

Variabilidad Espacial y Temporal del Espesor Óptico de los Aerosoles sobre Perú usando Imágenes de Satélite

Joel Rojas Acuña¹
Penélope Vargas Gargate¹
Flavio Carrillo Gomero¹

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos - UNMSM
Av. Venezuela s/n. Pabellón de Física. Ciudad Universitaria, Lima 1.

¹jrojasa@unmsm.edu.pe
¹penelopevg@gmail.com
¹fcarrillog@unmsm.edu.pe

Resumen. En el presente trabajo se estudio la variabilidad espacial y temporal del espesor óptico de los aerosoles, sobre las regiones geográficas 0°-20°S, 90°-70°W, y 3°-8°S, 82°-79°W, que abarca todo el Perú y la costa norte del Perú, respectivamente. Se utilizaron datos imágenes satelitales procedentes de los sensores MODIS, que se encuentran a bordo de los satélites AQUA y TERRA, del sensor SeaWiFS que se encuentra a bordo del satélite SeaStar, del sensor MISR que se encuentra a bordo del satélite TERRA, y del sensor MERIS que se encuentra a bordo del satélite ENVISAT. Se realizaron cálculos de correlaciones, se graficó el coeficiente de Angström versus el espesor óptico del aerosol, para poder clasificar los tipos de aerosoles presentes en la atmósfera de las regiones en estudio.

Palabras clave: MODIS, ENVISAT, espesor óptico, Angström, aerosol

Abstract. The purpose of this work is study the spatial and temporal variability of the optical thickness of aerosols, in the geographical coordinates (0° -20° S, 90° -70° W), and (3° -8° S, 82° -79° W) , which covers all Peru and the north coast , respectively. We used satellite imagery data from MODIS sensors, on board the AQUA and TERRA satellites, SeaWiFS sensor on board the SeaStar satellite, MISR sensor on board the TERRA satellite and sensor MERIS on board the ENVISAT satellite. The correlations were performed, was plotted the coefficient of Angström vs the aerosol optical thickness to classify the types of aerosols in the atmosphere in the regions under study.

keywords: MODIS, ENVISAT, optical thickness, Angström, aerosol

1. Introducción

Los aerosoles son partículas sólidas y líquidas que se encuentran suspendidas en la atmósfera, con tamaños que oscilan entre centenas y milésimas de micras, provienen de la combustión industrial, incendios forestales, fuentes de origen natural como la sal del rocío marino, el polvo de los desiertos, o erupciones volcánicas. La cantidad total de aerosoles que se encuentran suspendidas en el aire varían desde $1\mu\text{g}/\text{m}^3$, valor que se observa sobre los casquetes polares o en la troposfera oceánica libre, hasta $1\text{mg}/\text{m}^3$ valor que se observa en las tormentas de arena o en los humos cargados de ceniza de los incendios forestales (Berrick et al, 2008; Almeida, 2005; Dubovick, et al. 2001; Exposito, 1999). Los atractivos colores de los atardeceres, la calima de los paisajes o de la neblina contaminada (*smog*) de las grandes ciudades, son ocasionados por éstas partículas. Hoy se sabe que los aerosoles juegan un rol importante para la vida en la Tierra, porque modifican el balance radiativo de nuestro planeta. Debido a la composición química y tamaño que presentan los aerosoles, son capaces de absorber y dispersar la radiación solar que incide sobre ellas, modificando el balance de radiación energética. El tamaño de estas partículas es similar al de la longitud de onda de la radiación procedente del Sol, por lo que pueden interactuar eficazmente con ésta, reduciendo la irradiancia solar total que finalmente alcanza la superficie de la Tierra. Los diversos tipos de aerosoles interactúan de diferente forma con la radiación solar, por ejemplo la sal del mar no absorbe la radiación solar, pero el polvo mineral si, el carbón negro absorbe la radiación solar, los aerosoles de sulfato y nitrato, dispersan la radiación solar en cierto grado. Como se

