píxeles con valor no es uniforme en todas las imágenes, además de que la zona de cobertura es distinta para cada una de ellas, aunque el comportamiento observado se corresponde con los criterios ya expuestos y reafirma el patrón identificado en las variaciones espacio-temporales del AOT.

Dentro de cada mapa presentado, también se anexa un inserto relacionado con el tipo de aerosol predominante en la atmósfera, el cual fue obtenido de del procesamiento de la banda MODIS referente a ese parámetro y en los cuales es notoria una gran predominancia de aerosoles de sulfato sobre los otros tipos presentes en las imágenes en el noroeste de México, no identificándose una relación directa del tipo de aerosol con la concentración de partículas expresadas por los valores del AOT.

Aunque resulta interesante, observar que los aerosoles asociados a polvo, se localizan generalmente al norte de los estados de Chihuahua, Coahuila y Nuevo León, así como en el sur de los Estados Unidos correspondiente con esta zona fronteriza como se muestra en las figuras 27, 31, 33, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 51 y 52, mientras que en los mapas restantes aún cuando no se cuenta con valores en los píxeles del área mencionada es de suponerse que la presencia de este tipo de aerosol es contante en esa zona.

El tercer tipo de aerosol mencionado, humo de gran absorción, si bien no se identifica sobre el noroeste de México, gracias a la cobertura de algunas imágenes y a la disponibilidad de información de este parámetro es posible determinar su concentración en toda la zona costera del norte del Golfo de México en donde probablemente sea la actividad petrolera la que incida en la emisión de

partículas a la atmósfera (Figuras 32, 34, 37 y 42) de un origen distinto a las que se observan en la mayor parte de las imágenes.

También se identifica la presencia de este tercer tipo de aerosol en la cuenca baja del río Mississippi y principalmente en la región agrícola de Estados Unidos (Figuras 38, 48, 50, 51) desde el estado de Illinois hasta la frontera con México en el estado de Texas.

Mientras que en la región noroeste de México que es donde se enfoca el trabajo, no se observa presencia de este último tipo de partículas en ninguna de las imágenes, además de que tampoco se identifica la concentración de aerosoles asociados al polvo en ningún área en particular a diferencia de los aerosoles de sulfato que se localizan de manera general en la región dentro de todas las imágenes presentadas.

Por otro lado, los mapas también ofrecen la oportunidad de analizar la distribución de los valores altos y bajos del AOT en la región noroeste, observándose en todas las imágenes que los datos más elevados se presentan principalmente en las porciones cercanas al litoral del golfo de Baja California y disminuyen en la región interior del estado de Sonora, incrementándose de nuevo pero en menor medida que la costa, en la vertiente exterior de la Sierra Madre Occidental, en la que también la presencia de la vegetación natural propia de esa provincia fisiográfica propicia la emisión de biomasa a la atmósfera en mayor cantidad que las áreas localizadas en el centro de la entidad.

Además de ser notorio que en la mayoría de los mapas presentados, los valores más altos del AOT se ubican al norte del paralelo 30°, lo cual posiblemente esté relacionado con el transporte de partículas provenientes de las zonas áridas del suroeste de los Estados Unidos bajo la influencia aún en esas latitudes de los vientos alisios, aunque debe tomarse en cuenta la influencia de los vientos Santa Ana en el noroeste de México puede explicar la concentración siempre más elevada de partículas suspendidas en la península de Baja California y la franja litoral del estado de Sonora y Sinaloa aún cuando no se observa una influencia general de éstos en las variaciones espacio-temporales del AOT para toda la región ya que el periodo de octubre a marzo cuando los vientos Santa Ana se presentan no corresponde con los meses de mayor incremento en el espesor óptico.

Como parte del análisis de las imágenes del AOT, también se realizó la identificación de imágenes satelitales de puntos de calor proporcionadas por CONABIO para determinar si en los años del periodo, la presencia de incendios forestales actúa de manera activa en la concentración de partículas en la atmósfera, sin embargo no se encontró una relación directa ya que del conjunto de

las imágenes analizadas se identifica que la mayor concentración de puntos de calor está asociados a incendios en la zona central y sur del país en las regiones de climas tropicales con abundante vegetación, características que contrastan con los elementos físicos que existen de manera general en la región noroeste de México, por lo que si bien resulta conveniente tomar en cuenta la presencia de estos eventos, no se considera que tengan una ponderación mayor sobre los ya expuestos.

Finalmente, a través de la comparación en el comportamiento del espesor óptico a lo largo los tres años se observa que durante el periodo de estudio no se presentó un incremento gradual de la concentración de partículas en la atmósfera, ya que de acuerdo con las gráficas de variación temporal del AOT, el año 2003 (Gráfica 27), de manera general, presenta valores que se encuentran por debajo de la media de los dos años anteriores, esto pese a lo que se podría esperar si se relacionará con la expansión crónica de las áreas urbanas en todo el país y por consiguiente con el aumento de las emisiones de aerosoles de origen antropogénico.

Sin embargo en base a los criterios presentados en este inciso relacionados con el análisis de los mapas finales, los histogramas de cada uno de éstos y las gráficas de comportamiento del AOT, se refuerza la identificación de un patrón estacional en el comportamiento del espesor óptico en el noroeste de México durante el periodo 2001 – 2003 que puede ser también influenciado por la ocurrencia de fenómenos extraordinarios a lo largo de cada año pero que de manera general no presenta cambios significativos en la tendencia observada de las variaciones espacio-temporales.

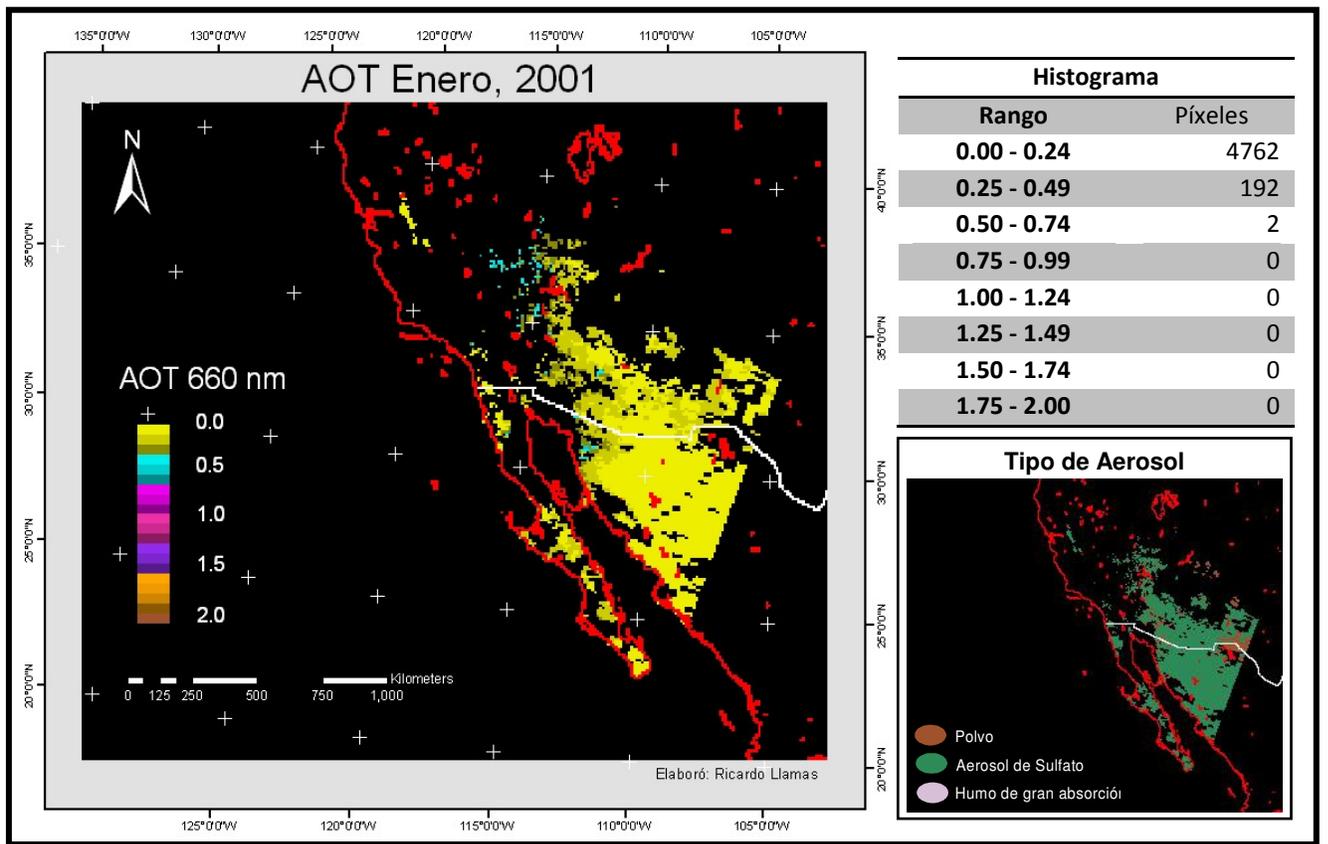


Figura 27. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Enero, 2001.

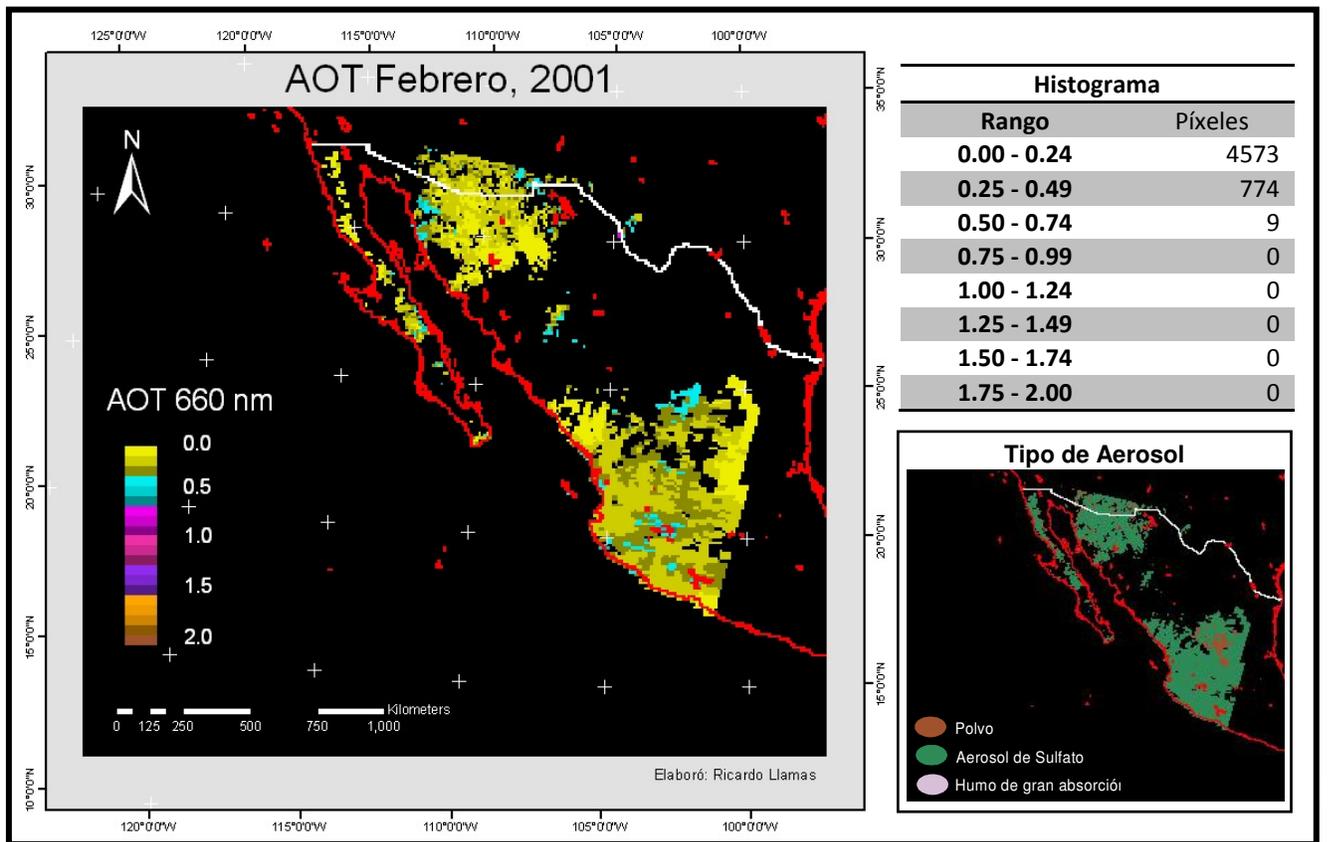


Figura 28. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Febrero, 2001.

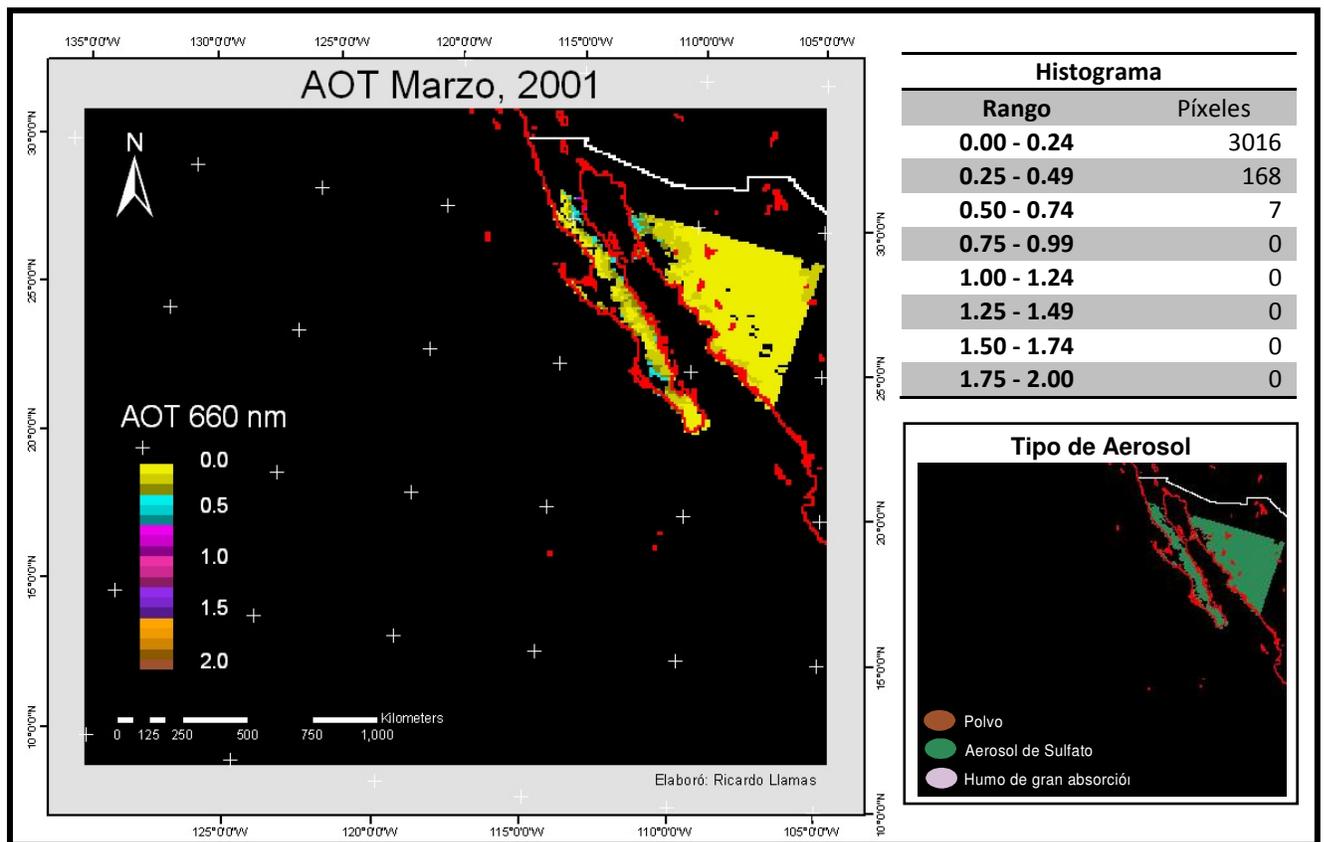


Figura 29. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Marzo, 2001.

