

INTERCOMPARACIÓN DE ESPESORES ÓPTICOS DE NUBES MEDIDOS CON DISTINTOS INSTRUMENTOS EN EL OBSERVATORIO ATMOSFÉRICO DE LA PATAGONIA AUSTRAL

CLOUD OPTICAL DEPTH INTERCOMPARISON MEASURED WITH DIFFERENT INSTRUMENTS AT SOUTHERN PATAGONIA ATMOSPHERIC OBSERVATORY

Elian Wolfram^{a,b*}, Jacobo Salvador^{a,c}, Facundo Orte^a, Pablo Vasquez^b, Raul D'Elia^a, Daniela Bulnes^a, Oscar Bonfili^d, Lidia Otero^a, Pablo Ristori^a, Eduardo Quel^a

^a Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones CEILAP (CITEDEF-CONICET)
Juan Bautista de La Salle 4397 – (B1603ALO) Villa Martelli – Prov. Buenos Aires – Argentina

^b Universidad Tecnológica Nacional, FRBA.

^c Universidad Nacional de la Patagonia Austral, Unidad Académica Río Gallegos, Santa Cruz, Argentina.

^d Oficina de pronósticos de Río Gallegos, Servicio Meteorológico Nacional

Recibido: 02/12/2013; Aceptado: 25/04/2014

El espesor óptico de las nubes es la propiedad óptica fundamental en la determinación del balance energético radiativo de la Tierra. Pese a esto, este parámetro es pobremente modelado en los modelos climáticos y es muy difícil de medir con técnicas de sensado remoto desde tierra usando métodos tradicionales. Es por ello que se considera crucial un incremento de las observaciones y la precisión del espesor óptico de las nubes tanto para la validación como para el mejoramiento de las predicciones de los modelos climáticos. En el Observatorio Atmosférico de la Patagonia Austral (OAPA), emplazado en la ciudad santacruceña de Río Gallegos, se realizan mediciones de radiación solar global en plano horizontal en distintas longitudes de onda para la determinación de espesores ópticos de nubes con distintos tipos de radiómetros. Por ejemplo, la sinergia entre la medición del radiómetro multifiltro de ancho de banda moderado GUV-541 con un modelo de transferencia radiativa permite estimar el espesor óptico efectivo de la nube. Este parámetro fue comparado con el espesor óptico de la nube derivado a partir de la radiancia cenital difusa medida por el fotómetro solar CIMEL instalado en el OAPA junto a los demás radiómetros. Este instrumento, originalmente diseñado para la medición y caracterización de parámetros ópticos de aerosoles, tiene además la posibilidad de ser utilizado para la medición del espesor óptico de nube. Este producto está en fase experimental y por ello la intercomparación con mediciones independientes tiene un grado de importancia fundamental. En el presente trabajo se intercompararon las mediciones del espesor óptico de nubes calculadas con el CIMEL y el radiómetro GUV entre septiembre de 2011 a marzo de 2012, es decir los meses de primavera-verano del hemisferio sur. Se pudo determinar la factibilidad de la aplicación del modo nube en Río Gallegos, aunque se observó un subestimación de los valores de espesores ópticos medidos por el fotómetro solar CIMEL en comparación con los medidos por el GUV. La descripción de la cobertura nubosa presente en los días intercomparados se realizó con los datos de observaciones actinométricas de la nubosidad realizadas por la oficina meteorológica del SMN en dicha ciudad y datos del satélite para días específicos de intercomparación.

Palabras clave: espesor óptico de nube, radiación, sensado remoto

The optical thickness of the cloud optical property is critical in determining the radiative energy balance of the Earth. Despite this, this parameter is poorly modeled in climate models and is very difficult to measure with remote sensing techniques from the ground using traditional methods. For this reason it is crucial to increment the number of observations and the precision of the cloud optical thickness both for validation and for the improvement of the predictions of climate models. Atmospheric Observatory in Southern Patagonia (OAPA), located in the city of Rio Gallegos, Santa Cruz , perform measurements of global solar radiation on horizontal plane at different wavelengths for determining cloud optical thicknesses with different types of radiometers. For example, the synergy between the radiometer measurement bandwidth multifilter GUV-541 moderate and a radiative transfer model allows to estimate the effective optical thickness of clouds. This parameter was compared with the cloud optical thickness derived from diffuse zenithal radiance measured by the CIMEL sun photometer installed on the OAPA with other radiometers. This instrument, originally designed for the measurement and characterization of aerosol optical parameters, can also be used to measure cloud optical thicknesses. This product is experimental and therefore, the independent measurements intercomparison has a degree of importance. In the present work, measurements of cloud optical thickness calculated with the CIMEL and radiometer GUV were intercompared between September 2011 and March 2012, which means during southern spring – summer time. It was determined the feasibility of applying the cloud mode in Río Gallegos, although it was observed underestimation of cloud optical thickness measured by the sun photometer Cimel when it was

ewolfram@gmail.com

compared with GUV measurements. The description of the cloud cover in the days of this intercomparison was performed with data actinometric cloudiness observations made by the meteorological office in that city (SMN) and satellite data for specific intercomparison days.