observa muchos aerosoles dispersan la radiación solar hacia el espacio, aumentando el albedo terrestre, surgiendo un enfriamiento, mientras que los aerosoles que absorben la radiación solar (especialmente el carbón negro) aumentan eficazmente el albedo que calienta la atmósfera circundante. La absorción o dispersión de la radiación solar puede ocurrir a diversas alturas de la superficie terrestre, dependiendo del tipo de aerosol, esto ejerce un gran efecto sobre el clima a nivel global y regional de la Tierra (Berrick et al, 2008; Almeida, 2005; Dubovick, et al. 2001; Exposito, 1999). En el Perú la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA), es una de las instituciones que estudia la calidad de aire, informa que las concentraciones anuales, en estos últimos años de la ciudad de Lima, de las partículas menores a 2,5 μm , supera de cuatro a cinco veces más, el valor referencial indicado por la ECA (Estandar de Calidad de Aire), que es de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto demuestra la presencia de gran cantidad de aerosoles, que son nocivas para las personas y para el ambiente. El tener conocimiento de la presencia de aerosoles en la atmósfera es importante, porque está involucrado con el impacto climático local, regional y mundial, como se ha mencionado, en forma directa e indirecta. Los parámetros de estudio más importantes de los aerosoles son el espesor óptico y la distribución de tamaños de las partículas. El espesor óptico es una magnitud adimensional que indica el poder que poseen las partículas de aerosol para atenuar la radiación a una cierta longitud de onda. Este parámetro es fundamental en el estudio del cambio climático. La distribución de tamaño indica la forma en la que las partículas de cierta masa de aire se encuentran distribuidas en función de su radio, esto está relacionado con las propiedades de las nubes (Berrick et al, 2009; Almeida, 2005; Dubovick, et al. 2001; Exposito, 1999). El objetivo del trabajo es analizar la variabilidad espacial y temporal del espesor óptico de los aerosoles sobre la región 0°-20°S de latitud y 90°-70°W de longitud, (Perú) y a la región 8°-3°S de latitud y 82°-79°W de longitud, (Costa Norte).

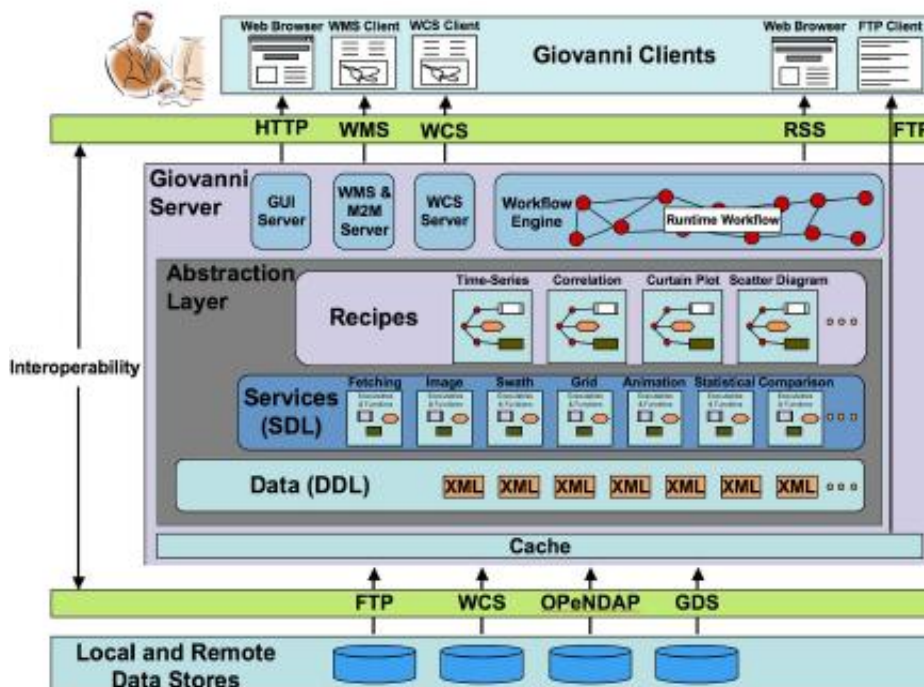


Figura 1. Arquitectura funcional de Giovanni 3. El almacén de datos físicos es mostrado en la parte baja. Los usuarios interactúan vía (arriba) un navegador Web o clientes WMS/WCS (centro) con el servidor Giovanni. El servidor consiste de una capa de abstracción de datos, servicio y servicio compuesto (recetas). Los flujos de trabajo en tiempo de corrida única basado en recetas expuestas vía el GUI son corridas en el servidor. Los datos de entrada son buscados vía los múltiples protocolos. El estatus de procesamiento (opcionalmente vía RSS) y los resultados son retornados a los clientes usuarios en la parte superior. Los datos originales o los resultados intermedios pueden ser recuperados del cache vía FTP tanto como HTTP. (Berrick et al. 2009).