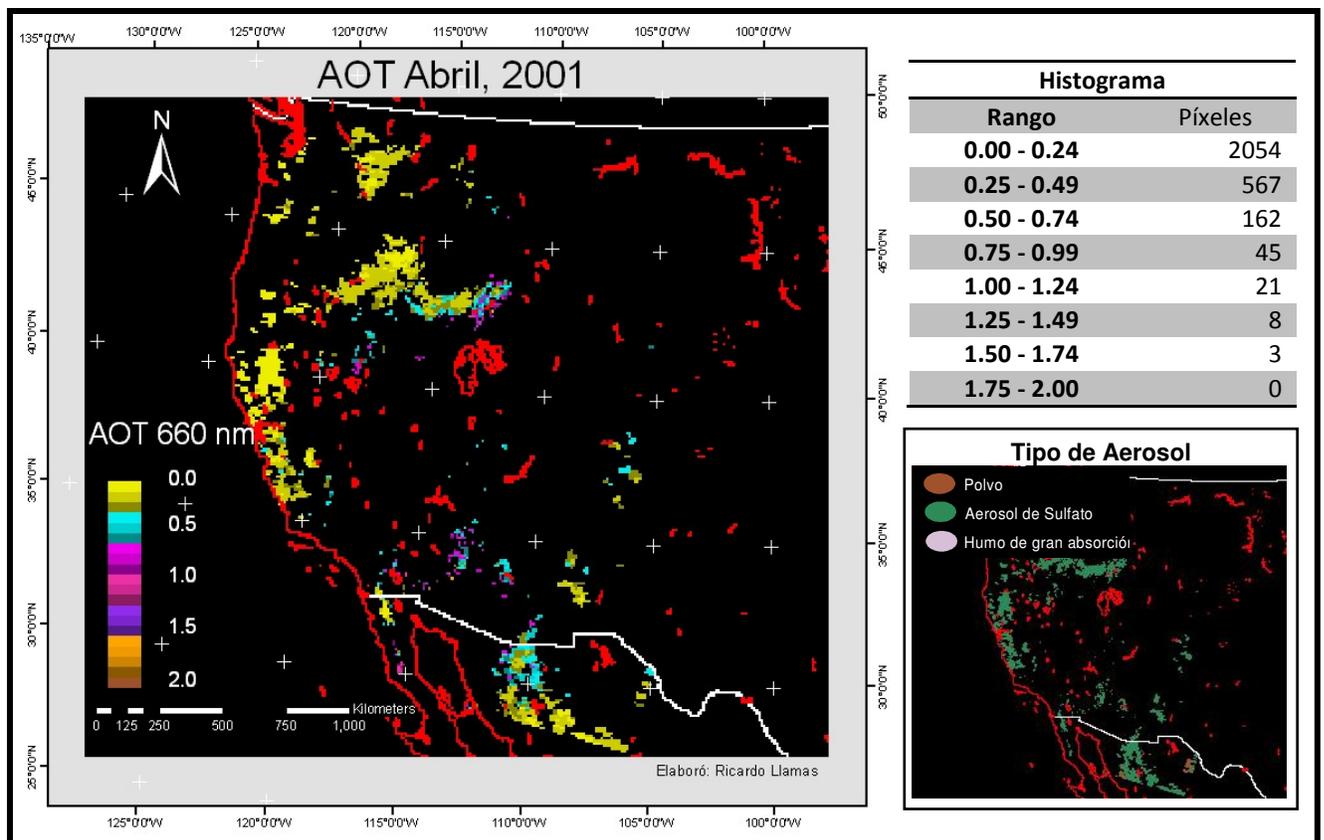


Figura 30. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Abril, 2001.

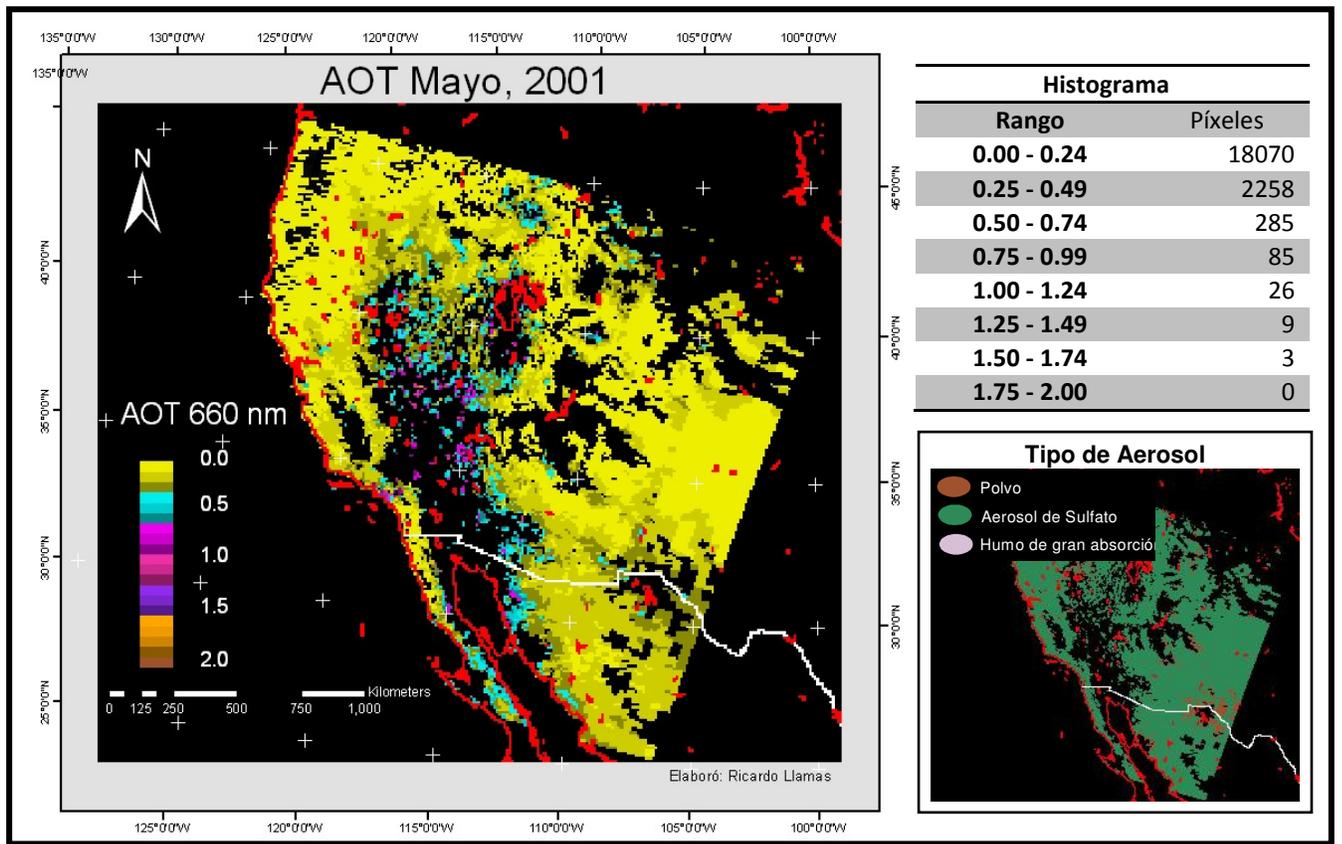


Figura 31. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Mayo, 2001.

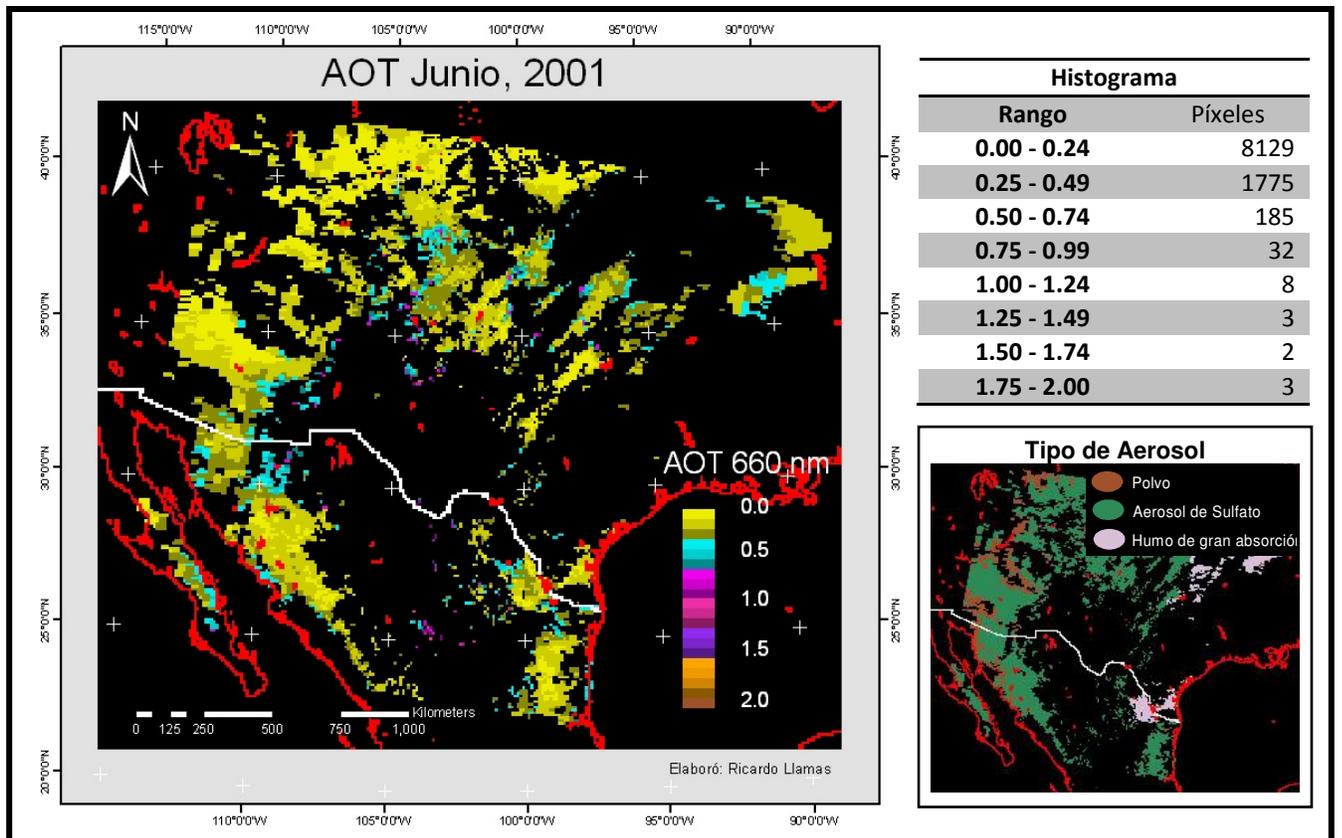


Figura 32. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Junio, 2001.

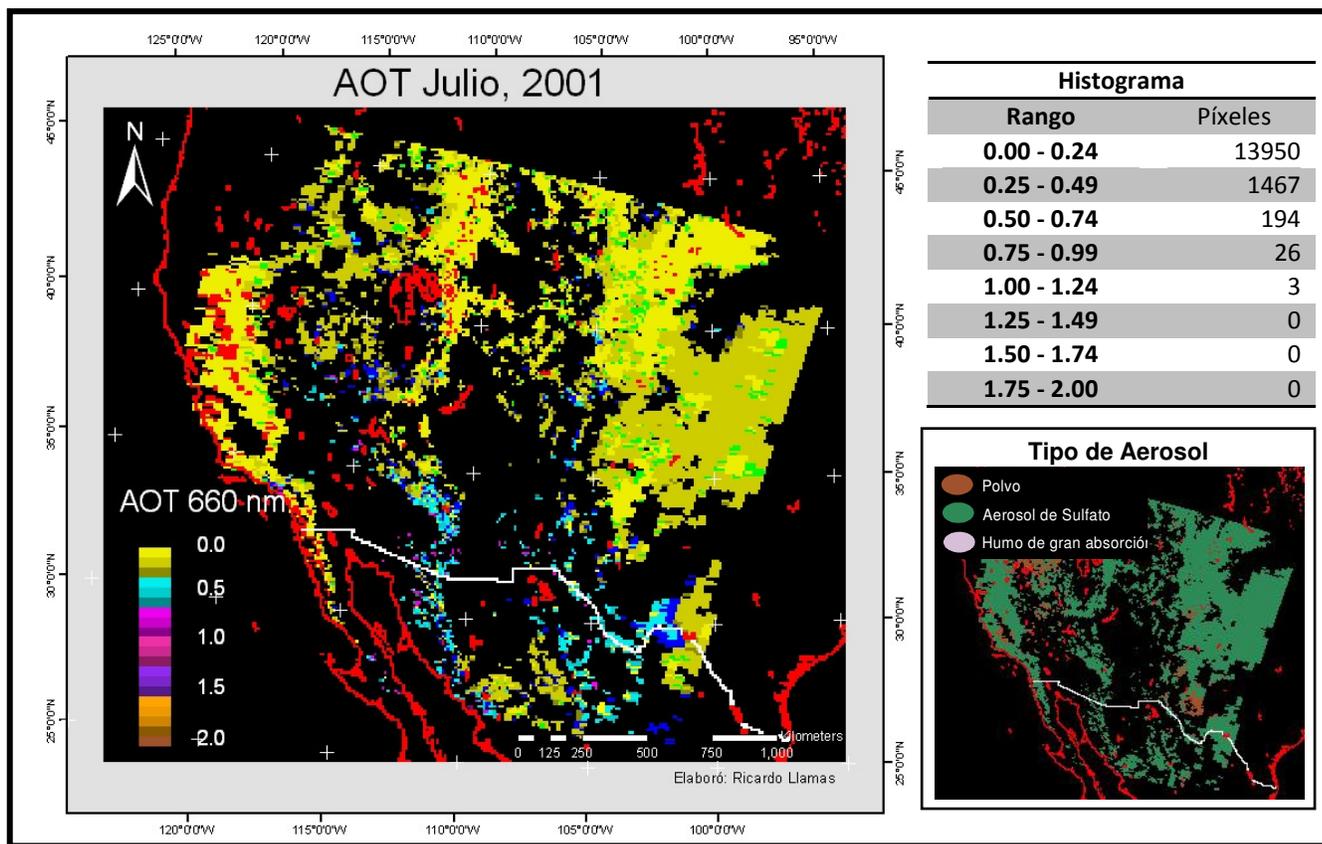


Figura 33. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Julio, 2001.

