

Atenuación de la irradiancia directa espectral debida a la presencia de cirros en el Observatorio de Izaña

García-Cabrera, R.D.^(1,2), Cuevas, E.⁽²⁾, Barreto, A.^(3,2,1), Ramos, R.⁽²⁾, Bayo, C.⁽²⁾, Arbelo, M.⁽⁴⁾, Cachorro, V.E.⁽¹⁾, López, C.⁽⁵⁾, Yela, M.⁽⁶⁾

⁽¹⁾ Grupo de Óptica Atmosférica, Universidad de Valladolid, Valladolid, España. rosa@goa.uva.es

⁽²⁾ Centro de Investigación Atmosférica de Izaña (CIAI), Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), España.

⁽³⁾ Cimel Electronique, París, Francia.

⁽⁴⁾ Grupo de Observación de la Tierra y la Atmosfera (GOTA), Universidad de La Laguna, España.

⁽⁵⁾ Sieltec Canarias S.L., La Laguna, Tenerife, España.

⁽⁶⁾ Departamento de instrumentación e investigación atmosférica. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Madrid, España.

Resumen: En este trabajo presentamos casos de estudio sobre la atenuación de la irradiancia directa espectral medida con el espectrorradiómetro EKO-MS 711 debido a la presencia de nubes altas (tipo cirros) en el Observatorio de Izaña (IZO; 2400 m s.n.m.) en la isla de Tenerife (Islas Canarias, España). Para identificar este tipo de nubes hemos utilizado como herramientas auxiliares las imágenes de la cámara de todo cielo (SONA) y la evolución temporal de la señal corregida en rango medida con el LiDAR. Además hemos utilizado el modelo de transferencia radiativa LibRadtran para simular la irradiancia sin la presencia de nubes, dando como parámetros de entrada el espesor óptico de aerosoles (AOD), el vapor de agua y la columna total de ozono medidos en IZO. Los resultados muestran que la irradiancia directa en el rango visible (400-800 nm) y en el rango espectral completo de medida del espectrorradiómetro (300-1100 nm) disminuye dependiendo del tipo de nubes altas. Así para el caso de cirros la disminución es del 10%, mientras que para cirrostratos la disminución es menor al 5%.

Palabras clave: irradiancia espectral directa, cirros, cirrostratos, atenuación, EKO MS-711, LiDAR, SONA.

Attenuation of spectral direct irradiance due to the presence of cirrus clouds at the Izaña Observatory

Abstract: In this work we present the attenuation of spectral direct irradiance performed with the EKO MS-711 spectroradiometer due to the presence of high-level clouds (cirrus type) at the Izaña Observatory (IZO; 2400 m a.s.l.), Tenerife Island (Canary Islands, Spain). Auxiliary images from the sky camera (SONA) and the temporal evolution of the LIDAR range-corrected signal have been used to identify this type of clouds. We have also used the LibRadtran radiative transfer model to simulate the irradiance without the presence of clouds, giving as input parameters the aerosol optical depth (AOD), water vapour and total ozone column measured at IZO. The results show that the spectral direct irradiance in the visible range (400-800 nm) and the full spectral range of the spectroradiometer (300-1100 nm) decreases depending on the type of high-level clouds, 10% for cirrus while the decreased observed for cirrostratus is less than 5%.

Keywords: direct irradiance spectral, cirrus, cirrostratus, attenuation, EKO MS-711, LiDAR, SONA.

1. INTRODUCCIÓN

La principal fuente de energía que alimenta el clima de nuestro planeta es la radiación solar y la mayoría de los cambios que tienen lugar en el clima se encuentran relacionados, en mayor o menor medida, con cambios en la radiación que llega a la superficie de la tierra. El conocimiento de la interacción entre la radiación y los componentes de la atmósfera, tales como nubes, los aerosoles, gases, etc., son cruciales para una correcta comprensión del clima. En este trabajo estudiaremos la interacción de las nubes, en particular, las nubes altas (tipo cirros) con la radiación solar. Este tipo de nubes representan una pequeña fracción de la nubosidad total en la atmósfera terrestre. Sin embargo, son únicas en el sentido que pueden provocar un calentamiento del sistema Tierra-Atmósfera, a través de dos efectos opuestos, reflejando la radiación de onda corta proveniente del sol (efecto albedo) o apantallando

la radiación de onda larga proveniente de la superficie terrestre (efecto invernadero) (IPCC, 2013). Además las nubes altas tenues pueden contaminar las medidas de espesor óptico de aerosoles (Cuevas et al., 2018) por lo que es necesario caracterizar la atenuación que producen en la irradiancia directa espectral solar.