2. Metodología - Adquisición y procesamiento de los datos imágenes

¿Qué es GIOVANNI?

Un factor limitador en la explotación del enorme volumen de datos multisensores de la Ciencia de la Tierra disponible es el tiempo que toma para descargar los datos y entender los formatos, la estructura de los datos, la calidad de la información, y los algoritmos empleados. Si una investigación es de mérito puede requerir una inversión directa y el costo de esta inversión crece sustancialmente cuando son requeridos los datos de múltiples sensores. El Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) ha desarrollado el Goddard Online Interactive Visualization AND aNalysis Infrastructure (Giovanni) para disminuir esos costos directos. Giovanni es una herramienta que explora fácilmente los datos multisensor de la Ciencia de la Tierra usando solo el navegador Web (Berrick et al, 2008, Berrick et al. 2009). Desde el punto de vista de los investigadores, Giovanni está compuesto de un número de interfaces, cada una vigilante para encontrar las necesidades de los campos específicos de las investigaciones en Ciencias de la Tierra. Cada interface, conocido como un caso, proporciona funciones y parámetros aplicables a esas áreas específicas de la Ciencia de la Tierra. Por ejemplo, el caso A-Train proporciona una interface diseñada para la investigación de nubes y aerosoles, utilizando datos desde instrumentos a bordo de los satélites A-Train tales como CloudSat, Aqua, Aura, y CALIPSO. En la Figura 1 se observa en forma esquemática los procesos que se realizan, desde la adquisición de los datos, su procesamiento y su resultado final, que es el que obtienen los usuarios (Berrick et al, 2008, Berrick et al. 2009). Giovanni emplea algoritmos válidos científicamente y un esquema rico para describir los parámetros de los datos. A través de una interface, los usuarios invocan las visualizaciones de un solo y múltiples parámetros, análisis estadístico, y filtrados relacionados a la calidad hasta (actualmente) sobre 1200 parámetros de datos de sensores remotos, mediciones terrestres, y modelos. Al no tener que tratar con múltiples datos con variadas estructuras, resoluciones, formatos, y indicadores de calidad, los usuarios son capaces de lograr resultados significativos muy rápidamente. Giovanni también soporta múltiples protocolos de interoperabilidad y los formatos de los datos permiten acceso a los datos desde muchos suministradores. Estas características relevantes de Giovanni proporcionan a los investigadores con un análisis de propósito general y los servicios de comparación que actúan sobre los datos de alta calidad. Giovanni ha evolucionado desde el éxito de las versiones anteriores que enfatiza un interface sencilla, rápida interpretación de imágenes, y procesamientos válidos científicamente que correctamente toma en cuenta los algoritmos empleados (incluyendo suposiciones subyacentes). Ahora Giovanni está operativo en GES DISC (en esta posición Internet: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov>), Giovanni, Versión 3, está ya soportando investigación científica (Berrick et al. 2009). Los datos del espesor óptico del aerosol promedio mensual procedentes de los sensores MODIS y SeaWiFS, se recuperaron de las páginas Web, Nasa-Ocean, (2009), respectivamente. La Tabla 1 muestra las características de los datos. También se utilizaron datos en otras longitudes de ondas procedentes de los sensores MODIS, MISR, y MERIS, estos datos se pueden encontrar en la siguiente página Web, Nasa-Ocean, (2009). La tabla 2 muestra las características de los datos.

Tabla 1 Características de los datos del Espesor Óptico del Aerosol.

Satélite	Sensor	λ (nm)	Periodo	Región (oceánica)
Aqua	Modis	869	2002-2008	20-0S, 90-70W (Perú); 8-3S, 82-79W (Costa Norte)
SeaStar	SeaWiFS	865	1997-2008	20-0S, 90-70W (Perú); 8-3S, 82-79W (Costa Norte)

Tabla 2 Características de los datos del Espesor Óptico del Aerosol.