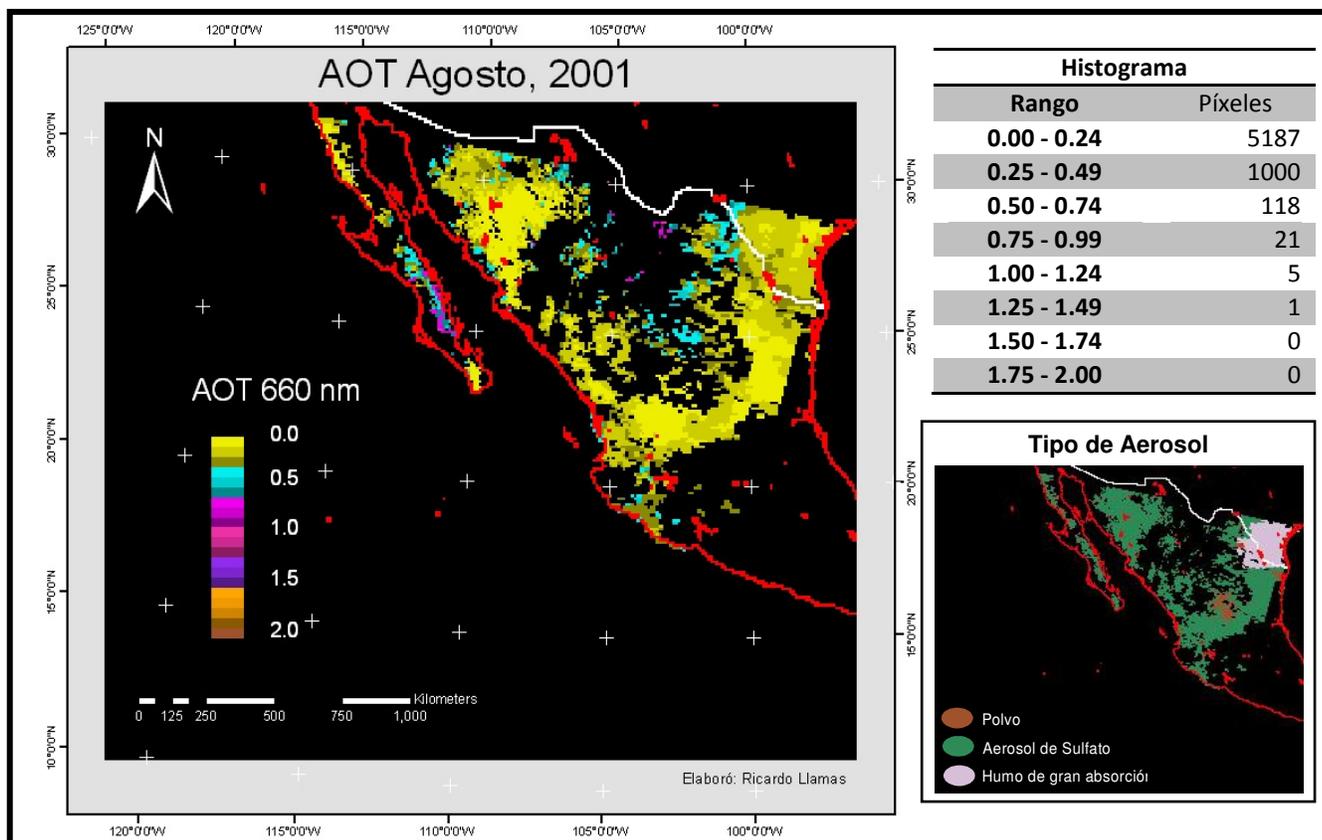


Figura 34. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Agosto, 2001.

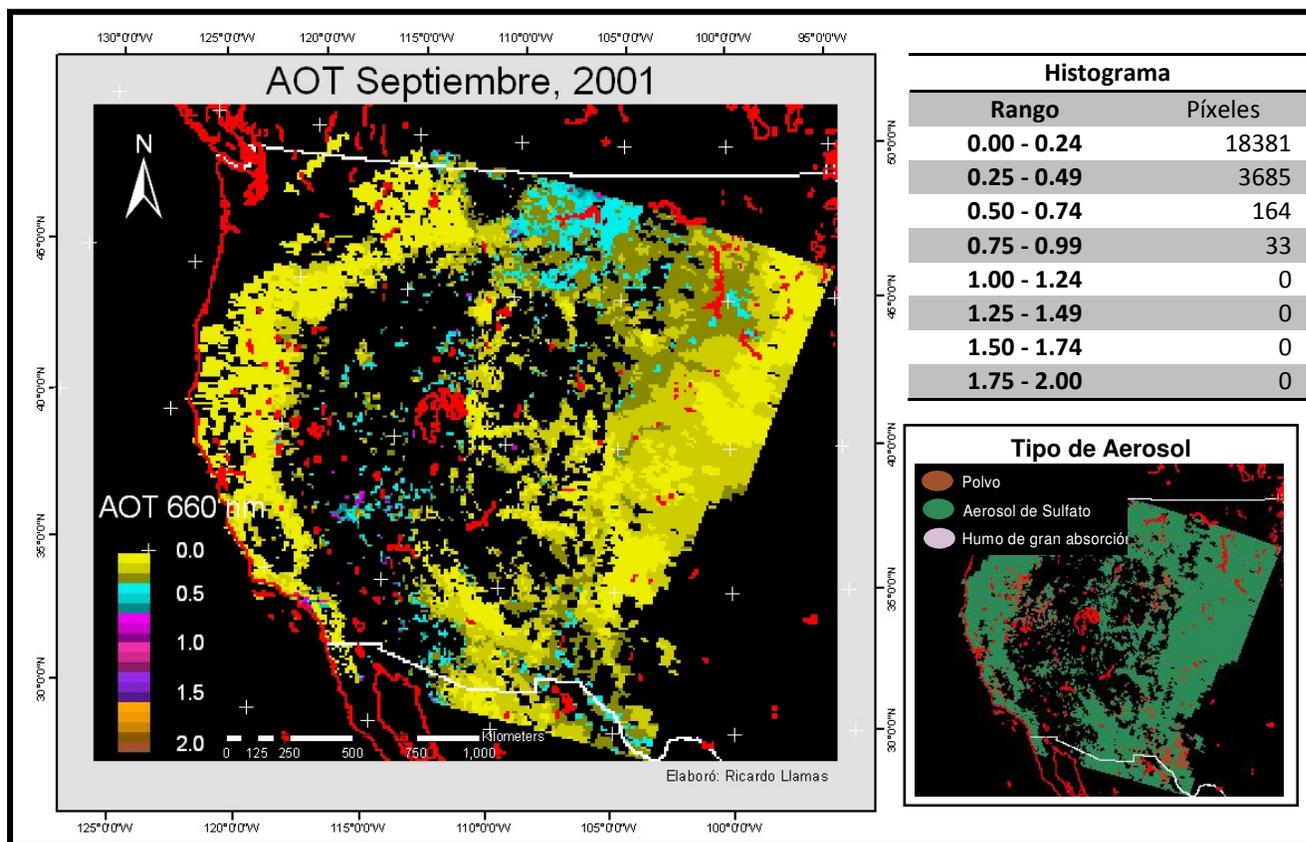


Figura 35. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Septiembre, 2001.

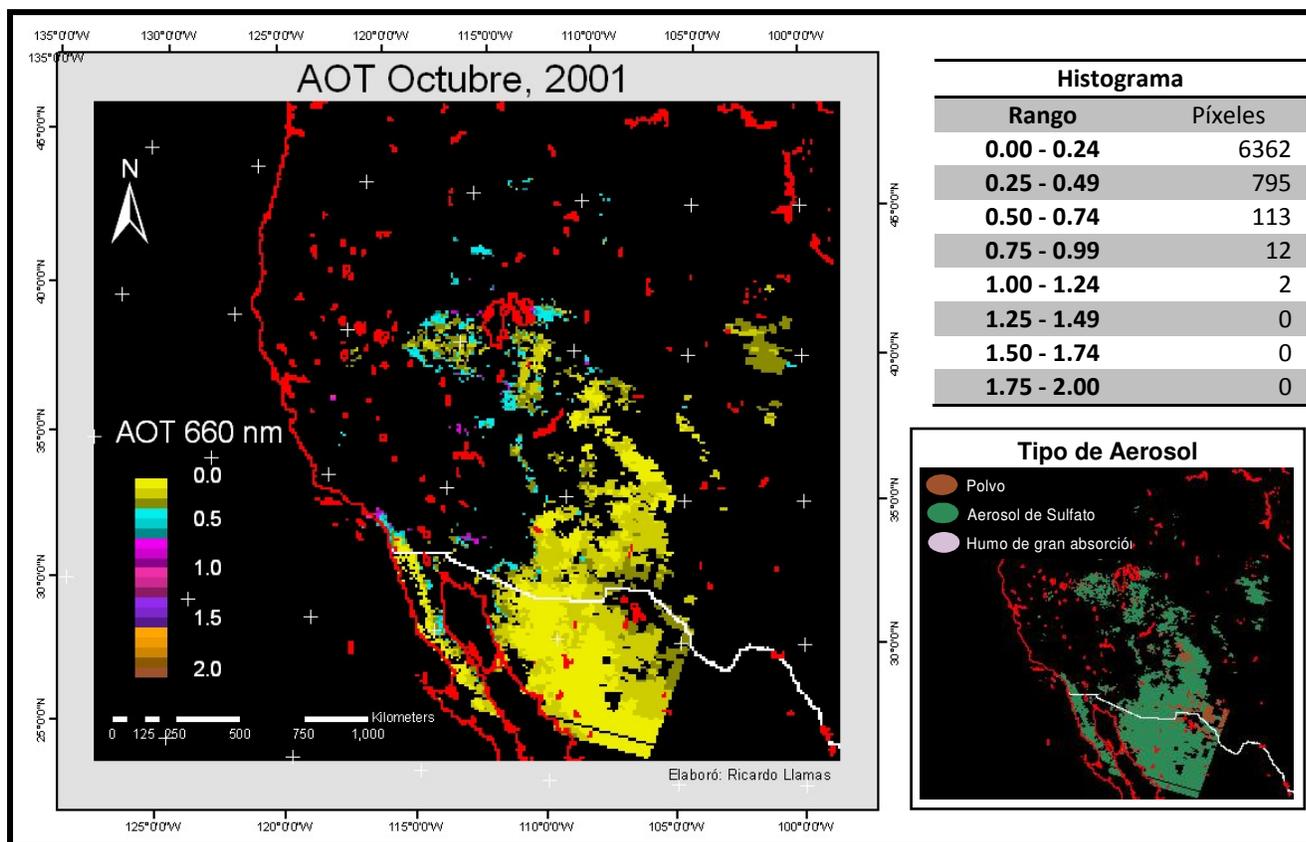


Figura 36. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Octubre, 2001.

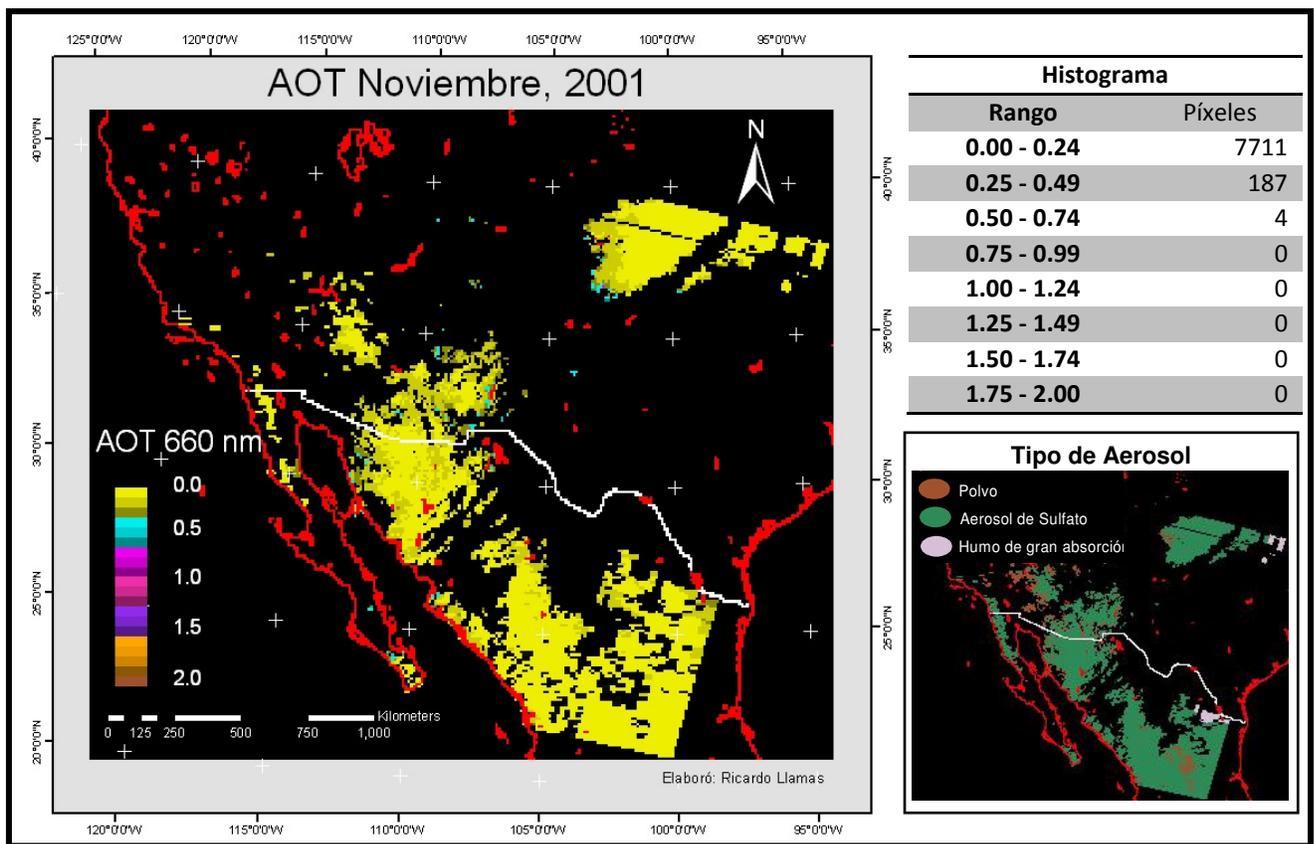


Figura 37. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Noviembre, 2001.