Keywords: cloud optical depth; radiation, remote sensing

I. INTRODUCCIÓN

Las nubes tienen dos importantes efectos sobre el balance radiativo del sistema Tierra-atmósfera. Como resultado de las propiedades de dispersión (scattering) de la radiación, las nubes reflejan una gran cantidad de la radiación solar entrante a nuestro planeta de vuelta al espacio. En promedio global, el albedo o reflexión hacia el espacio de la parte nublada de nuestro planeta es de alrededor de un 50%, mientras que el albedo medio de la parte despejada del planeta es de tan solo 14%¹. Por otro lado la presencia de nubes también influencia el flujo de la radiación infrarroja que escapa hacia el espacio. Una nube densa puede absorber más del 90% de la radiación infrarroja en una profundidad de tan solo 50 m².

Consecuentemente existen dos efectos opuestos de las nubes sobre el balance de la radiación global: un efecto de albedo enfriando el planeta y un efecto invernadero calentándolo.

El espesor óptico de la nube es la propiedad óptica fundamental en la determinación del balance de energía radiativa del planeta Tierra. No obstante esto, esta propiedad es muy pobremente modelada por los modelos climáticos^{3,4}.

Mientras que un número de satélites observan las nubes en forma rutinaria, las observaciones desde tierra son limitadas y escasas. Solo existen dos redes operativas que proveen mediciones de nubes en el mundo, una dependiente del programa de medición de la radiación atmosférica (ARM) con sitios en USA, Alaska y la región del Pacífico tropical este, y la otra es Cloudnet con estaciones en el Reino Unido, Francia y Holanda.

Para incrementar las capacidades de observación de las nubes desde tierra, se ha propuesto utilizar la red de fotómetros solares robotizados AERONET⁵ de NASA, originalmente diseñada para medir desde tierra propiedades ópticas y microfísicas de los aerosoles, para la medición de propiedades ópticas de las nubes, aprovechando los momentos en que el sol directo está bloqueado por las nubes, y las mediciones de aerosoles no son posibles.

El método de medición del espesor óptico de la nube (COD) con el fotómetro solar se basa en la medición de radiancia cenital difusa en dos longitudes de onda (en el visible, VIS y el infrarrojo cercano, NIR) y hace uso de la variabilidad de la reflectancia de suelo con la vegetación en este rango espectral donde las propiedades ópticas de las nubes son prácticamente idénticas⁶.

El presente trabajo, tiene como finalidad evaluar la factibilidad de utilizar el fotómetro solar CIMEL instalado en el Observatorio Atmosférico de la Patagonia Austral (OAPA) para la determinación de espesor óptico de las nubes, un producto para lo cual este instrumento no fue originalmente diseñado.

ewolfram@gmail.com

II. DESCRIPCIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL

Con el objetivo de contribuir a los esfuerzos internacionales por seguir de cerca la evolución del fenómeno del agujero de ozono, la División Lidar del Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones (CEILAP) dependiente de (MINDEF-CONICET) instaló en la ciudad de Río Gallegos en el año 2005, una serie de instrumentos para el sensado remoto de la atmósfera. Debido a que uno de los objetivos primarios era la observación del ozono estratosférico, el lidar de absorción diferencial fue uno de los instrumentos más importantes de este sitio, pero no el único.

Conjuntamente con el lidar, se instalaron una serie de radiómetros para monitorear la radiación solar en plano horizontal que llega a la superficie de la tierra, y en principio estudiar la anticorrelación entre el contenido de ozono y la radiación UV. Luego de varias campañas, el sitio de observación se convirtió en un emplazamiento permanente de sensado remoto de la atmósfera en el sur de nuestro país, constituyéndose así el Observatorio Atmosférico de la Patagonia Austral (OAPA).