Satélite	Sensor	λ (nm)	Periodo	Región (continental y oceánica)
Terra	Modis	550	2000-2008	20-0S, 90-70W (Perú); 8-3S, 82-79W (Costa Norte)
Aqua	Modis	550	2002-2008	20-0S, 90-70W (Perú); 8-3S, 82-79W (Costa Norte)
Envisat	Meris	550	2002-2007	20-0S, 90-70W (Perú); 8-3S, 82-79W (Costa Norte)
Terra	Misr	555	2000-2006	20-0S, 90-70W (Perú); 8-3S, 82-79W (Costa Norte)

Los datos coeficiente de Angström promedio mensual procedentes del sensor MODIS se obtuvieron de la página Web Nasa-Ocean, (2009). La tabla 3 muestra las características de los datos.

Tabla 3 Características de los datos del Coeficiente de Angström.

Satélite	Sensor	α (nm)	Periodo	Región (continental)
Aqua	Modis	470-660	2002-2008	20-0S, 90-70W (Perú); 8-3S, 82-79W (Costa Norte)
Terra	Modis	470-660	2000-2008	20-0S, 90-70W (Perú); 8-3S, 82-79W (Costa Norte)

Se graficaron todas las series temporales para analizar la variabilidad temporal del espesor óptico del aerosol. Se realizaron correlaciones entre los datos adquiridos de los sensores MODIS, a bordo de los satélites AQUA y TERRA, para verificar la confiabilidad de sus datos. Se realizaron gráficas del coeficiente de Angström vs espesor óptico del aerosol, de los datos procedentes del sensor MODIS (AQUA y TERRA) en la longitud de onda de 550 nm, para observar el tipo de partículas que se encuentran presentes en la atmósfera de la regiones en estudio.

3. Resultado y Discusión

3.1 Variabilidad espacial y temporal del espesor óptico del aerosol en 865 nm y 869 nm

En la Figura 2(a) se observa que los valores del espesor óptico a la longitud de onda de 869 nm, procedentes del sensor MODIS -AQUA oscilan entre 0,8 y 0,13. En la Figura 2(b) los valores del espesor óptico a la longitud de onda de 865 nm, procedentes del sensor SeaWiFS - SeaStar oscila entre 0,1 y 0,16. De ambas figuras se observa que las series de tiempo de ambos sensores no muestran relación alguna. De la Figura 2(c) los valores del espesor óptico a la longitud de onda de 869 nm, procedentes del sensor MODIS oscilan entre 0,1 y 0,15. Se observa un valor máximo de 0,18 en agosto del 2005. De la Figura 2(d) los valores del espesor óptico a la longitud de onda de 865 nm, procedente del sensor SeaWiFS oscila entre 0,1 y 0,2. De ambas figuras se observa que las series de tiempo si tienen relación.

3.2 Variabilidad espacial y temporal del espesor óptico del aerosol en 550 nm

De la Figura 2(e) los valores del espesor óptico del aerosol procedentes de los sensores MODIS -TERRA y MODIS -AQUA, oscilan entre 0.1 y 0.2, observándose máximos de 0.35 en setiembre del 2004, un máximo de 0.32 en setiembre del 2005 y 0.28 en setiembre de 2007, para ambas series. El valor del espesor óptico del aerosol procedente del sensor MERIS - ENVISAT, oscila entre 0.2 y 0.38, siendo este último valor del mes de setiembre. Las tres series de tiempo muestran un comportamiento común, se observa que para los meses de enero, febrero y marzo el espesor óptico aumenta, para los meses de abril, mayo y junio, el espesor óptico disminuye, en julio, agosto y setiembre el espesor óptico aumenta y en octubre, noviembre y diciembre nuevamente disminuye. De la Figura 2(f) los valores del espesor óptico del aerosol procedentes de los sensores MODIS –TERRA, MODIS -AQUA y MERIS - ENVISAT, oscilan entre 0.15 y 0.35. Se observa un máximo en los valores de MODIS –TERRA, MODIS -AQUA, de 0,38 en el mes de setiembre en el año 2004, mientras que en la serie procedente del sensor MERIS – ENVISAT se observan puntos máximos de 0.53 para setiembre del 2004 y 0.43 en noviembre del 2005. Las tres

series de tiempo muestran un comportamiento común, se observa que para los meses de enero, febrero y marzo el espesor óptico aumenta, para los meses de abril, mayo y junio, el espesor óptico disminuye, en julio, agosto y setiembre el espesor óptico aumenta y en octubre, noviembre y diciembre nuevamente disminuye.