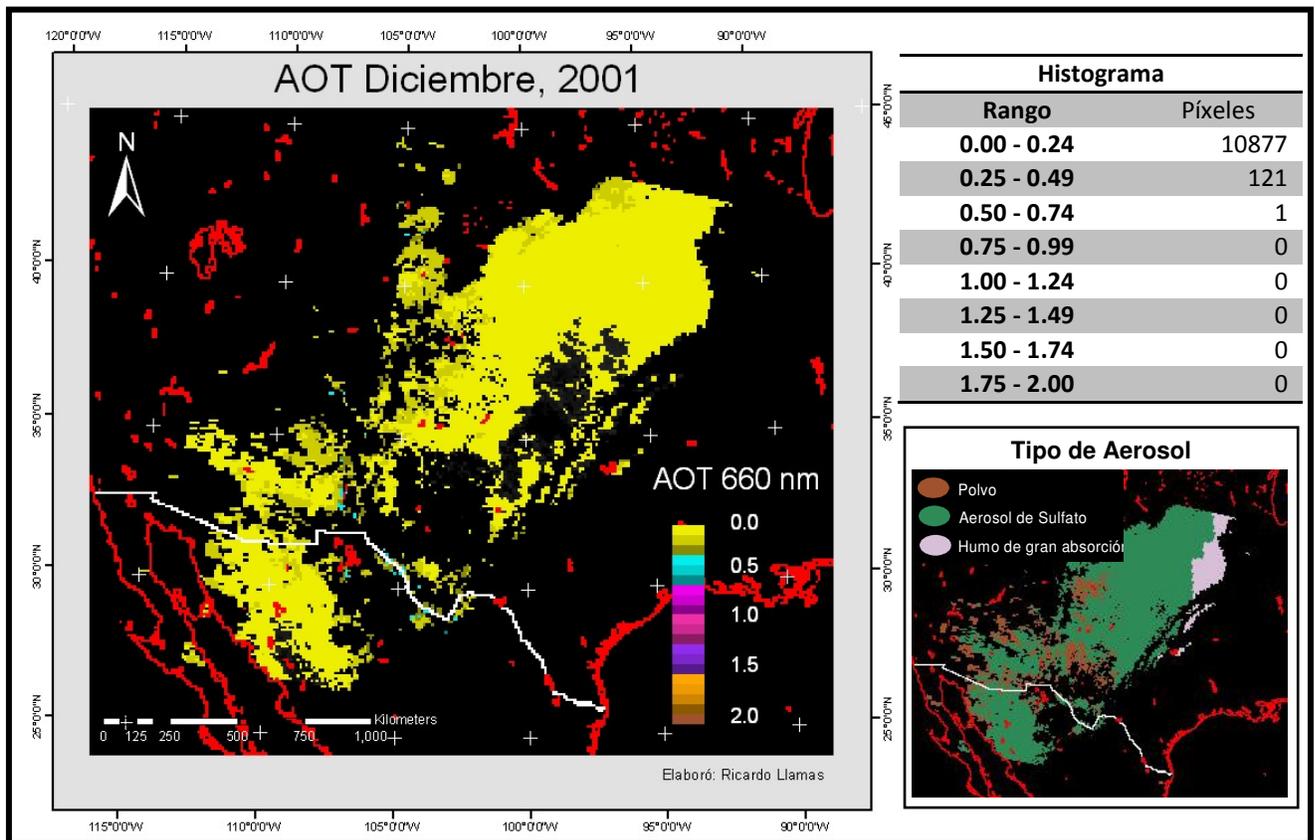


Figura 38. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Diciembre, 2001.

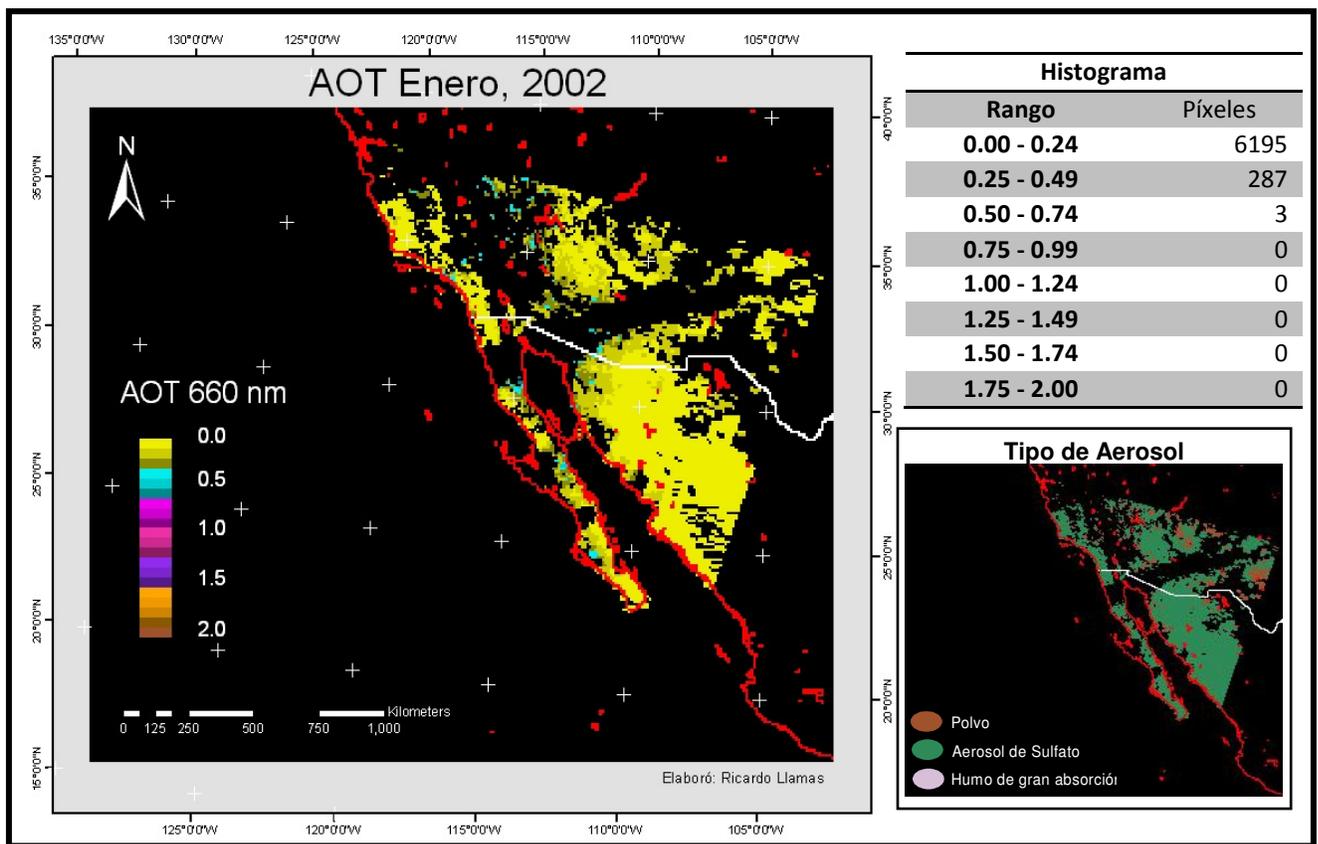


Figura 39. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Enero, 2002.

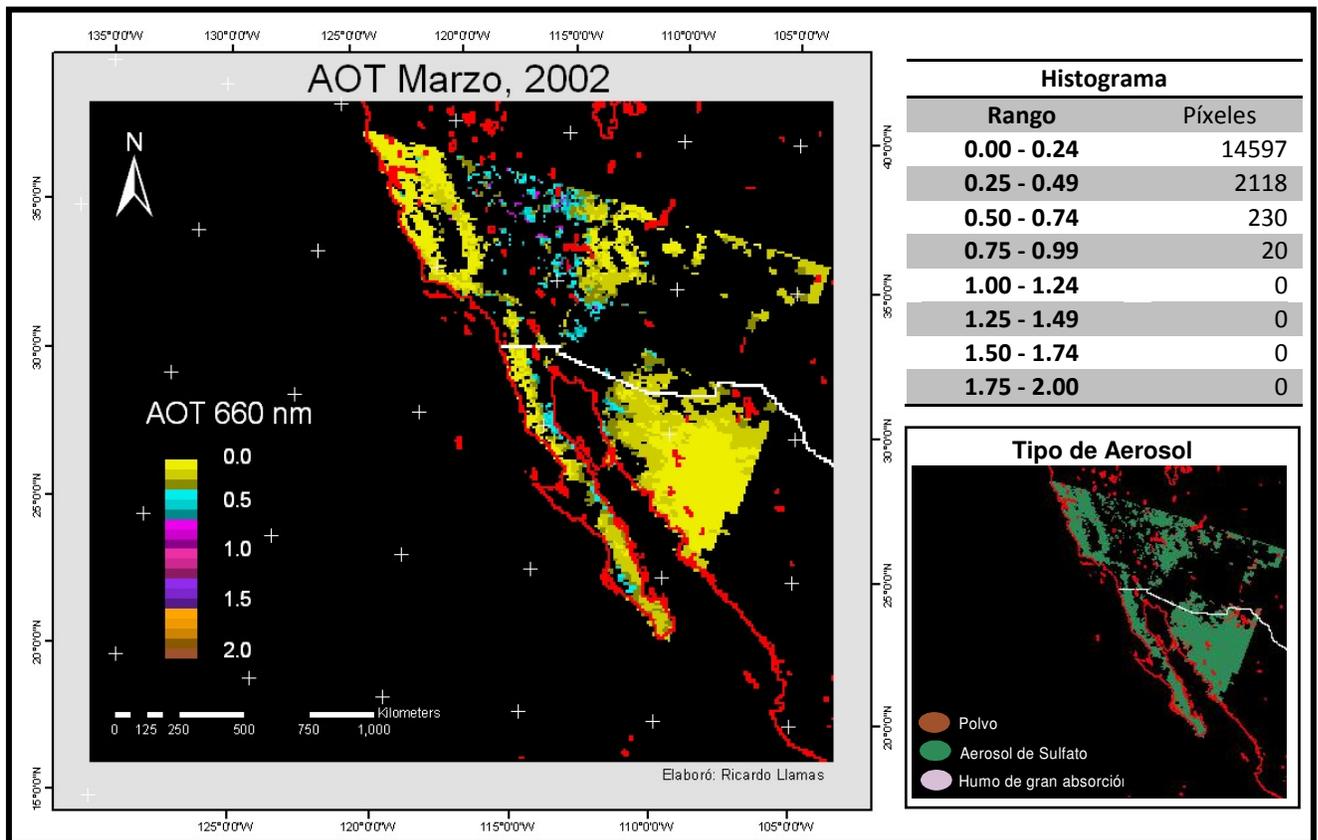


Figura 40. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Marzo, 2002.

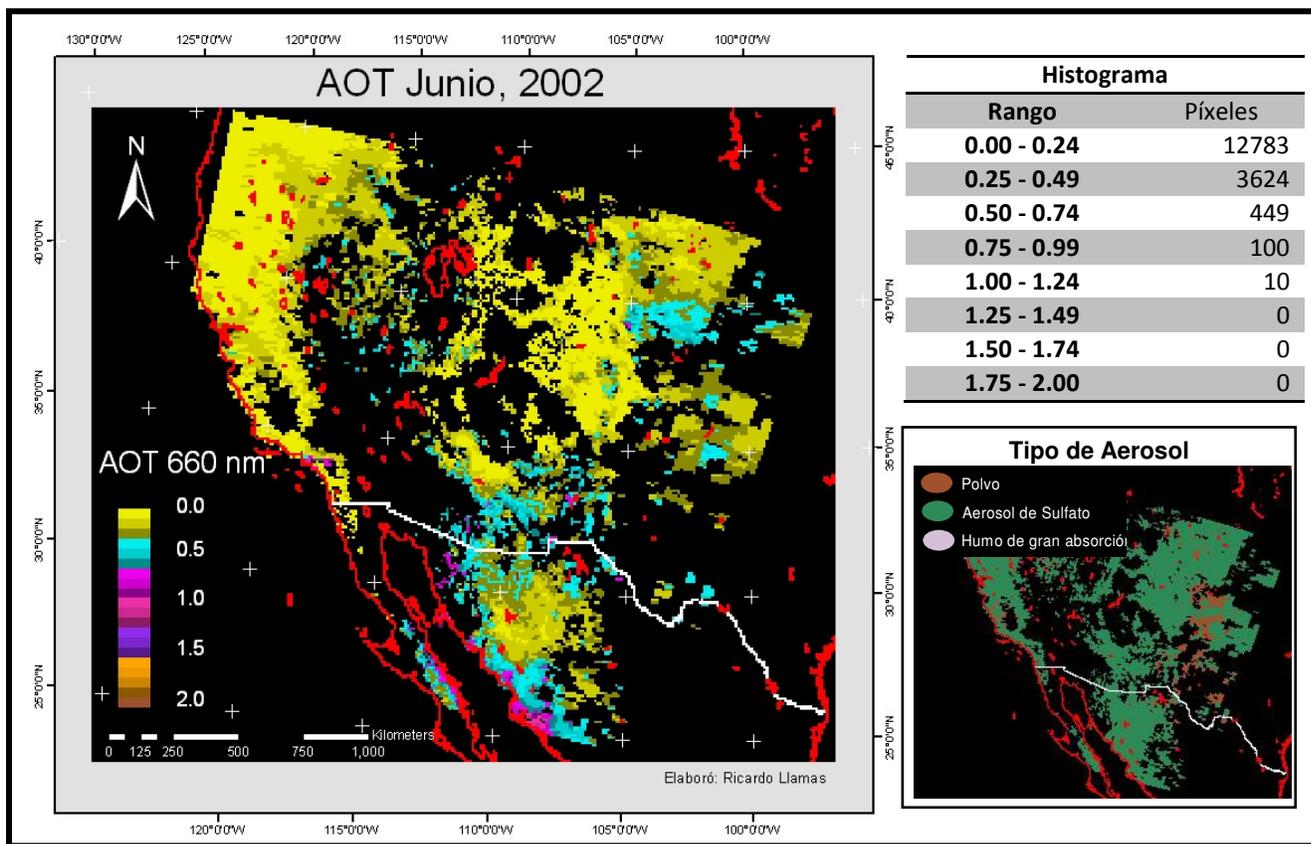


Figura 41. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Junio, 2002.