En la literatura podemos encontrar diversos estudios de la atenuación de la irradiancia en diferentes rangos espectrales, por ejemplo en el rango ultravioleta, Seckmeyer et al. (1996) observaron una atenuación del 45% en el rango UVA y de un 60% en el rango UVB mientras que Blumthaler et al. (1994) encontraron en una estación de alta montaña (3576 m s.n.m) que a 50° de ángulo cenital solar (SZA) la irradiancia global disminuía un 10%.

En este trabajo analizamos la atenuación de la irradiancia directa espectral ocasionada por nubes altas medida con el espectrorradiómetro EKO-MS 711.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN E INSTRUMENTACIÓN

2.1. Observatorio de Izaña

El Observatorio de Izaña (IZO) está localizado en la isla de Tenerife (Islas Canarias, España, 28,3°N, 16,5°W, 2373 m s.n.m) y está gestionado por el Centro de Investigación Atmosférico de Izaña (CIAI) que pertenece a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (<http://izana.aemet.es>).

En 1984, IZO se incorpora a la Red de Vigilancia de la Contaminación de fondo (BAPMoN, *Background Air Pollution Monitoring Network*), para más tarde en 1989 entra a formar parte del programa de Vigilancia Atmosférica Global (VAG, *Global Atmosphere Watch*) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Además, IZO colabora de forma activa con diferentes redes internacionales, tales como la *Network for the Detection of Atmospheric Composite Change* (NDACC) desde 1999, de la red *Precision Filter Radiometer* (GAW-PFR) desde 2001 y es *Regional Brewer Calibration Centre for Europe* (GAW RBCC-E) desde 2003. Además desde 2004 pertenece a la Red *AErosol RObotic NETwork* (AERONET), incorporándose en 2005 a la red *MicroPulse Lidar* (MPLNet), ambas redes de NASA. En 2009 se incorporó a la red *Baseline Surface Radiation* (BSRN). Recientemente (2015) la Comisión para Instrumentos y Métodos de Observación (CIMO) de la OMM nombró al Observatorio de Izaña como banco de pruebas para instrumentos de teledetección de aerosoles y vapor de agua (WMO, 2014).

El Observatorio presenta unas óptimas condiciones para el estudio de la radiación, ya que su altitud, y la presencia de una inversión de temperatura localizada casi permanente por debajo de su nivel, permiten unas condiciones representativas de troposfera libre con un gran número de días despejados y limpios. La gran transparencia y estabilidad de la atmósfera permiten la realización de calibraciones mediante la técnica *Langley Plot* (Toledano et al., 2018) de diferentes tipos de espectrorradiómetro que miden radiación solar, aerosoles, agua precipitable, ozono, y otros componentes atmosféricos.

2.2. Instrumentación

Espectrorradiómetro EKO MS-711

El espectrorradiómetro EKO MS-711 está diseñado para medir irradiancia global espectral en el rango comprendido entre 300 y 1100 nm cada 0,4 nm con una anchura a media altura (FWMH) de 7 nm. A este instrumento se le ha añadido un colimador que permite medir irradiancia directa espectral (Cuevas et al., 2017).

LiDAR

El LiDAR utilizado en este trabajo es un Micro-pulse lidar (MPL), que pertenece al Área de Investigación Atmosférica del INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) y opera en Santa Cruz de Tenerife (52 m s.n.m.) en colaboración con CIAI-AEMET (Córdoba et al., 2011; Berjón et al., 2018). Este sistema emite pulsos de baja potencia (7-10 μ J), con una alta frecuencia de repetición (2500 Hz) a una única longitud de onda (523 nm).

Cámara de todo cielo (SONA)

La cámara SONA ha sido desarrollada por SIELTEC-Canarias y permite capturar, clasificar y procesar imágenes de todo cielo, cubriendo un campo de visión de 180° con una frecuencia de 5 minutos (González et al., 2013).

3. METODOLOGÍA

Una vez identificada la presencia de nubes altas con la ayuda de la cámara SONA y el LiDAR (Figura 1), hemos determinado y analizado la evolución diaria de la irradiancia directa (DNI) medida con el EKO MS-711 a una longitud de onda determinada (500 nm), para el 29/03/2017 (Figura 2). En este día despejado entorno al mediodía solar, se apreciaron nubes altas, por encima de 8 km, a primeras horas de la mañana y a partir de las 16:00 UTC (Figura 1). Se trataba de un día con baja turbiedad ya que, según los datos de AERONET, el promedio de espesor óptico de aerosoles (AOD) a 500 nm era de 0,038.