3.3 Variabilidad espacial y temporal del espesor óptico del aerosol en 555 nm.

De la Figura 2(g) los valores del espesor óptico procedente del sensor MISR – TERRA oscilan entre 0.15 y 0.3. Se observa un máximo de 3.8 para el año 2005 en el mes de setiembre. No se observa un patrón por falta de datos. En la Figura 2(h) los valores del espesor óptico procedente del sensor MISR – TERRA oscilan entre 0.15 y 0.35. Se observa un máximo de 4.2 en octubre del 2005. No se observa un patrón por falta de datos.

3.4 Correlación entre los datos procedentes de MODIS – AQUA y MODIS - TERRA

De las Figuras 3(a) se observa una buena relación entre las series de tiempo, la Figura 3(b) indica una correlación, con $r^2 = 0.9354$. De la Figura 3(c) se observa también una buena relación entre las series de tiempo, la Figura 3(d) indica una correlación, con $r^2 = 0.8911$.

3.5 Relación entre el coeficiente de Angström y el espesor óptico del aerosol

De la Figura 3(e) del resultado obtenido de MODIS – AQUA, se observa poca influencia de las regiones correspondientes a la de continental promedio, continental limpio, continental contaminado y urbanos / industriales, que indican la presencia de aerosoles antropogénicos sobre todo de origen industrial. De la Figura 3(f) muestra el resultado obtenido de MODIS – TERRA, se puede observar que la región de mayor influencia corresponde a la de continental promedio, con la presencia de aerosoles antropogénicos y polvo, también se observa poca influencia en las regiones continental limpio, continental contaminado y urbanos / industriales, que indican la presencia de aerosoles antropogénicos sobre todo de origen industrial. De la Figura 3(g) se tiene el resultado de MODIS – AQUA, se observa que la región de mayor influencia es la de continental promedio, en la que se encuentran los aerosoles antropogénicos y polvo, también se observa poca influencia en la región urbanos / industriales, que indica poca presencia de aerosoles antropogénicos sobre todo de origen industrial. De la Figura 3(h) muestra el resultado obtenido de MODIS – TERRA, se observa que la región de mayor influencia es la de continental promedio, en la que se encuentran los aerosoles antropogénicos y polvo, también se observa poca influencia en las regiones continental contaminado y urbanos / industriales, que indican poca presencia de aerosoles antropogénicos sobre todo de origen industrial.