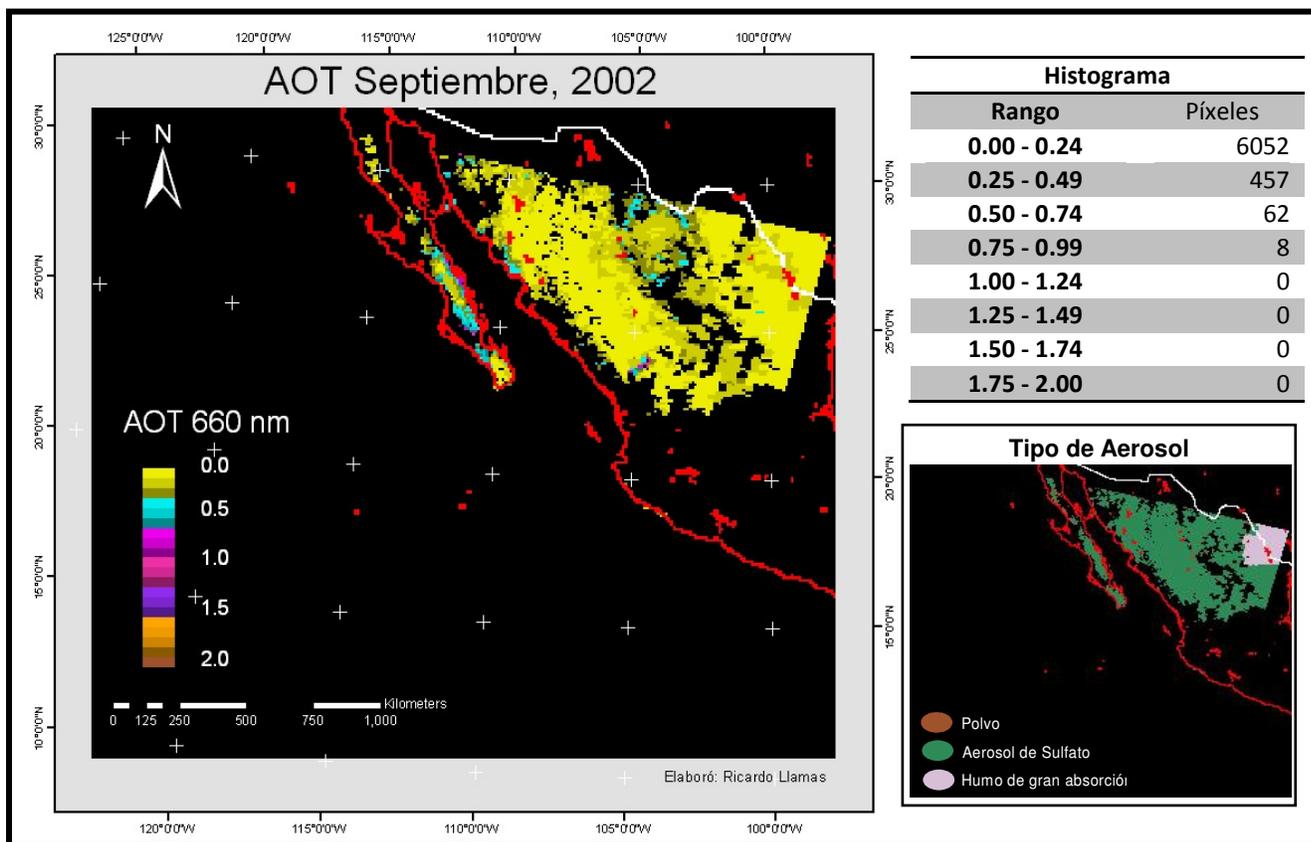


Figura 42. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Septiembre, 2002.

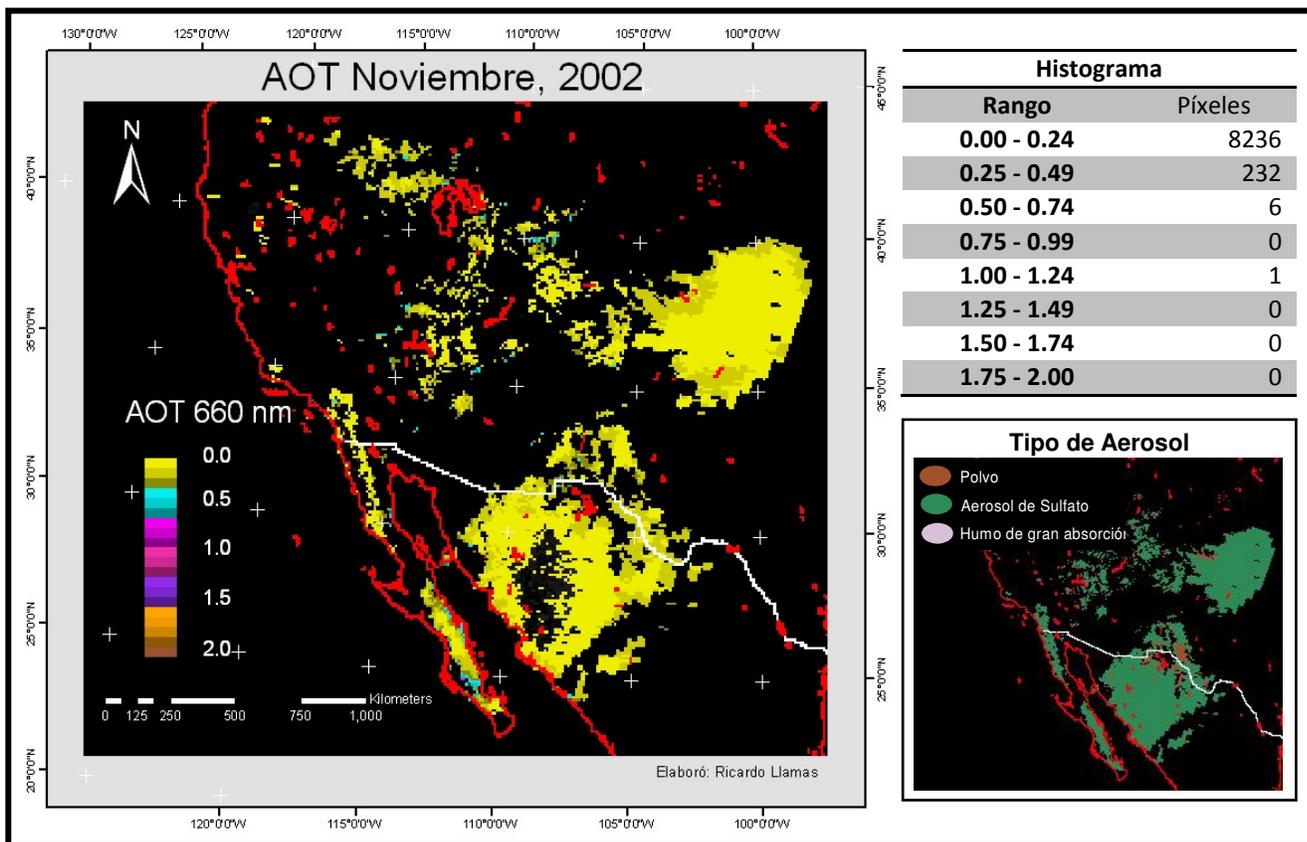


Figura 43. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Noviembre, 2002.

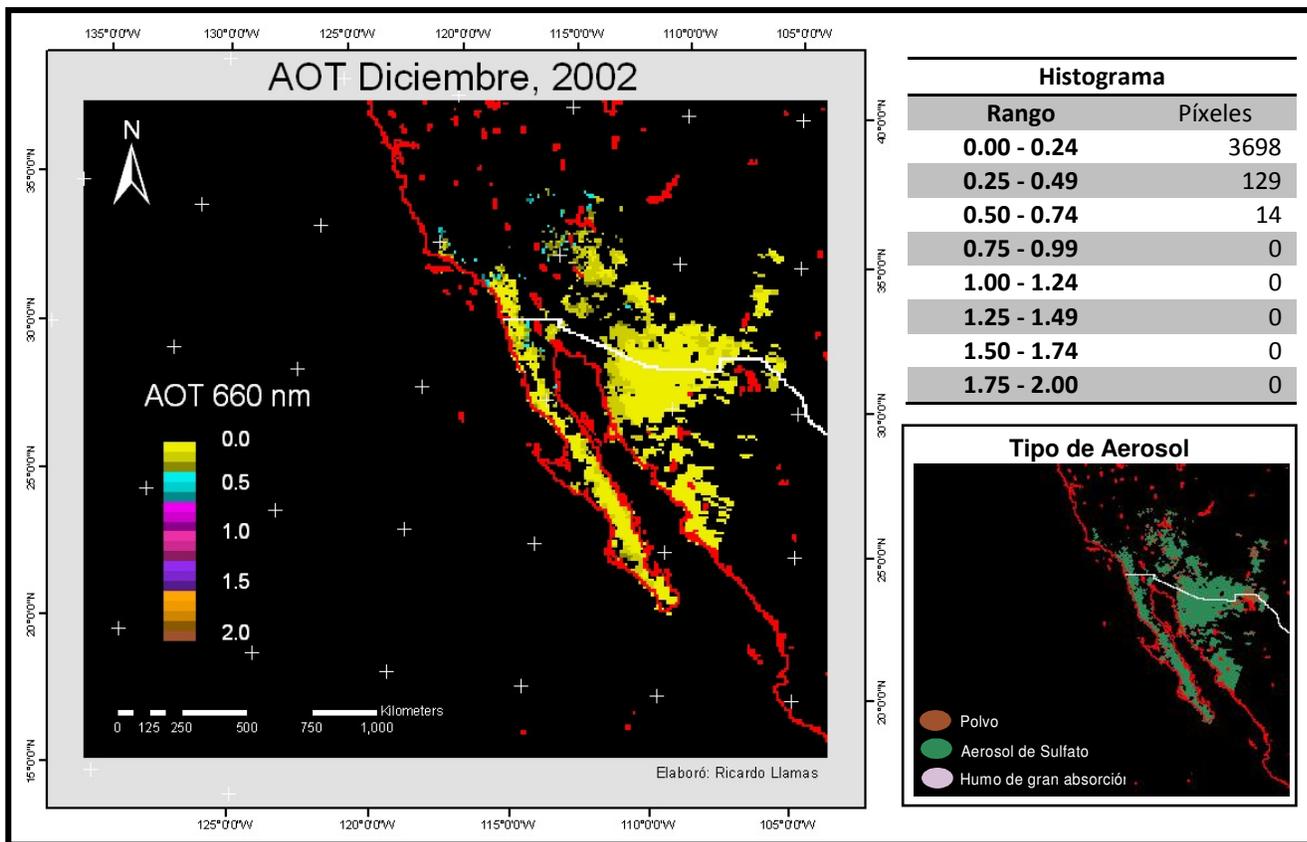


Figura 44. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Diciembre, 2002.

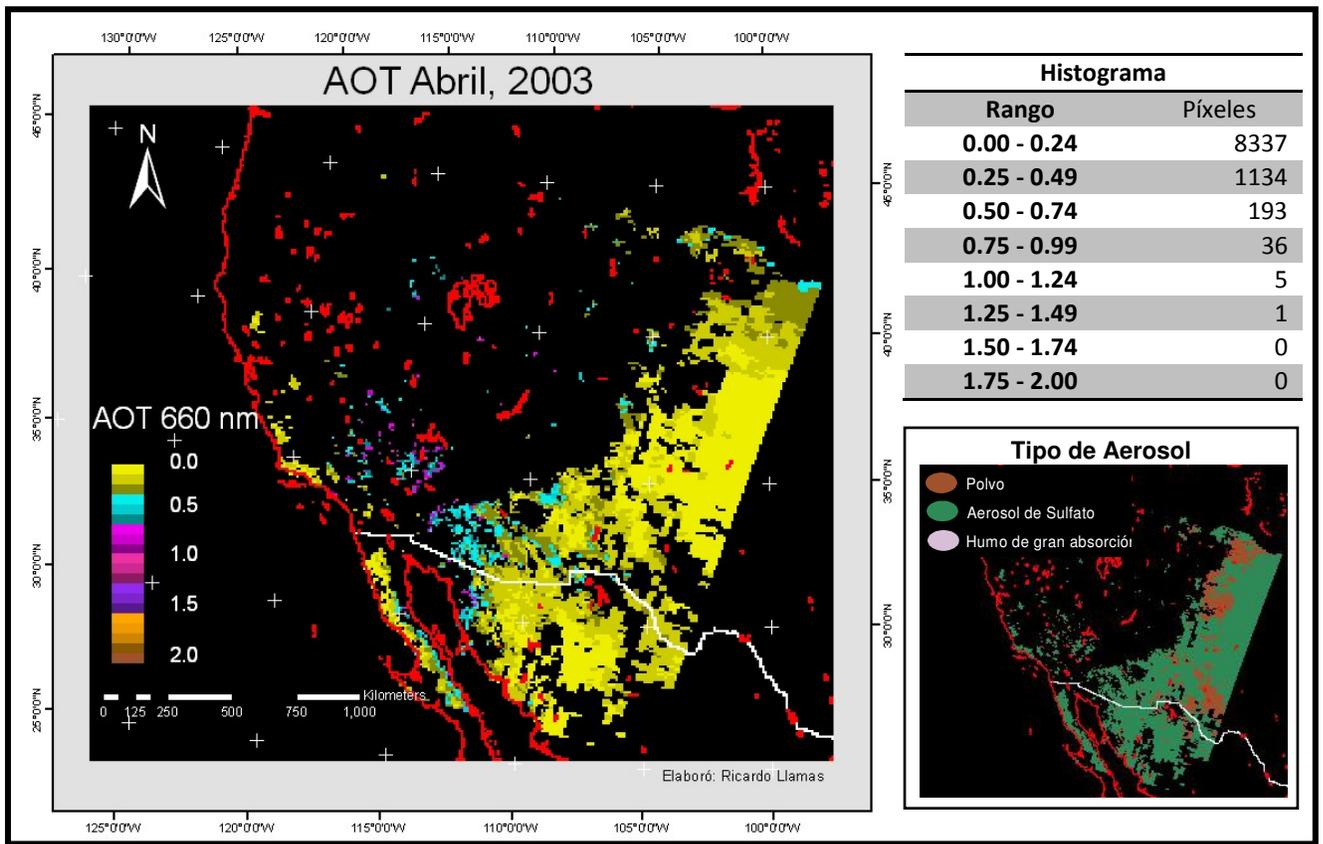


Figura 45. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Abril, 2003.