El OAPA está emplazado dentro de la Base Aérea Militar de Río Gallegos a unos 10 km del centro de la ciudad santacruceña (51 ° 55'S, 69 ° 14'W). En el mismo opera la Estación de Sensado Remoto Pasivo (ESRP) constituida por un conjunto de radiómetros solares de banda ancha y moderada. Los datos son registrados por los dataloggers con una cadencia temporal de un minuto, la cual resulta adecuada para el estudio de variaciones rápidas como las producidas por las nubes en la irradiancia solar. La ESRP está formada por radiómetros de banda ancha sensibles al UVA (320-400 nm) y UVB (290-320 nm) e irradiancia solar total (300-3000 nm) conectados al mismo datalogger y un radiómetro de banda moderada de 5 canales (GUV-541) que mide la irradiancia solar global en cinco longitudes de onda (305, 313, 320, 340 y 380 nm). Este instrumento tiene un colector de irradiación de 2,1 cm de diámetro, con una hoja externa trapezoidal de teflón cubierto con una ventana de cuarzo. Estas tienen una respuesta direccional cercana a la curva de respuesta coseno. Los errores típicos en las mediciones son 0% a -5% a partir de 0° a 70° (considerando la referencia cero como la normal a la superficie del colector), 10% a -10% a partir de 71 ° a 85, y -10% a -30% de ° 86 a 89 °. Este instrumento registra datos en forma automática cada un minuto en forma permanente, y constituye un instrumento muy útil para el monitoreo de la radiación solar UV en superficie.

Otro de los instrumentos operativos en el OAPA es un fotómetro solar marca CIMEL para la medición de

espesor óptico de aerosoles. El mismo es parte de la red AERONET. El instrumento CIMEL es un radiómetro para realizar mediciones de la radiancia solar y del cielo con un campo de visión de $1,2^\circ$ (FOV) a distintas longitudes de onda predefinidas centradas a 440, 675, 870 y 1020nm. Las mediciones de sol directo son principalmente utilizadas para determinación de los momentos de cielo despejado y para calcular el espesor óptico de los aerosoles, mientras que las mediciones de la radiancia del cielo son mayormente usadas para obtener las propiedades ópticas y microfísicas de los aerosoles tales como la distribución de tamaño y las funciones de fase entre otras.

Cuando las nubes bloquean completamente el sol las mediciones de radiancia solar directa y del cielo no son apropiadas para determinar las propiedades ópticas de los aerosoles. En estas situaciones, el radiómetro vuelve a su posición de espera hasta la próxima medición, en lo que se llama modo sueño (sleep mode). Chiu y sus colaboradores⁶ propusieron utilizar estos tiempos “muertos” del instrumento para observar las nubes. A este nuevo protocolo de medición lo llamaron “modo nube” (cloud mode), y en el mismo, los radiómetros AERONET apuntan directamente al cenit (Fig. 1) y realizan diez mediciones de la radiancia cenital con intervalos de 9 segundos para cada longitud de onda, las cuales se obtienen girando la rueda de filtros interferenciales delante del detector.



Figura 1. Fotómetro solar CIMEL instalado en el OAPA realizando una medición del espesor óptico de nubes.

III. METODOLOGÍA

En el presente trabajo se compararon los espesores ópticos de las nubes medidos por dos métodos totalmente independientes con el objetivo de evaluar si el modo nube del fotómetro CIMEL es factible de utilizar en el OAPA.

Como ya dijimos, en el modo nube el fotómetro solar CIMEL apunta al cenit y toma mediciones de la radiancia cenital difusa en distintas longitudes de onda. Esta ewolfram@gmail.com

metodología se basa en el marcado contraste espectral que las superficies recubiertas con vegetación tienen en la reflectancia del suelo alrededor de $0,7 \mu\text{m}$. Por ejemplo, en las longitudes de onda de 440 y 870 nm, la reflectancia de una superficie con vegetación se incrementa por un factor de 5 aproximadamente, mientras que las propiedades ópticas de las nubes son prácticamente iguales. Usando esta idea, Marshak y sus colaboradores⁷ desarrollaron una nueva técnica de obtener el espesor óptico de las nubes en situaciones con presencia de nubes y suelos cubiertos con vegetación verde, midiendo la radiancia cenital desde el suelo en dos bandas espectrales a cada lado de la función escalón del albedo de la vegetación cerca de $0,7 \mu\text{m}$.

El método para la obtención del espesor óptico de nubes utilizado en los fotómetros solares de la red AERONET fue descrito en detalle en el trabajo de Chiu y sus colaboradores⁶. Debido a que no existe una relación unívoca entre la radiancia cenital en una única longitud de onda y el espesor óptico de nubes (COD), dos longitudes de onda a 440 y 870 nm son utilizadas para reducir esta ambigüedad. Combinando la radiancia cenital a estas dos longitudes de onda y un modelo de transferencia radiativa es posible determinar el COD. Los valores reportados en este trabajo del COD corresponden a un valor medio de 10 mediciones instantáneas.