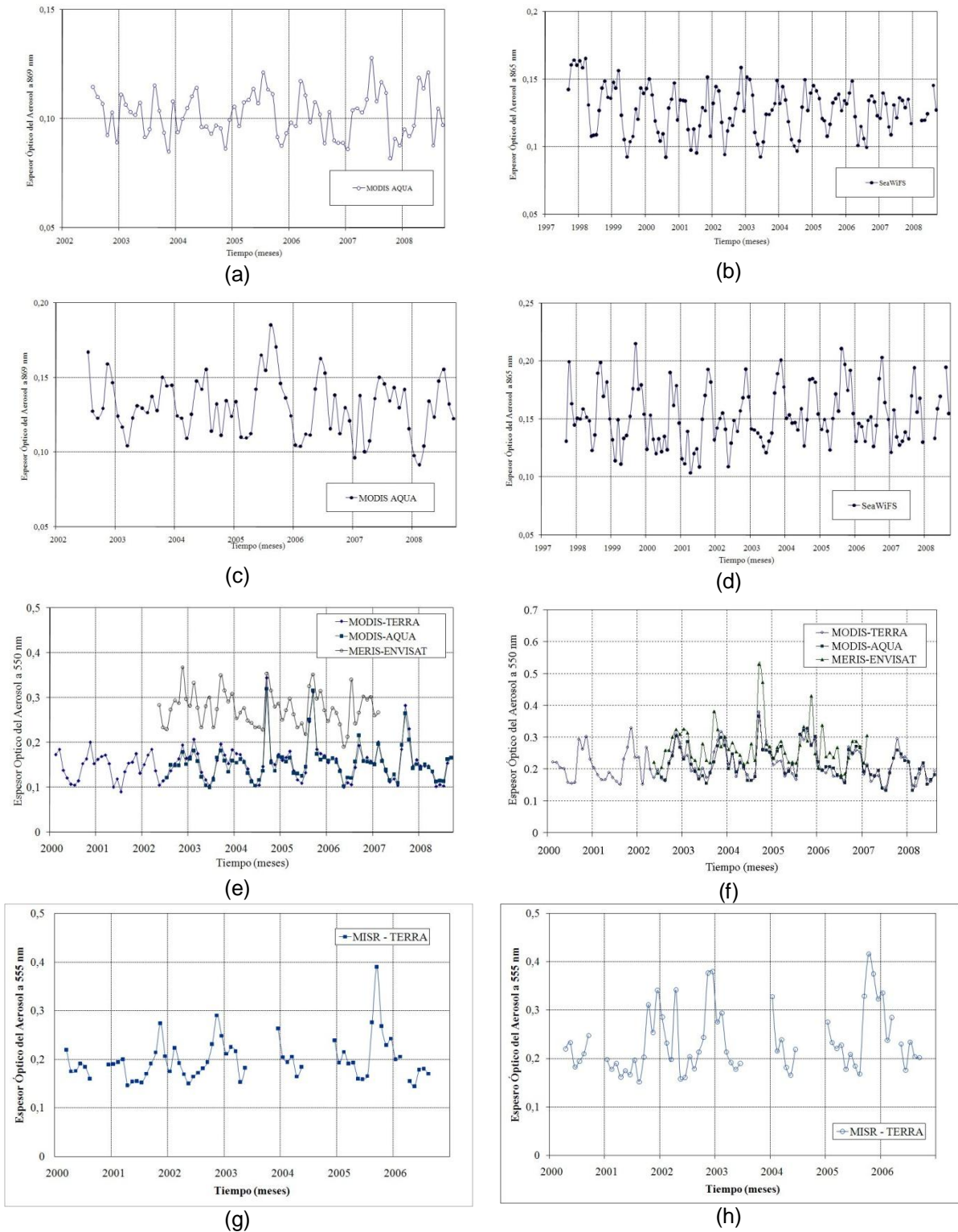
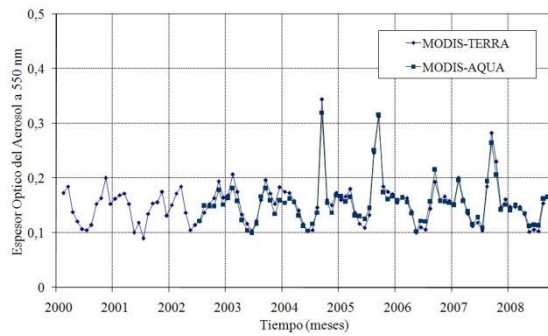
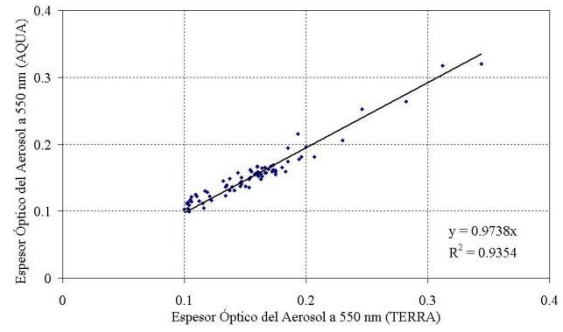


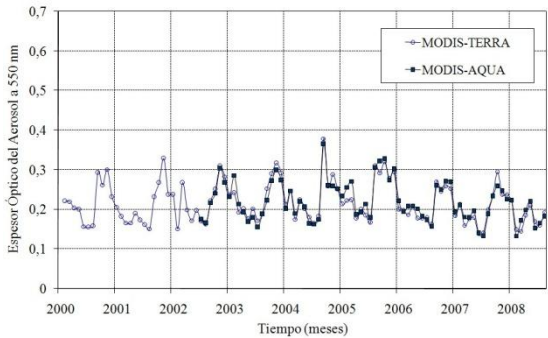
Figura 2 (a) Promedio mensual del espesor óptico del aerosol en la longitud de onda de 869 nm, procedente de MODIS-AQUA, de la región de 0°-20°S de latitud y 90°-70°W de longitud. (b) Promedio mensual del espesor óptico del aerosol en la longitud de onda de 865 nm, procedente de SeaWiFS, de la región de 0°-20°S de latitud y 90°-70°W de longitud. (c) Promedio mensual del espesor óptico del aerosol en la longitud de onda de 869 nm, procedente de MODIS / AQUA, de la región 3°-8°S de latitud y 82°-79°W de longitud. (d) Promedio mensual del Espesor Óptico del Aerosol en la longitud de onda de 865 nm, procedente de SeaWiFS de la región 3°-8°S de latitud y 82°-79°W de longitud. (e) Promedio mensual del espesor óptico del aerosol en la longitud de onda de 550nm, de la región de 0°-20°S de latitud y 90°-70°W de longitud. (f) Promedio mensual del Espesor Óptico del Aerosol en la longitud de onda de 550 nm, de la región 3°-8°S de latitud y 82°-79°W de longitud. (g) Promedio mensual del espesor óptico del aerosol en la longitud de onda de 555 nm, de la región de 0°-20°S de latitud y 90°-70°W de longitud. (h) Promedio mensual del espesor óptico del aerosol en la longitud de onda de 555 nm, de la región de 3° - 8°S de latitud y 82° - 79°W de longitud en el periodo de 2000 a 2006.