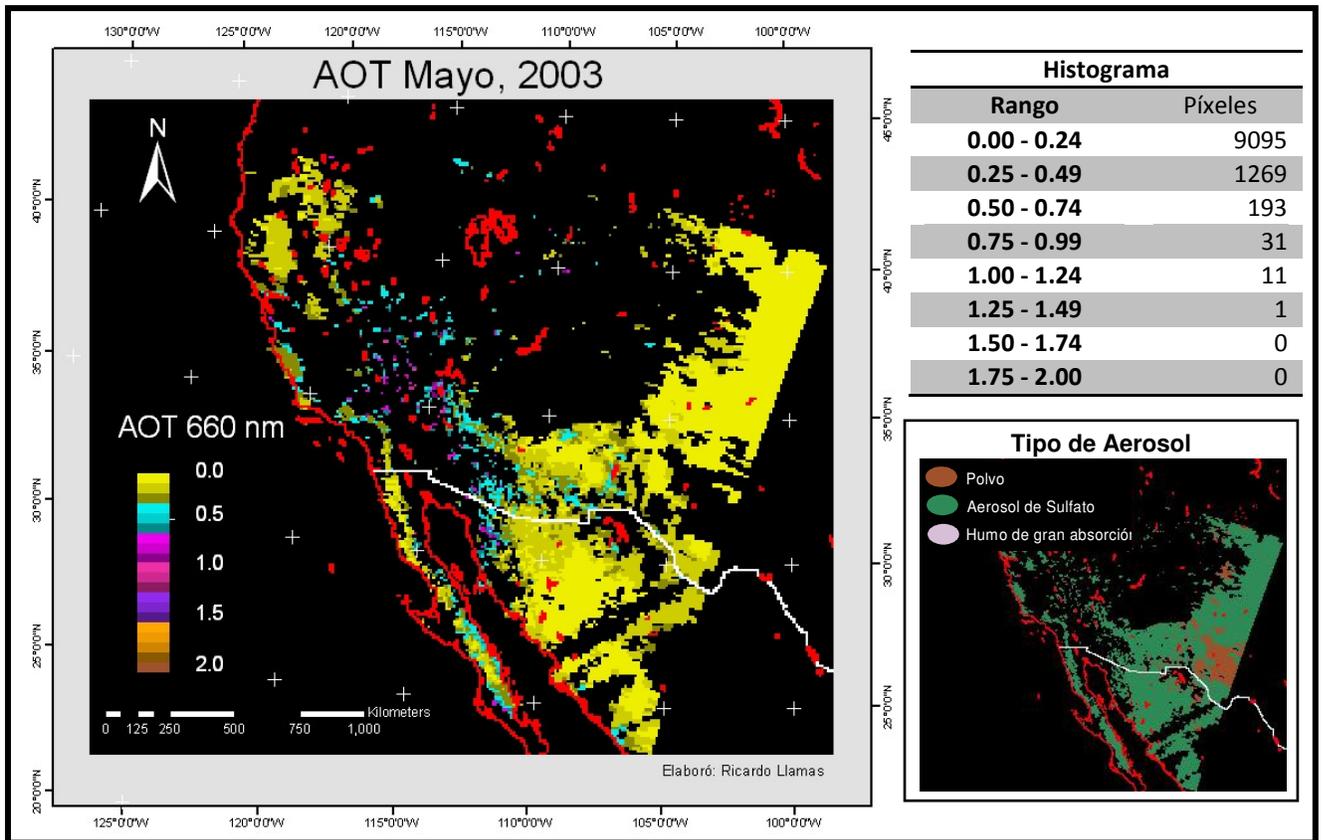


Figura 46. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Mayo, 2003.

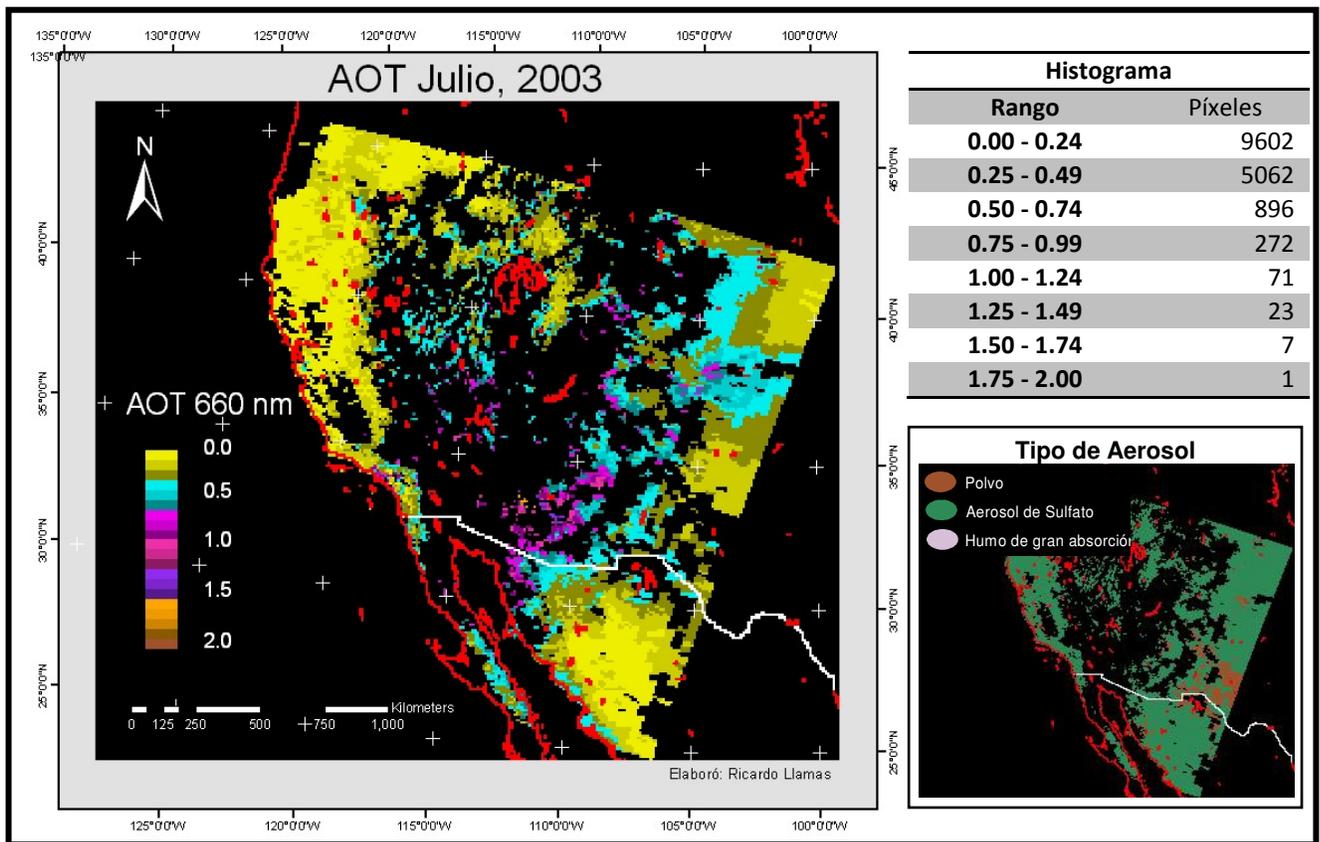


Figura 47. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Julio, 2003.

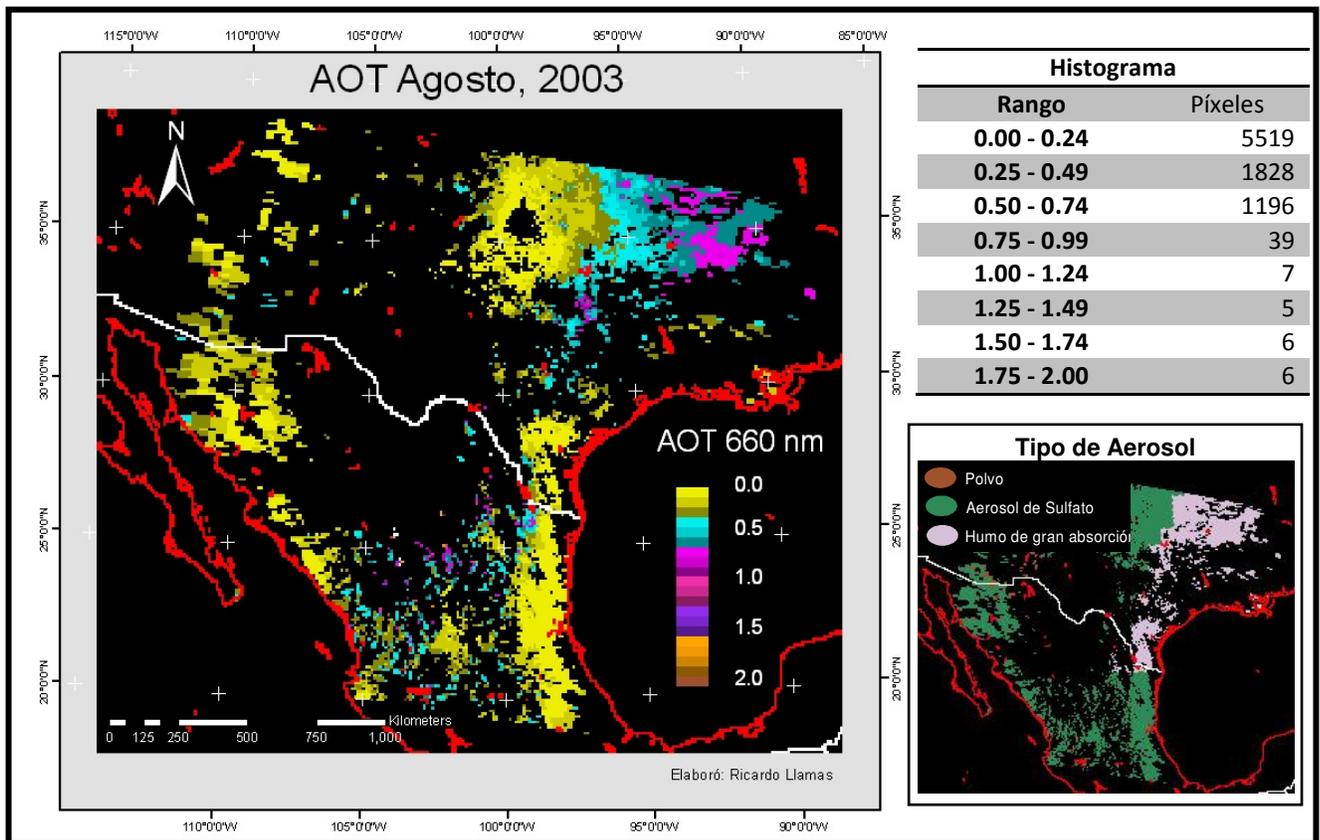


Figura 48. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Agosto, 2003.

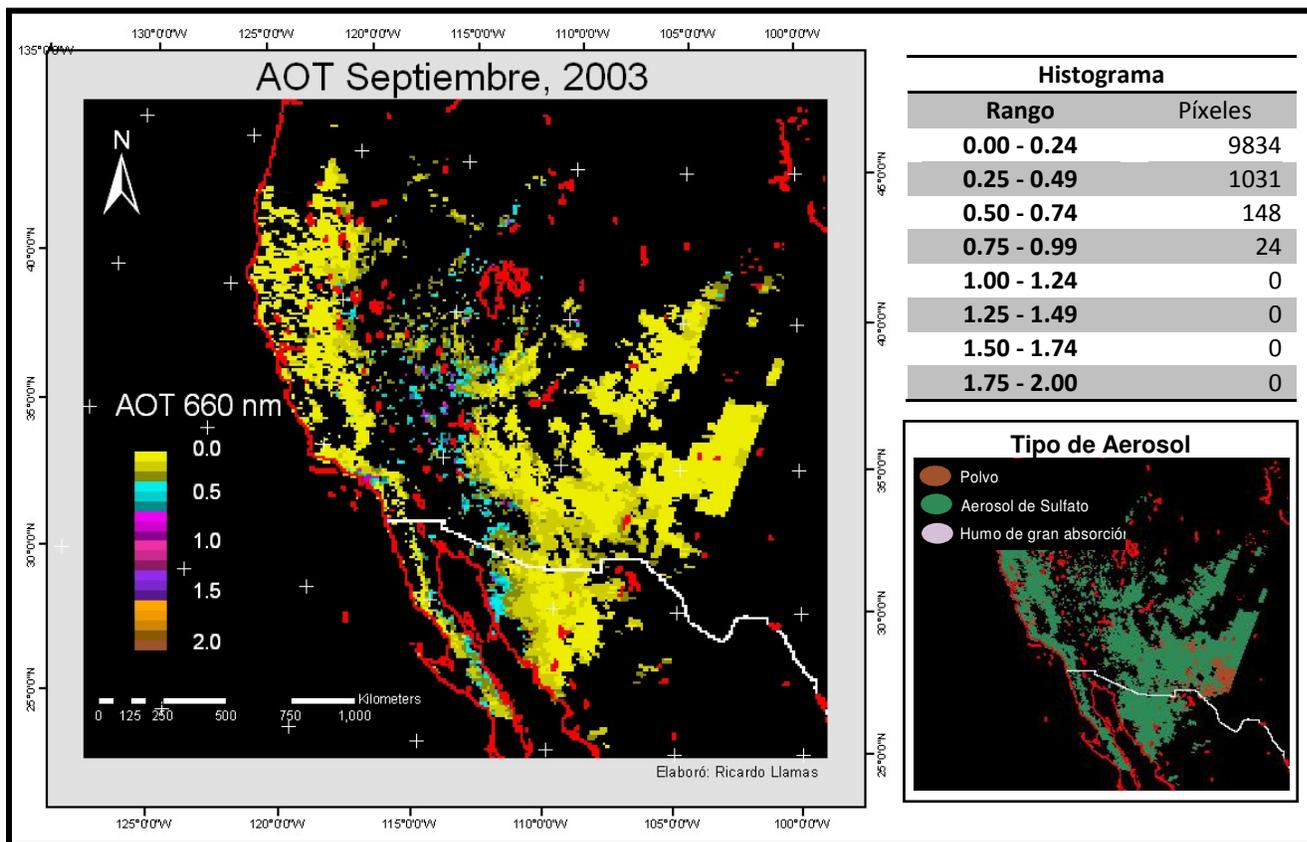


Figura 49. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Septiembre, 2003.