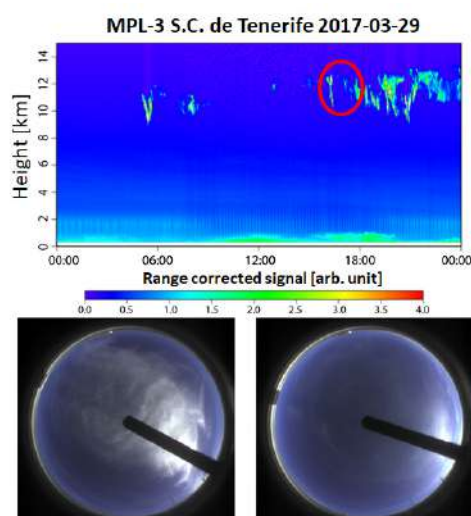


Figura 1. Evolución temporal de la señal corregida en rango medida con el LiDAR el 29/03/2017 e imágenes tomadas con la cámara SONA a las 16:10 y 17:10 UTC en el Observatorio de Izaña.

En la Figura 2 se observa que en torno a las 16:00 y 17:00 UTC hay una disminución de la irradiancia directa, que coincide con la presencia de nubes detectadas por el LiDAR y las imágenes de la cámara SONA (Figura 1). Estas nubes, localizadas entre 10 y 12 km aproximadamente, son nubes cirros y cirrostratos. Los cirros son nubes separadas en forma de filamentos blancos y delicados, o bancos o bandas estrechas, blancas o casi blancas. Estas nubes tienen una apariencia fibrosa (semejante a cabellos), o de brillo sedoso o ambos a la vez, mientras que los cirrostratos forman un velo nuboso transparente y blanquecino, de aspecto fibroso o liso, que cubren total o parcialmente el cielo y que producen generalmente halos (WMO, 1993).

Para estudiar la atenuación de la irradiancia directa (DNI_{CE}) hemos utilizado el modelo de transferencia radiativa, LibRadtran (Mayer y Kylling (2005); Emde et al. (2016)) con el fin de evaluar cómo afecta este tipo de nubes a la irradiancia espectral directa que llega a la superficie. La atenuación se determinó a partir de la ecuación 1:

$$DNI_{CE} = \frac{(DNI - DNI_{CS})}{DNI_{CS}} \cdot 100 \quad (1)$$

donde DNI es la irradiancia espectral directa medida por el espectrorradiómetro y DNI_{CS} es la irradiancia espectral simulada con el modelo LibRadtran sin considerar las nubes.

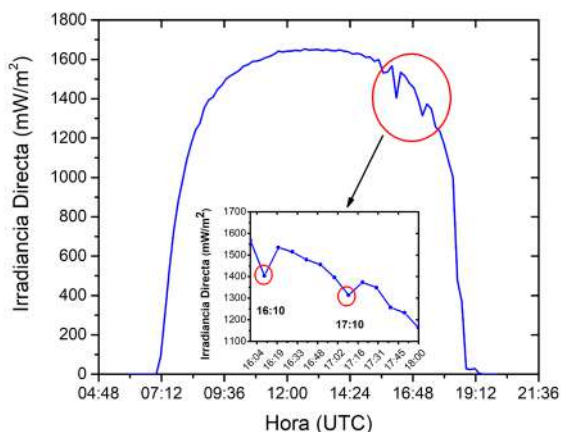


Figura 2. Evaluación diaria de la irradiancia directa a 500 nm medida con el espectrorradiómetro EKO-MS 711 el día 29/03/2017 en el Observatorio de Izaña..

Para analizar la bondad del modelo (Figura 3), se simuló momentos despejados del día de estudio, en particular, a las 11:00 UTC (SZA 39,7°) y las 13:30 (SZA 25,1°). Los parámetros de entrada utilizados en el modelo fueron el espesor óptico de aerosoles, el vapor de agua y la columna total de ozono, todos ellos medidos *in situ* en la estación de Izaña con diferentes técnicas (García et al. (2014, 2019)). Comparando la irradiancia directa medida por el espectrorradiómetro y la simulada por el modelo en el rango visible (400-800 nm) y en el rango de medida del espectrorradiómetro (300-1100 nm) se obtuvieron diferencias inferiores al 0,5% en ambos rangos espectrales.