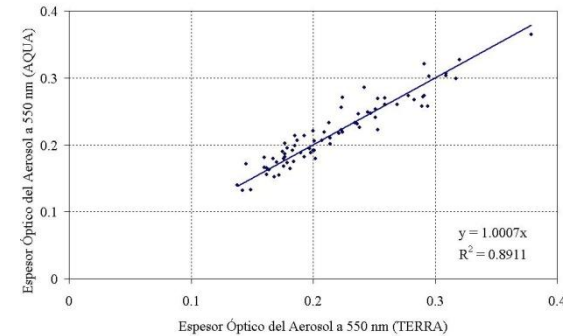
(a)



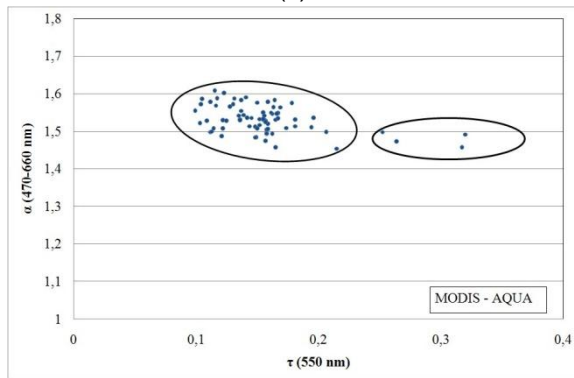
(b)



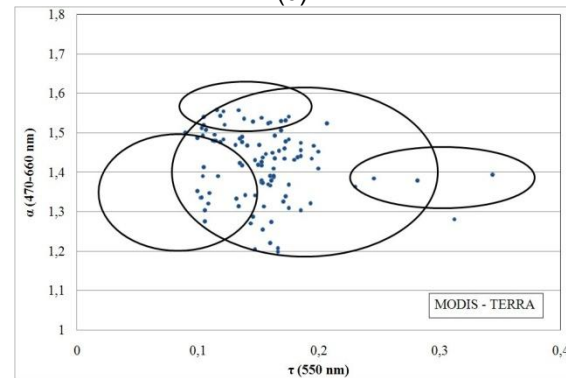
(c)



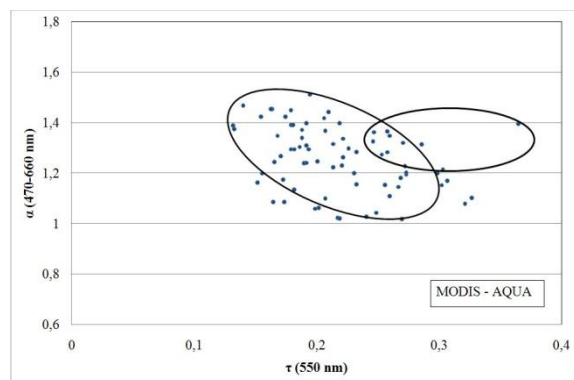
(d)