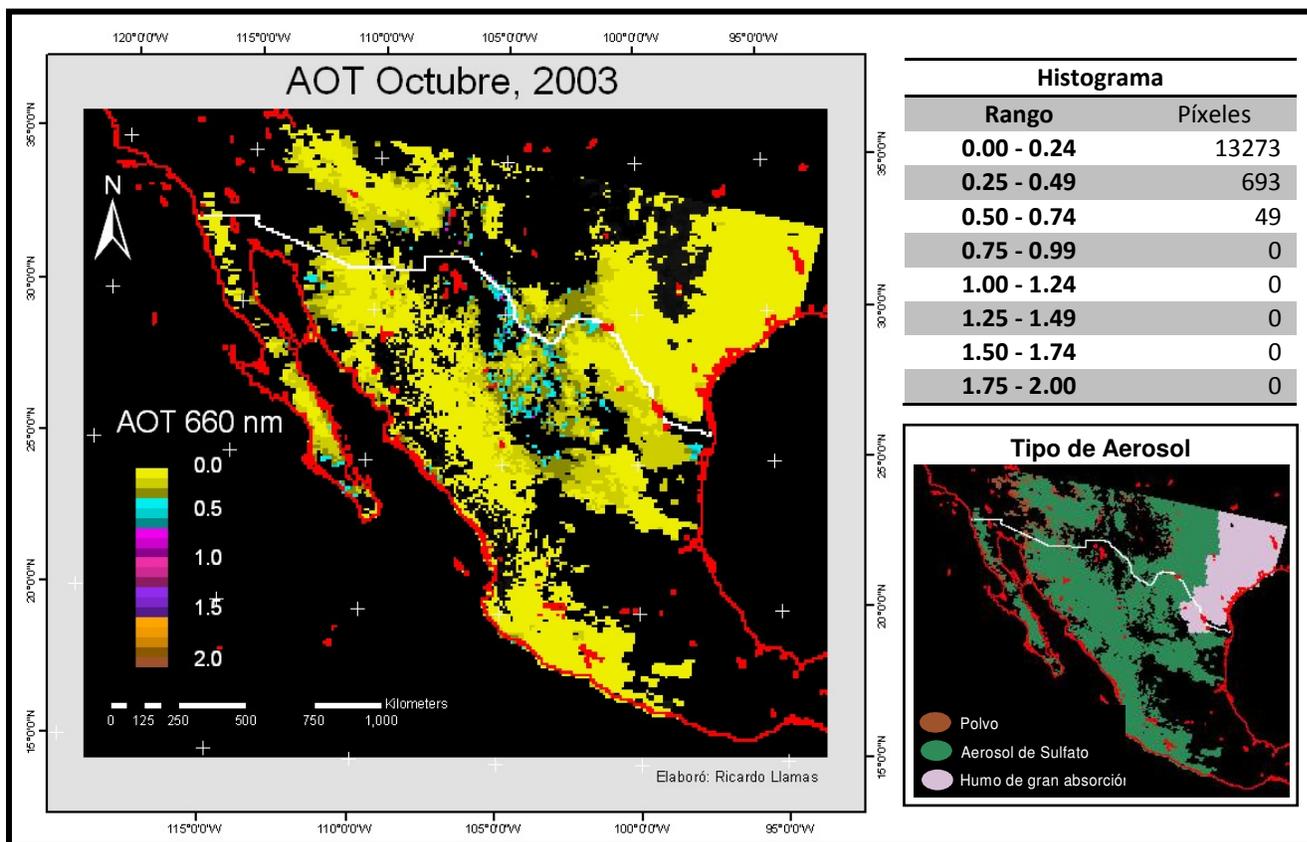


Figura 50. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Octubre, 2003.

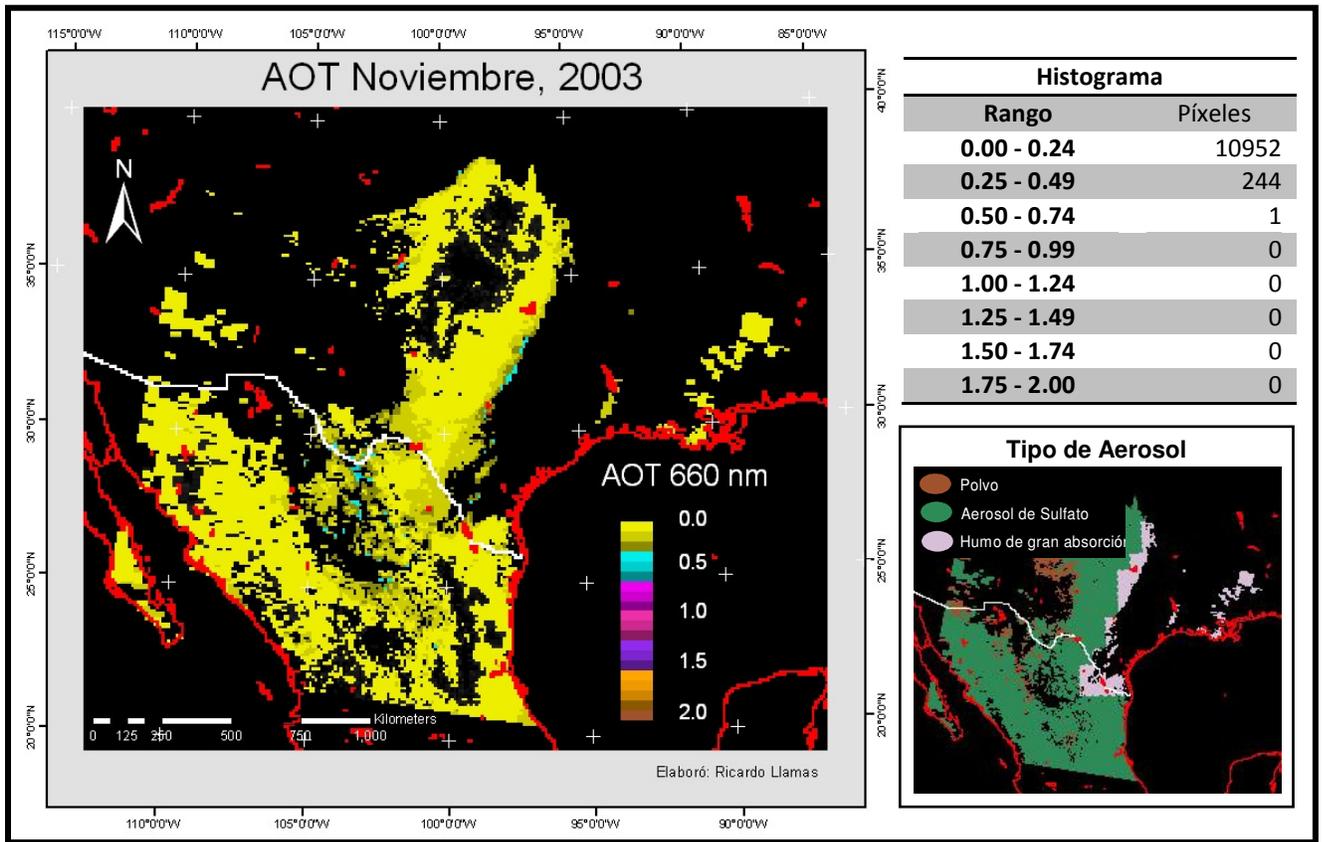
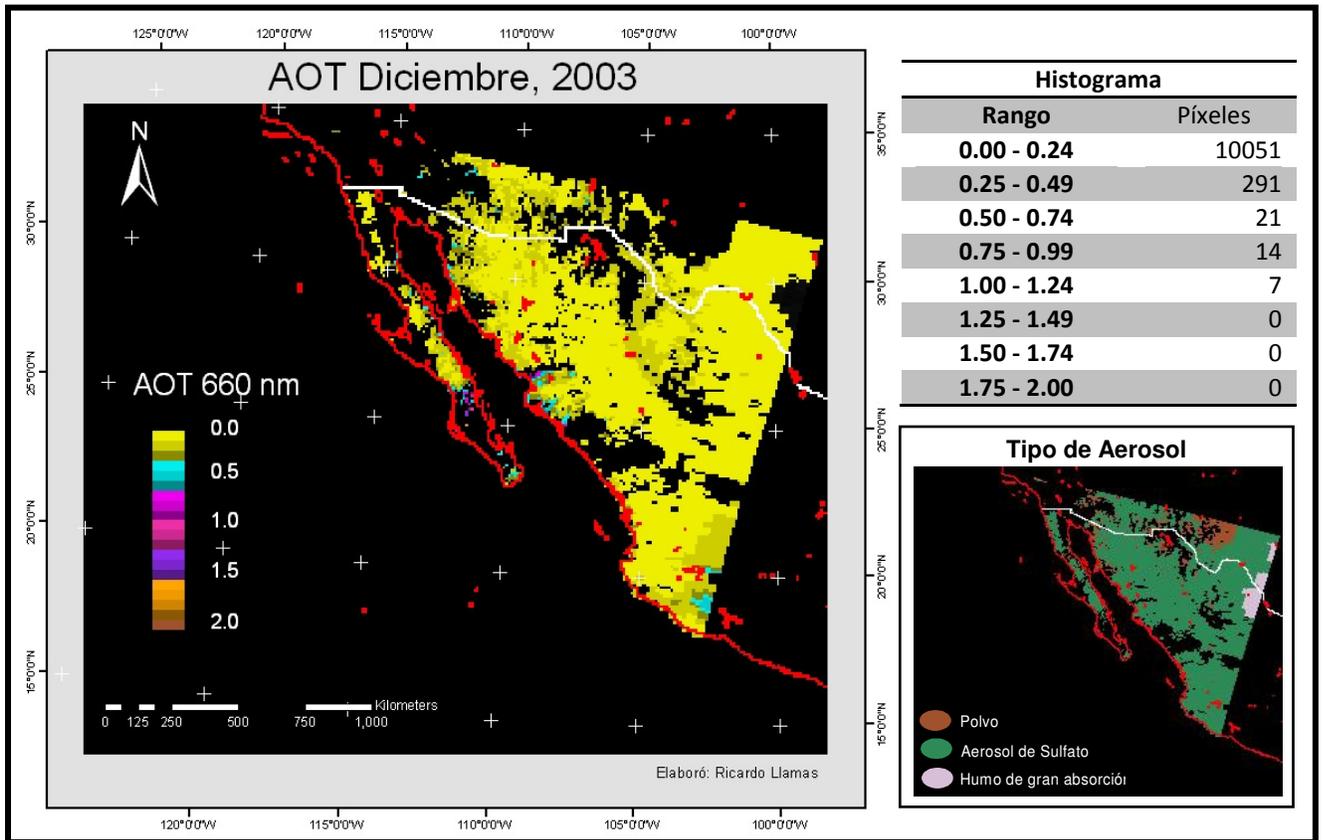


Figura 51. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Noviembre, 2003.



Mapa 52. Espesor Óptico del Aerosol en el Noroeste de México, Diciembre.

Conclusiones

Como consideraciones finales al trabajo realizado, cabe mencionar que este no sólo genera conocimiento específico del comportamiento del espesor óptico del aerosol en el noroeste de México, sino que además los primeros capítulos sirven de referencia en el entendimiento de la dinámica de las partículas aerosoles con la atmósfera y contextualiza geográficamente la región noroeste para propiciar el análisis de la relación de estos dos aspectos con la información obtenida en el inciso final de esta investigación.

Para la obtención de los datos finales que sirvieron de eje para el estudio del comportamiento del AOT tanto en las gráficas, como mediante las imágenes digitales fue necesario adaptar una metodología basada en estudios anteriores que sirvieron como referencia para determinar principalmente la dimensión del área de selección dentro de cada imagen para la obtención de promedios del espesor óptico sobre la ciudad de Hermosillo, así como el rango de tiempo para la selección de valores entre el conjunto de mediciones que ofrece el fotómetro de la red AERONET.

La depuración que se realizó con los datos seleccionados inicialmente permitió obtener un universo de mediciones tanto en valores MODIS como en AERONET que se correspondían en fechas exactas y el cual fue obtenido mediante la consideración de diferentes métodos estadísticos para finalmente obtener el coeficiente de correlación entre las mediciones de ambos instrumentos mediante la elaboración de histogramas de frecuencias de los errores absolutos entre los dos conjuntos de datos.

El coeficiente de correlación obtenido ($R^2 = 0.863$), aunque fue calculado con 50 datos en cada conjunto, sirvió para validar las mediciones realizadas por el sensor MODIS a lo largo de todo el periodo de estudio y en toda la zona de cobertura que se aprecia en los mapas finales, proporcionando un grupo final de datos de la media del espesor óptico del aerosol en el área de 50 x 50 km sobre la ciudad de Hermosillo con los que se elaboraron las gráficas de comportamiento del AOT mensuales y anuales con todos los valores disponibles para esa zona en específico y se realizó el análisis temporal.

El análisis espacial, se efectuó a través de los mapas finales elaborados con las imágenes digitales previamente validadas con el coeficiente de correlación y a través de éstas se realizó la interpretación de la información contenida para la identificación de patrones en la concentración de partículas suspendidas en periodos específicos a lo largo de los tres años del periodo, además de ubicar las zonas en las que se presentan los valores más altos y bajos de manera general en toda la región noroeste de México.