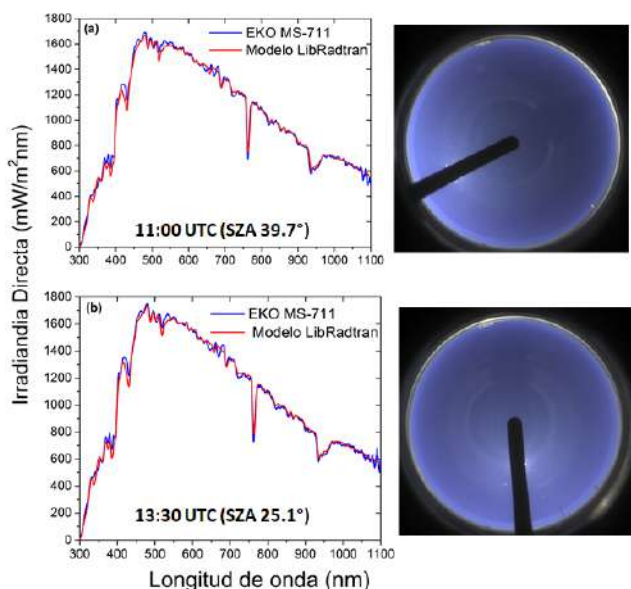


Figura 3. Comparación entre las medidas de irradiancia espectral directa medidas con el espectrorradiómetro EKO MS-711 (línea azul) y las simuladas con el modelo LibRadtran (línea roja) el 29/03/2017 en la estación de Izaña a las (a) 11:00 UTC (SZA 39,7°) y (b) 13:30 UTC (SZA 25,1°) junto a las imágenes tomadas por la cámara SONA.

4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados muestran que la presencia de nubes tipo cirros producen una disminución en la irradiancia directa de 9,7% y 10,2% para los rangos visible (400-800 nm) y el rango comprendido entre 300-1100 nm, respectivamente, a las 16:10 UTC (SZA 49,4°) y de 3,9% y 4,6% a las 17:10 (SZA 62,0) (Tabla 1; Figura 4). Estos resultados están en buen acuerdo coinciden con los obtenidos por Blumthlaer et al. (1994) en una estación de alta montaña.

La diferencia en la atenuación es debida a los diferentes tipos de nubes altas que registramos en cada uno de los momentos. Como se observa en las imágenes de la SONA (Figura 4), a las 16:10 tenemos nubes más densas de tipo cirros, situados entre 10,9 y 12,5 km, mientras que a las 17:10 se observa una capa de cirrostratos más delgada situada entre los 11,6 y los 12,4 km. Sin duda, el espesor de las nubes influye en el grado de atenuación de la irradiancia, así para las 16:10 tenemos un espesor de los cirros de 1,6 km, mientras que a las 17:10 el espesor se reduce a 0,8 km, según se observa en los datos del LIDAR.

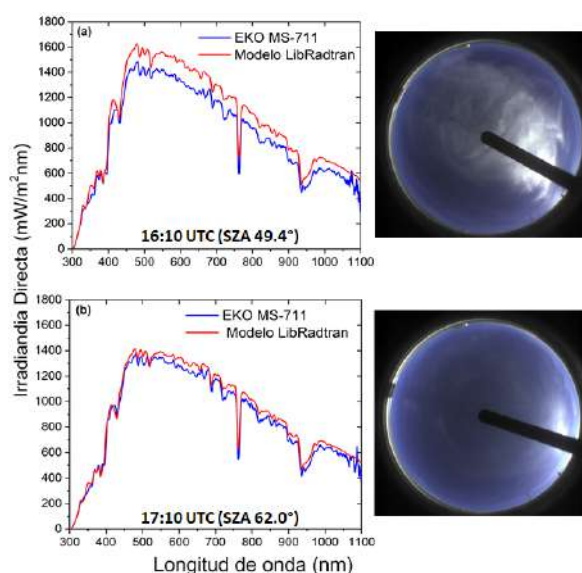


Figura 4. Comparación entre las medidas de irradiancia espectral directa medidas con el espectrorradiómetro EKO MS-711 (línea azul) y las simuladas con el modelo LibRadtran (línea roja) el 29/03/2017 en la estación de Izaña a las (a) 16:10 (SZA 49,4°) y (b) 17:10 UTC (SZA 62,0°) junto a las imágenes tomadas por la cámara SONA.