Por otro lado, la combinación de las mediciones de flujos radiativos hemisféricos como los realizados por el instrumento GUV con modelos de transferencia radiativa permite obtener productos geofísicos derivados, como la columna total de ozono, el índice UV y el espesor óptico de nubes⁸.

Las nubes provocan una gran atenuación dentro de la radiación UV, tanto UV-A como UV-B, aunque la radiación UV-A es prácticamente insensible al contenido de ozono, mientras que la otra es altamente dependiente del contenido de este gas en la atmósfera. Es por ello que es posible utilizar las mediciones espectrales dentro del UV-A combinadas con cálculos de modelos de transferencia radiativa para estimar el espesor óptico de las nubes. El método consiste en calcular con el modelo la irradiancia espectral para diferentes espesores ópticos de nube hasta que el valor calculado coincida con la medición. El espesor óptico calculado de esta manera debe ser interpretado como el espesor óptico de una nube estratificada equivalente.

El procedimiento puede ser aplicado a mediciones con instrumentos de filtro como por ejemplo el GUV 541, donde el voltaje medido con un canal dentro del UV-A, típicamente 380 nm es comparado con el cálculo de la irradiancia espectral pesada con la respuesta espectral del filtro considerado para varios espesores ópticos, hasta que la medición y la irradiancia modelada coincidan.

Para complementar la descripción de la situación de la cobertura nubosa presente en los diferentes casos de

estudio considerados en este trabajo, se incluyeron las observaciones actinométricas realizadas en el Oficina de pronósticos y observación del Aeropuerto de Río Gallegos, dependiente del Servicio Meteorológico Nacional, situada a aproximadamente 1,5 km del OAPA e imágenes satelitales del canal visible del satélite GOES 12.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El modo nube fue activado en el CIMEL instalado en el OAPA en abril de 2011, y los datos disponibles hasta al día de hoy son de carácter preliminar (nivel 1.5) ya que aún no ha sido aplicado el proceso de control final de calibración realizado por NASA en sus instalaciones del Goddard Space Fly Center, en Greenbelt.

En el presente trabajo el período de intercomparación de los espesores ópticos se extendió entre septiembre de 2011 a marzo de 2012, es decir prácticamente las estaciones de primavera y verano austral, donde la probabilidad de suelos con vegetación verde es más factible, aunque esta puede ser una de las grandes limitaciones de la aplicabilidad de este método en la Patagonia austral.

La caracterización de la cobertura nubosa presente en los casos de estudio se realizó por medio de las mediciones de la irradiancia solar global (ToSI) medida por un piranómetro Kipp&Zonen CM-11 y su respectiva comparación con un modelo paramétrico de radiación total. Los espesores ópticos efectivos de las nubes (COD) medidos con el fotómetro CIMEL/AERONEL fueron comparados con los medidos por el radiómetro GUV-541, con un tiempo de muestreo de un minuto.

Debido a que el modo nube del CIMEL se activa cuando el instrumento apunta al disco solar para realizar una medición del espesor óptico de aerosoles y el mismo se ve bloqueado por una nube, la cadencia máxima de las observaciones del espesor óptico de nubes son cada 15 minutos aproximadamente. En este trabajo se ha considerado la incerteza máxima de las mediciones realizadas por el fotómetro CIMEL en un 17%, que proviene de la propagación de los errores asociados con la incerteza en la estimación del albedo, el modelo, y el instrumento en sí mismo como lo reportaron los creadores de esta metodología de medición⁶.

Para la comparación entre los COD del Aeronet (COD_AER) y los COD del GUV (COD_GUV) se utilizó como criterio de coincidencia temporal entre ambos instrumentos el ángulo cenital solar mínimo entre las mediciones de los dos instrumentos. Debido a que la cadencia de mediciones del COD por el GUV es de un minuto, como máximo, las discrepancia temporal entre una medición con los dos instrumentos es de medio minuto. Cabe recordar que ambos instrumentos están sincronizados con respecto a un reloj patrón externo.

Para ejemplificar los acuerdos y discrepancias en los valores de COD medidos por ambos instrumentos, se han ewolfram@gmail.com

elegido días específicos de estudio que presentan coberturas nubosas diferentes sobre Río Gallegos, en cuanto a tipo de nubes y variabilidad temporal de las mismas.