En el caso del 2001 y 2002, los valores más altos se presentan en los meses de marzo y junio, sin embargo, el año 2003 difiere de este comportamiento y presenta los valores más elevados en los meses de agosto y septiembre, lo cual resultaría extraño si tomamos como referencia los años anteriores, pero al examinar el comportamiento de la atmósfera este último periodo se pudo identificar la presencia de Huracanes de gran intensidad en relación con la temporada durante el mismo lapso de tiempo en el noroeste de México.

Además se pueden identificar también, que en los tres años, los meses con valores menores del espesor óptico son los más secos, que corresponden a diciembre y enero en 2001 y 2002, de acuerdo con las gráficas de precipitación media que se presentan no sólo para la ciudad de Hermosillo sino también para diferentes puntos de la región noroeste donde se realizó la campaña de medición del Instituto de Geofísica, mientras que en el caso del año 2003, el mes de diciembre es el de valores más bajos y aún cuando no se cuenta con datos de enero para este periodo, la gráfica de comportamiento de los tres años indica que en cada uno de estos, los meses mencionados presentan las mismas características en cuanto a su concentración de partículas en la atmósfera.

En relación a lo anterior, se observa además, que los periodos con mayor precipitación, concuerdan con los meses de verano y los meses de otoño (año 2003) en los que se sabe que la precipitación es mayor en la región noroeste de México debido también a la entrada de humedad en el continente relacionada con el Monzón Mexicano o Monzón del Suroeste de Norteamérica.

Por otro lado, los mapas elaborados también ofrecen la oportunidad de analizar la distribución de los valores altos y bajos del AOT en la región noroeste, observándose que los valores más elevados se presentan principalmente en las porciones cercanas al litoral del golfo de Baja California y disminuyen en la región interior del estado de Sonora, incrementándose de nuevo pero en menor medida que la costa, en la vertiente exterior de la Sierra Madre Occidental.

De manera general, es evidente que la península de Baja California, presenta valores más elevados durante todo el periodo, a diferencia de la parte continental de la región noroeste, esto posiblemente relacionado con la reducida extensión territorial de esta provincia fisiográfica en dirección este-oeste, lo que favorece la influencia de aerosoles de origen marino en toda la península y que se ve reflejada en las mediciones realizadas por el sensor MODIS.

También podría suponerse que la presencia de aerosoles en la región tiene un posible origen relacionado con el clima árido de los estados de Sonora, Baja California y Baja California Sur, ya que la escasa vegetación propicia la emisión de estas partículas que son liberadas con facilidad desde la superficie, principalmente en zonas desérticas como Altar, Sonora; además de que la intensa actividad en el campo dentro del estado se manifiesta en diversos ciclos agrícolas de diferentes cultivos, lo que propicia la emisión de biomasa a la atmósfera derivada de esta actividad, durante distintas temporadas a lo largo del año.

Es evidente además que pese a la expansión de las ciudades en todo el mundo, en el caso de Hermosillo, Sonora, el crecimiento sostenido de la urbe no manifiesta una tendencia clara de aumento en la concentración de partículas suspendidas de acuerdo con los datos del espesor óptico en los meses con valores más elevados, sin embargo debe tomarse en cuenta que este parámetro de medición considera todos los tipos de aerosoles presentes en la atmósfera y no sólo aquellos de origen antropogénico, por lo que los datos del AOT en el noroeste de México se relacionan con diversos fenómenos naturales, además de que el periodo de estudio es de sólo tres años y es necesario un universo de datos mayor para poder analizar con mayor profundidad el comportamiento del espesor óptico.

Finalmente en relación a los objetivos planteados para esta investigación se logró determinar el comportamiento del AOT a través del análisis de los datos de la ciudad de Hermosillo y la interpretación de la información proporcionada por el sensor MODIS en toda la región, también se obtuvo el coeficiente de correlación entre el sensor remoto y el fotómetro *in situ*; se demostró la utilidad del procesamiento digital de imágenes en el estudio de la atmósfera; se adaptó una metodología para el estudio del espesor óptico en el NO de México, se determinaron los datos validados para la elaboración de las gráficas y mapas de referencia y por último, se logró confirmar la hipótesis del trabajo diferenciando los factores físico-geográficos que presentan una mayor influencia en la concentración de partículas suspendidas en la región.

Dado que no existen estudios anteriores a este trabajo referentes al comportamiento del espesor óptico del aerosol en el NO de México, no resulta posible comparar los resultados obtenidos con investigaciones de otros autores y así confrontar patrones en las variaciones espacio-temporales del AOT. Siendo finalmente la única referencia de este estudio los índices de correlación entre el sensor MODIS y los fotómetros de la red AERONET realizados en otras regiones del mundo y que otorgan fiabilidad a los datos obtenidos mediante el procesamiento digital de las imágenes MODIS utilizados en esta investigación.

Por lo que se considera que los resultados obtenidos, si bien expresan claramente los patrones de comportamiento a lo largo de periodo 2001–2003, es necesario realizar análisis más extensos y en diferentes lapsos de tiempo para poder confrontar los presentes resultados y así determinar con claridad el comportamiento de las partículas aerosoles en el tiempo y su génesis en el NO de México, para entender los cambios que éstas puedan generar en la interacción de la atmósfera con la radiación solar y la dinámica del clima en la Tierra.

El principal aporte de esta investigación para trabajos futuros recae en la utilidad de los datos obtenidos para estudios sobre contaminación atmosférica, cambio climático, análisis de albedo, balance de radiación y demás tópicos relacionados con la interacción de las partículas suspendidas en la atmósfera. La realización de un análisis temporal en un periodo más extenso ayudará al mejor entendimiento de todos estos fenómenos en base a la utilización de sensores remotos e instrumentos de superficie que registren de manera constante los datos necesarios.

Resulta importante considerar que con base a lo mencionado anteriormente, el beneficio directo de la investigación presentada se puede apreciar en la experiencia de la aplicación de una metodología específica para el estudio del espesor óptico que puede ser utilizada para el análisis del mismo parámetro en otras regiones del planeta y principalmente en México.

Referencias

- Bai, L., Y. Xue, J. Guang, Y. Wang, Y. Li, J. Ai, W. Wan y J. Guo, Primary Validation of the Syntem Aerosol Retrieval Model over Beijing Area using Aeronet Data, IEEE computer society, 2008.
- BANAMEX, Sonora, BANAMEX, México, 1984.
- Barry, R. G. y R. J. Chorley, Atmosphere, Weather and Climate, Routledge, Londres, 2003.
- Caire, J., Cartografía Básica., Facultad de Filosofía y Letras, UNAM., México, 2002.
- Charlson, R. J., S. E. Schwartz, J. M. Heles, R. D. Cess, J. A. Coakley, J. E. Hnasen y D. J. Hofmann, Climate Forcing by Anthropogneic Aerosols, *Science*, 255(5043), 423-430, 1992.
- Chia, A. S., K. H. Lim y B. N. Chew, Detection of Smoke Haze from Vegetation Fires using MODIS Aerosol Products, Centre for Remoete Imaging, Sensing and Processing. Universidad Nacional de Singapur, Singapur, 2008.
- Chiron de la Casinière, A. y V. E. Cachorro Revilla, La Radiación Solar en el Sistema Tierra - Atmósfera., Universidad de Valladolid, Valladolid, 2008.
- Correia, A. y C. Pires, Validation of Aerosol Optical Depth Retrievals by Remote Sensing over Brazil and south America using MODIS, Brasil, 2006.
- Deepak, A., Atmospheric Aerosols. Their Formation, Optical Properties and Effects, Estados Unidos, 1982.
- D'Almeida, G., P. Koepke y E. P. Shettle, Atmospheric Aerosols. Global Climatology and Radiative Characteristics, A. Deepak Publishing, Estados Unidos, 1991.
- Franco Mass, S. y Ma. e. Valdez Pérez, Principios básicos de Cartografía y Cartografía automatizada, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México, 2003.
- GESDISC, Aerosol Optical Thickness., Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/dataholdings/PIP/aerosol_optical_thickness_or_depth.shtml, 2009.
- Glantz, P., Interactive comment on "Estimating a relationship between aerosol optical thickness and surface wind speed over the ocean", *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2006.
- Grosso, N., F. Ferreira y S. Mesquita, Improvement in particles (PM10) urban air quality mapping interpolation using remote sensing data, *Developments in Environmental Sciences*, 265-274, 2007.
- GSFC, AERONET website, National Aeronautic and Space Administration, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>, 2010.

- Ichoku, C., A. D. Chu, S. Mattoo, Y. J. Kaufman, L. A. Remer, D. Tanre, I. Slutsker y B. N. Holben, A spatio-temporal approach for global validation and analysis of MODIS aerosol products., *Geophysical Research Letters*, 29, 2002.
- Ichoku, C., Y. J. Kaufman, L. A. Remer, R. Levy, D. A. Chu, R.-R. Li, D. Tanré y S. Mattoo, MODIS Aerosol Products: Quality Assessment and Regional Application Case Studies Based on Two Years of Operation, 2003.
- INEGI, Anuario Estadístico del Estado de Sonora, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México, 2009.
- INEGI, INEGI, Sitio Electrónico., Instituto Nacional de Estadística y Geografía, <http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx?s=geo&e=26>, 2010.
- Iqbal, M., An Introduction to Solar Radiation, University of British Columbia, Toronto, 1983.
- Kokhanovsky, A., Aerosol Optics, Light Absorption and Scattering by Particles in the Atmosphere, Springer, Gran Bretaña, 2008.
- Kondratyev, K. Ya., L. S. Ivlev, V. F. Krapivin y C. A. Varostos, Atmospheric Aerosols Properties, Formation, Processes and Impacts, Springer, Gran Bretaña, 2006.
- LAADS Web, Search for Level 1 and Atmosphere Products., GSFC, <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>, 2010.
- Liang, S., Bo. Zhong y H. Fang, Improved estimation of aerosol optical depth from MODIS imagery over land surfaces, *Remote Sensing of Environment*, 104, 416-425, 2006.
- Lira, J., La Percepción Remota, Nuestros Ojos desde el Espacio., Fondo de Cultura Económica, México, D.F., 1995.
- Martínez, A. E., Estudia NASA el monzón mexicano, El Universal, México, 2006.
- Martínez, J. y A. Fernández, Cambio Climático: Una vision desde México, Instituto Nacional de Ecología, México, 2004. pp 32
- NASA[a], MODIS web., National Aeronautics and Space Administration, <http://modis.gsfc.nasa.gov/index.php>, 2010.
- NASA[b], MODIS Atmosphere., National Aeronautics and Space Administration, <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/index.html>, 2010.
- National Hurricane Center, Tropical Cyclone Report. Hurricane Ignacio, NOAA, <http://www.nhc.noaa.gov/2003ignacio.shtml>, 2003a.
- National Hurricane Center, Tropical Cyclone Report. Hurricane Marty, NOAA, <http://www.nhc.noaa.gov/2003marty.shtml>, 2003b.
- NOAA, Cold and Warm episodes by season., NOAA., http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml, 2010.

- Puigcerver, M. y M. D. Carrascal, El medio atmosférico: meteorología y contaminación, Universitat de Barcelona, Barcelona, 2008.
- Qu, J. J., W. Gao, M. Kafatos, R. E. Murphy y V. V. Salomonson, Earth Science Satellite Remote Sensing. Science and Instruments., Tsinghua University Press y Springer, Alemania, 2006.
- Remer, L. A., D. Tanré, Y. J. Kaufman, C. Ichoku, S. Mattoo, R. Levy, A. D. Chu, B. N. Holben, O. Dubovik, A. Smirnov, J. V. Martins, R.-R. Li y Z. Ahmad, Validation of MODIS Aerosol retrieval over ocean., *Geophysical Research Letters*, 29, 2002.
- Remer, L. A., D. Tanré, Y. J. Kaufman, R. Levy y S. Mattoo, Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS, Goddard Space Flight Center, http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod02.pdf, 2006.
- Reyes, S., M. W. Douglas y R. A. Maddox, El monzón del suroeste de Norteamérica (TRAVASON/SWAMP), *Atmósfera*, 7, 117-137, 1994.
- Sánchez, A. C., Conocimientos Fundamentales de Geografía, UNAM/McGraw-Hill, México, 2006.
- SERVIR, Aerosol Optical Depth (AOD), Sistema Regional de Visualización y Monitoreo, http://www.servir.net/Aerosol_Optical_Depth_AOD, 2009.
- Sobrino, J. A., Teledetección, Universitat de València, Valencia, España., 2000.
- Sosa, R., G. Gaxiola, R. Durazo y B. Greg, Efecto de los vientos Santa Ana en las propiedades bio-ópticas frente a Baja California., *Ciencias Marinas*, 31, 339-348, 2005.
- Spiegel, M. R., Probabilidad y Estadística, McGraw-Hill, México, 2001.
- Timofeyev, Y. M. y A. V. Vasilev, Theoretical Fundamentals of Atmospheric Optics, Cambridge International Science Publishing, Cambridge, GB., 2008.
- Tipler, P. A. y G. Mosca, Física para la Ciencia y la Tecnología, Reverté, Barcelona, 2006.
- Vermote, E. F., N. Z. Saleous y J. L. Privette, Surface Reflectance Earth System Data Record, *Climate Data Record White Paper*, 2007.

Anexos

▪ Conjunto de Archivos

En el disco adjunto a este trabajo se encuentran contenidos todos los archivos adquiridos y procesados para la realización de la investigación, en el caso del fotómetro de la red AERONET en la ciudad de Hermosillo, Sonora, sólo existen datos de los años 2001 y 2002 por lo que no existe la carpeta con las mediciones respectivas al año 2003. Los Querys utilizados para la selección de los datos específicos se detallan en el capítulo III.

Las carpetas que contienen los archivos MODIS, están organizadas por año y mes respectivamente, dentro de estas se encuentran los archivos originales en formato HDF sin ningún procesamiento, así como en subcarpetas dentro de las que se localizan todas las imágenes procesadas y re proyectadas para dos parámetros principalmente, Espesor Óptico Corregido y Tipo de Aerosol. El formato en el que están renombrados todos los archivos de las imágenes está descrito en el capítulo III.

Dentro de las carpetas mensuales también se encuentran las estadísticas de los polígonos de 50 x 50 km sobre la ciudad de Hermosillo, de los cuales se obtuvo principalmente la media aritmética para la determinación de los valores útiles en la validación, el comportamiento temporal del AOT y la realización de las gráficas finales.

Todo el procesamiento de las imágenes digitales así como la extracción de información en regiones de interés se realizaron con ayuda del software Envi 4.7, sin embargo es posible trabajar la información contenida en el disco adjunto con otros procesadores de imágenes digitales de satélite.