Tabla 1. Resultados de la atenuación de la irradiancia espectral directa medidas con el espectrorradiómetro debida a la presencia de nubes altas en el Observatorio de Izaña el 29/03/2017.

Hora UTC	Rango VIS (400-800 nm)			Rango: 300-1100 nm		
	DNI (W/m²)	DNI _{CS} (W/m²)	DNI _{CE} (%)	DNI (W/m²)	DNI _{CS} (W/m²)	DNI _{CE} (%)
16:10	491,1	543,6	-9,7	728,4	811,5	-10,2
17:10	468,7	487,6	-3,9	698,8	732,2	-4,6

Estos resultados preliminares han servido para demostrar la capacidad del espectrorradiómetro EKO MS-711 para poder abordar el análisis de la atenuación

de cirros junto con información adicional proporcionada por otros sistemas de observación (cámara de todo cielo, LIDAR MPL y fotómetros solares) y con simulaciones con LibRadtran. Una vez implementada la metodología expuesta en este trabajo se realizará un estudio sistemático de, al menos un año, sobre la atenuación que ocasionan nubes altas sobre la irradiancia directa normal solar tanto en atmósfera muy limpia como en atmósfera turbia con diferente contenido de polvo mineral del Sáhara.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Berjón, A., Barreto, A., Hernández, Y., Yela, M., Toledano, C., Cuevas, E.: A 10-year characterization of the Saharan Air Layer lidar ratio in the subtropical North Atlantic, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2018-1315>, in review, 2019.
- Blumthaler, M., Ambach, W., Salzgeber, M. Effects of cloudiness on global and diffuse Theor Appl Climatol 50, 23-30, 1994.
- Córdoba-Jabonero, C., Sorribas, M., Guerrero-Rascado, J.L., Adame, J. A., Hernández, Y., Lyamani, H., Cachorro, V., Gil, M., Alados-Arboledas, L., Cuevas, E., de la Morena, B.: Synergetic monitoring of Saharan dust plumes and potential impact on surface: a case study of dust transport from Canary Islands to Iberian Peninsula, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 3067-3091, <https://doi.org/10.5194/acp-11-3067-2011>, 2011.
- Cuevas, E., Romero-Campos, P.M., Kouremeti, N., Kazadzis, S., García, R.D., Barreto, A., Guirado-Fuentes, C., Ramos, R., Toledano, C., Almansa, F., Gröbner, J. Aerosol Optical Depth comparison between GAW-PFR and AERONET-Cimel radiometers from long term (2005–2015) 1-minute synchronous measurements, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/amt-2018-438>, 2018.
- García, R.D., García, O.E., Cuevas, E., Cachorro, V.E., Romero-Campos, P.M., Ramos, R., de Frutos, A. M. Solar radiation measurements compared to simulations at the BSRN Izaña station. Mineral dust radiative forcing and efficiency study, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119, 179–194, <https://doi.org/doi:10.1002/2013JD020301>, 2014.
- García, R.D., Cuevas, E., Ramos, R., Cachorro, V.E., Redondas, A., Moreno-Ruiz, J.A. Description of the Baseline Surface Radiation Network (BSRN) station at the Izaña Observatory (2009–2017): measurements and quality control/assurance procedures, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 8, 77-96, <https://doi.org/10.5194/gi-8-77-2019>, 2019.
- González, Y., López, C., Cuevas, E. Cloud nowcasting: Motion analysis of all sky images using velocity fields, *Instrum. View*, pp 14, 61, 2013.
- IPCC: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://doi.org/doi:10.1017/CBO9781107415324>, 2013.
- Mayer, B., Kylling, A. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 1855–1877, <https://doi.org/10.5194/acp-5-1855-2005>, 2005.
- Seckmeyer, G., Erb, R., Albold, A. Transmittance of a cloud is wavelength-dependent in the UV-range. *Geophysical Research Letters*, 23(20), 2753-2755, 1996.
- Toledano, C., González, R., Fuertes, D., Cuevas, E., Eck, T.F., Kazadzis, S., Kouremeti, N., Gröbner, J., Goloub, P., Blarel, L., Román, R., Barreto, Á., Berjón, A., Holben, B.N., Cachorro, V.E.: Assessment of Sun photometer Langley calibration at the high-elevation sites Mauna Loa and Izaña, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 14555-14567, <https://doi.org/10.5194/acp-18-14555-2018>, 2018.
- WMO: Atlas internacional de nubes (Volumen I). Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial, OMM-N° 407, Ginebra, Suiza, 1993.
- WMO: Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation: (CIMO guide). 2014. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.