Casos de estudio

El primer día de intercomparación específico escogido fue el 28 de enero de 2012. En este día, el cielo se presentó despejado durante la mañana, y recién alrededor de las 11 hs hora local (14 UT) aparecieron formaciones nubosas cumuliformes, que modularon la radiación solar global registrada con el piranómetro produciendo atenuaciones y realces con respecto a los valores modelados representativos de los niveles de radiación de cielo despejado (Fig. 2 panel superior). Luego de las 17 hs UT, las nubes presentaron formaciones estratiformes ópticamente más densas las cuales persistieron a lo largo de la tarde. La comparación con el modelo permite distinguir claramente los momentos donde las nubes bloquean el disco solar y atenúan la componente solar directa y difusa. Durante este período las nubes produjeron una atenuación de la radiación solar global hasta en un 70% como puede verse de la comparación con el modelo.

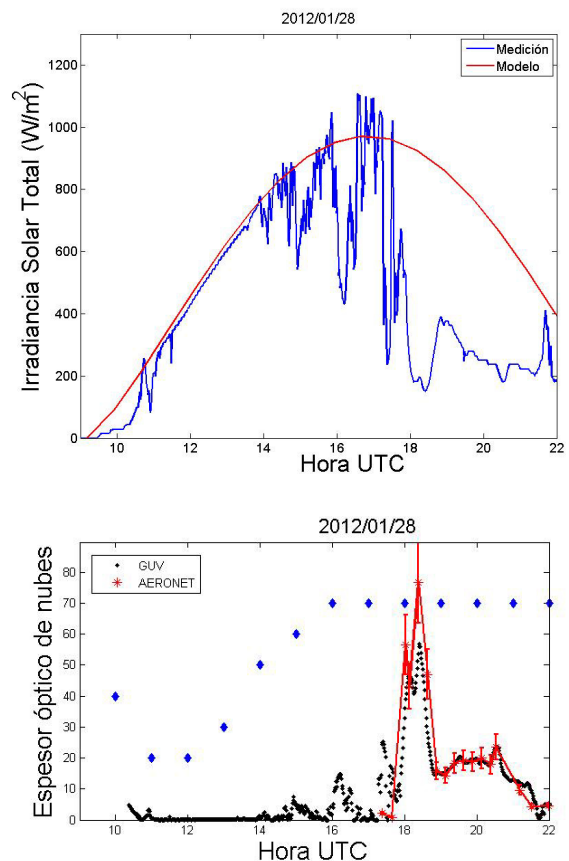


Figura 2. Variación diaria del flujo solar visible (panel superior) medido con un piranómetro (línea azul) y modelo (línea roja). En el panel inferior se puede ver el espesor óptico de nubes medido con GUV (puntos negros) y AERONET (línea roja) para ese mismo día. Los puntos azules corresponden a la cobertura nubosa registrada por el observador meteorológico.

En este día, el fotómetro solar CIMEL solo midió en el modo nube a partir de las 17:30 hs (UT). La cobertura nubosa registrada por el observador meteorológico de la oficina de pronósticos del SMN del aeropuerto de Río Gallegos, a una distancia aproximada de 1,5 km del OAPA, fue de 2 octas a las 12 hs UT aumentando a 7 octas hacia las 18 hs UT. Esta situación de la cobertura nubosa parcial dejó situaciones en que el disco solar no estuvo bloqueado por las nubes y el instrumento utilizó estos momentos para medir espesor óptico de aerosoles.

Después de las 17:30 hs (UT), el fotómetro CIMEL comenzó a medir el espesor óptico de las nubes cada 15 minutos aproximadamente durante el resto de las horas de sol presentes en ese día. Es posible ver como el fotómetro CIMEL logró medir los cambios abruptos en el incremento de los espesores ópticos de las nubes alrededor de las 18:30 UT presentando muy buena coincidencia con los valores medidos por el GUV (Fig. 2, panel inferior).

Las imágenes satelitales del GOES 13 correspondientes a las 12 UT y las 18 UT de ese día, confirman la ausencia de nubes por la mañana y el paso de nubes medias y altas estratiformes, principalmente altocúmulos y cirrostratos a partir del mediodía, engrosándose hacia las últimas horas del día (Fig. 3). El instrumento MODIS a bordo del satélite Aqua de NASA midió un espesor óptico de 12 a las 19 hs UT, similar a los valores medidos por los dos instrumentos desde tierra.