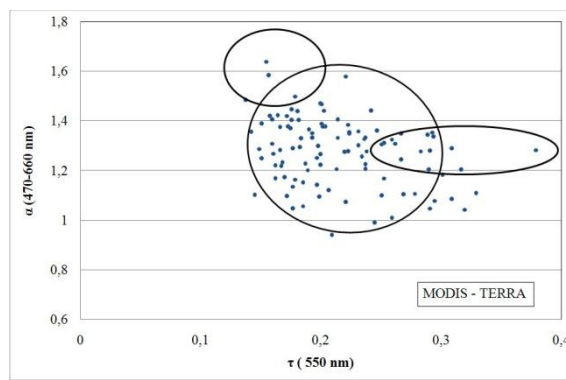
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 3. (a) Promedio mensual del espesor óptico del aerosol en 550nm, MODIS-AQUA y MODIS-TERRA, de la región de 0°-20°S de latitud y 90°-70°W de longitud en 2000-2006. (b) Correlación del promedio mensual del Espesor Óptico del Aerosol en 550nm, entre MODIS-AQUA y MODIS-TERRA, de la región 0°-20°S latitud y 90°-70°W longitud. (c) Promedio mensual del espesor óptico del aerosol en 550nm, de MODIS/AQUA y MODIS/TERRA, de la región 3°-8°S latitud y 82°-79°W longitud. (d) Correlación del promedio mensual del espesor óptico del aerosol en 550nm, entre MODIS-AQUA y MODIS-TERRA, de la región 3°-8°S latitud y 82°-79°W longitud. (e) Relación entre el coeficiente de Angström y el espesor óptico del aerosol para la región 0°-20°S, 90°-70°W, procedente de MODIS/AQUA. (f) Relación entre el coeficiente de Angström y el espesor óptico del aerosol para la región 0°-20°S, 90°-70°W, MODIS/TERRA. (g) Relación entre el coeficiente de Angström y el espesor óptico del aerosol para la región 3°-8°S, 82°-79°W,

4. Conclusiones

La aplicación Web GIOVANNI es una herramienta importante para la investigación de la Ciencia de la Tierra, sus usuarios son capaces de extraer rápidamente los múltiples datos que posee. Los datos de esta web han sido usados para el procesamiento de las imágenes y series de tiempo del espesor óptico en diferentes longitudes de onda y en promedios espaciales y temporales. De los resultados obtenidos se observa una alta correlación entre los datos adquiridos provenientes de los sensores MODIS, a bordo de los satélites AQUA y TERRA. Esta precisión demuestra la confiabilidad de los productos de MODIS. Las series de tiempo de los promedios temporales del espesor óptico del aerosol, en diferentes longitudes de onda y de diferentes sensores, demuestran un comportamiento cíclico observándose máximos en los meses de verano. La relación entre el espesor óptico del aerosol y el coeficiente de Angström, dan información acerca del tipo de partículas presentes en la atmósfera. Los resultados demuestran la presencia de partículas de tipo antropogénico, partículas solubles que surgen de la conversión de gas a partícula (sulfatos, nitratos,) e insolubles (material orgánico) en agua.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el programa INCAGRO del Ministerio de Agricultura en los años 2007-2009. El artículo se basa en la monografía que ha conducido a la licenciatura en Física de la Sra. Penelope Vargas Gargate en la FCF de la UNMSM en julio 2009 (Vargas, 2009) y por tanto se agradece a los miembros del jurado.

Referencias

- Berrick, S., G. Leptoukh, Z. Liu, L. Pham, H. Rui, S. Shen, W.Teng, T. Zhu, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center, Code 902, NASA GSFC, Greenbelt, Maryland 20771, USA. Multi-sensor Distributive on line Processing Visualization and Analysis System. 2008.
- Almeida Castanho, A. Dardes de Propiedades ópticas das partículas de aerosol e uma nova metodología para a obtenção de espessura óptica via satélite sobre São Paulo, Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Física para obtenção do título de Doutor em Ciências, 2005.
- Dubovik, O., B. Holben, T. F. Eck, A. Smirnov, Y. J. Kaufman, M. D. King, D. Tanre, I. Slutsker, Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations, *J. Atm.Sci.*,59,590-608.2001.
- Expósito G. F. J., Determinación del espesor óptico de aerosoles mediante técnicas de teledetección en la región de Canarias. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias Físicas, 1999.
- Berrick, S.W., G. Leptoukh, J.D. Farley, and H. Rui. Giovanni: A Web Service Workflow-Based Data Visualization and Analysis System. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, NO. 1, January 2009.
- Vargas P. (2009). Variabilidad espacial y temporal del espesor óptico de los aerosoles sobre Perú usando imágenes de satélite. Monografía de la Tesis de Licenciatura en Física. Facultad de Ciencias Físicas. UNMSM.
- Nasa-Ocean, 2009: reason.gsfc.nasa.gov/ops/Giovanni/ocean.aqua.shtml