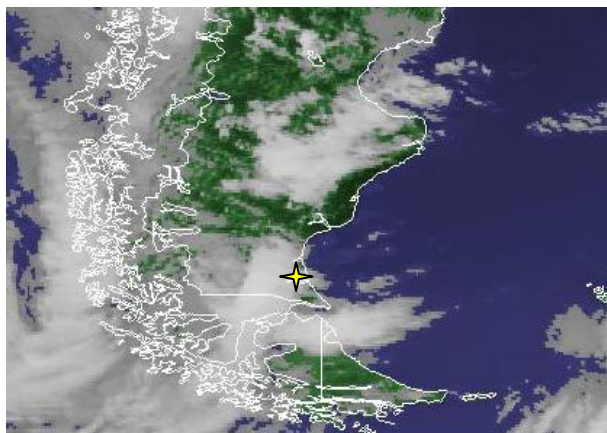
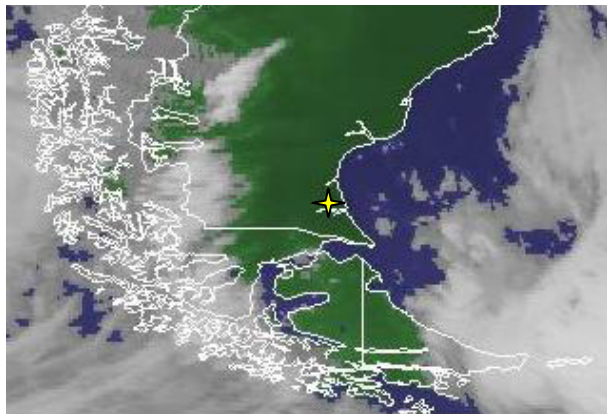


Figura 3. Imágenes del canal visible del satélite GOES 13 correspondientes al día 29 de enero de 2012 a las 12 Hs UT (superior) y a las 18 Hs UT (inferior). La posición del OAPA se marca con el asterisco amarillo.

El segundo día particular de estudio seleccionado fue el 3 de febrero de 2012, donde la situación de la cobertura nubosa fue inversa al caso anterior, es decir mayor cobertura nubosa por la mañana y las horas del mediodía, despejándose hacia la tarde.

En este caso de estudio, el fotómetro solar CIMEL logró seguir la variación abrupta del espesor óptico de las nubes cerca del mediodía, pasando de valores de COD 10 a las 14 hs UT a COD 50 alrededor de las 18 hs UT (Fig. 4).

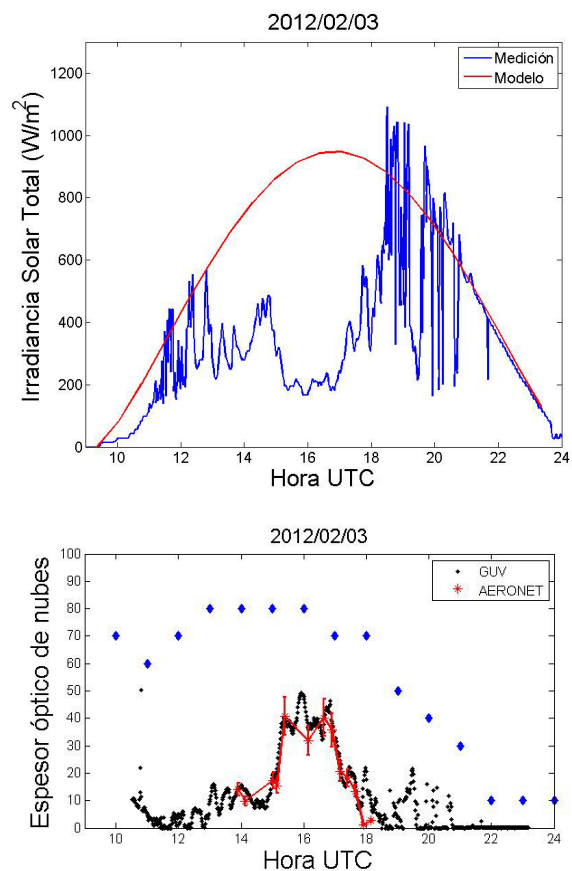


Figura 4. Idem figura 2 para el día 3 de febrero de 2012

Por último, se seleccionó como caso de estudio particular el día 9 de febrero de 2012, donde el cielo estuvo cubierto todo el día, con un COD medio de 20 y máximos de 60 alrededor de las 15:30 hs UT, producto de una combinación de stratocúmulos, 5 octas de altocúmulos y una capa de cirrostratos (Fig. 5). Vemos como en este día, el fotómetro solar midió gran cantidad de veces a lo largo de la jornada, y los espesores ópticos medidos fueron coincidentes con los calculados por el radiómetro GUV.

Discusión

Hasta aquí, los días de intercomparación seleccionados muestran una buena correlación entre las mediciones independientes de los espesores ópticos efectivos medidos por los dos instrumentos.

Sin embargo, en ciertas mediciones el fotómetro solar CIMEL subestimó los valores de los espesores ópticos en comparación con los medidos por el radiómetro GUV. Un ejemplo de esto puede observarse en el Figura 6 correspondiente al día 2 de febrero de 2012, donde a partir de las 17 hs UT las formaciones nubosas de altoestratos produjeron espesores ópticos de entre 20 y 30 con picos de hasta 50. Es posible observar como el fotómetro solar CIMEL subestimó los COD medidos entre las 19 y las 20 hs UT.

Este tipo de discrepancias pudo observarse en forma sistemática principalmente con valores de COD menores a 15, lo que producen un apartamiento de la recta de pendiente unidad en la comparación COD AER y COD GUV realizada con toda la base de datos de mediciones simultáneas de los dos instrumentos durante el período de estudio que abarcó el presente trabajo (Fig. 7).

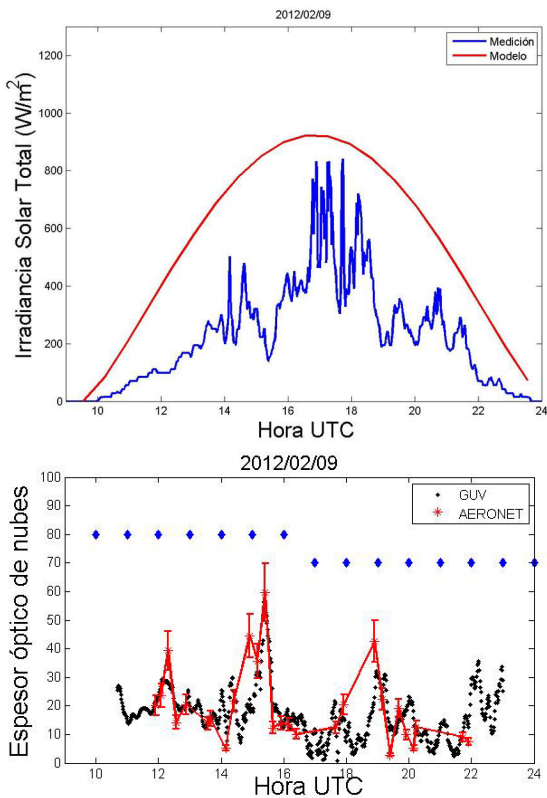


Figura5. Idem figura 2 para el día 9 de febrero de 2012

Las ecuaciones deben centrarse en la columna y con su número de orden entre paréntesis, alineado por derecha.

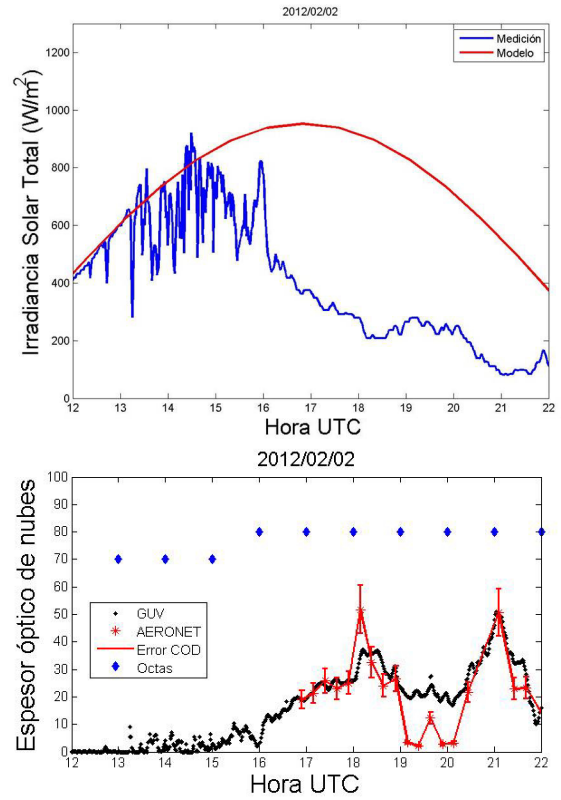


Figura 6 Idem figura 2 para el día 2 de febrero de 2012

Comparación de los COD de los dos instrumentos para todas las mediciones disponibles del año 2012.

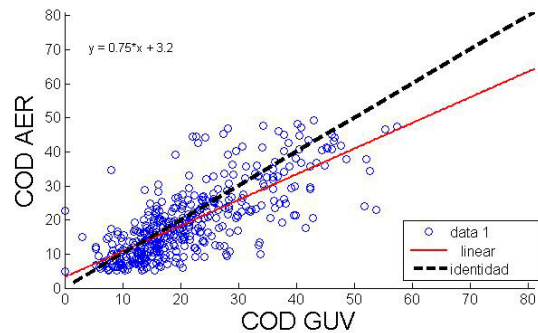


Figura 7. Comparación COD Aeronet con COD GUV

Más allá de estas discrepancias encontradas en las comparaciones de las mediciones del espesor óptico de nubes entre los dos instrumentos, un histograma de las diferencias absolutas entre el COD GUV y el COD AER muestra que el 82% del total de las mediciones comparadas caen dentro del rango de diferencias absolutas entre -7,5 a 20, confirmando el sesgo hacia de subestimación del COD del fotómetro solar, pero demostrando poca dispersión de las mediciones intercomparadas.

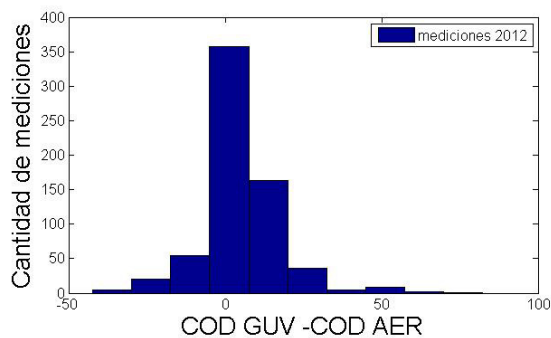


Figura 8. Histograma de las diferencias absolutas entre COD GUV y COD Aeronet

III. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se presentaron los resultados de la intercomparación de los espesores ópticos de nubes medidos por primera vez en el OAPA, Río Gallegos con el fotómetro solar CIMEL de la red AERONET de NASA, operando bajo el protocolo de modo nube.

La comparación con las mediciones independientes del espesor óptico de nubes realizadas con el radiómetro de banda moderada GUV 541, y la utilización de las mediciones del flujo visible en plano horizontal medidas con un piranómetro y compradas con un modelo paramétrico permitieron identificar diferentes coberturas nubosas presentes en los días específicos de comparación seleccionados. La confirmación de la cobertura nubosa y el tipo de nubes presente se realizó por medio de las observaciones actinométricas del observador meteorológico del aeropuerto de Río Gallegos cercano al OAPA.

En general el fotómetro solar CIMEL fue capaz de medir con buen acuerdo los espesores ópticos de nubes presentes y detectar las variaciones rápidas a lo largo del día en diferentes tipos de nubosidad y cobertura nubosa. Como era esperable, por el tipo de mediciones que implica la metodología de medición del COD con el fotómetro solar a partir de la radiancia cenital difusa atrapada entre el suelo con vegetación y la base de las nubes, las formaciones estratiformes homogéneas de nubes medias y altas como altoestratos y cirroestratos, fueron las que presentaron mejores coincidencias.

Se pudo observar, que el fotómetro solar CIMEL subestimó valores de COD sobre todo para nubes finas con espesores menores a 15, aunque las diferencias

absolutas relativas entre los dos instrumentos presentaron poca dispersión.

Este trabajo demuestra que el modo nube (Cloud mode) de los protocolos experimentales de la red AERONET para los fotómetros solares CIMEL, es factible de utilizar en la Patagonia austral, al menos entre los meses de primavera y verano, donde la vegetación de la estepa patagónica, aunque con poco componente de verde, presenta un rango espectral marcado entre la reflectancia del suelo entre el infrarrojo cercano y el visible como el método lo requiere.

Se pretende ampliar este trabajo una vez que los datos estén disponibles para otras estaciones y que hayan sido revisados y recalibrados.

IV. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la red AERONET por el cálculo de los espesores ópticos de nubes del fotómetro solar utilizados en este trabajo; a la JICA y al CONICET por el apoyo prestado para el mantenimiento del OAPA. Al personal técnico de la División Lidar del CEILAP por el mantenimiento del fotómetro solar CIMEL.

V. REFERENCIAS

- 1 - Forster, et al. 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing In Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor, and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA..
- 2 - Estupiñan, J.G., Raman, S., Crescenti, G.H., Streicher, J.J. and Barnard, W.F. 1996, J. of Geophys. Res., vol.101, no.D11, pp.16807-16816.
- 3 - Zhang, M. H., et al. (2005), J. Geophys. Res., 110, D15S02, doi:10.1029/2004JD005021.
- 4 - Bender, F., H. Rodhe, R. Charlson, A. Ekman, and N. Loeb (2006), Tellus, 58A, 320–330.
- 5 - Holben et al (1998), Remote Sens. Environ., 66,1– 16.
- 6 - Chiu et al (2010), radiance, J. Geophys. Res., 111, D16201, doi:10.1029/2005JD006843.
- 7 - Marshak, A, Y Knyazikhin, KD Evans, and WJ Wiscombe. 2004. Science 61:1911-1925
- 8 - K. Stamnes, J. Slusser, M. Bowen, App. Opt. 30, 4418-4426, 1991.