

OPTIMIZACIÓN DE UN RADIÓMETRO DE BANDA ANCHA EN EL MARCO DE LA FUTURA MISIÓN EarthCARE

A. BODAS SALCEDO, J.F. GIMENO FERRER y E. LÓPEZ-BAEZA

*Grupo de Climatología desde Satélites. Unidad de Investigación de Teledetección.
Departament de Termodinàmica. Facultat de Física. Universitat de València.*

RESUMEN

La futura misión EarthCARE (*Earth Clouds, Aerosols, and Radiation Explorer*), planeada conjuntamente por las agencias espaciales europea y japonesa, tiene por objetivo la obtención de perfiles de nubes y aerosoles de modo global, con el fin de mejorar la parametrización en los modelos climáticos. Para mejorar esta parametrización es necesario que los cálculos derivados sean consistentes con el balance de radiación en el techo de la Atmósfera, medido por un radiómetro de banda ancha a bordo del satélite. Para obtener medidas precisas de este balance es necesario el uso de modelos angulares. Mostramos que estos modelos presentan un rendimiento dependiente de la geometría de observación, existiendo ciertos ángulos de observación que permiten obtener una medida más precisa del balance de radiación en el techo de la atmósfera.

Palabras clave: EarthCARE, nubes, balance de radiación terrestre, ADM.

ABSTRACT

EarthCARE (Earth Clouds, Aerosols, and Radiation Explorer) is a future European and Japanese joint mission, with the objective of obtaining clouds and aerosols profiles at global scale in order to improve their parameterisations in climate models. To improve these parameterisations the computations have to be done in a radiatively consistent manner with the radiation budget at the top of the Atmosphere, measured by a broadband radiometer onboard the satellite. Angular models are needed so that this budget can be measured accurately. We show how the performance of these models depends on the viewing geometry, existing preferred observing angles, which allow obtaining more accurate top of Atmosphere Earth radiation budget measurements.

Keywords: EarthCARE, clouds, Earth radiation budget, ADM.

1. INTRODUCCIÓN

En el tercer informe del *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2001), las predicciones del aumento de la temperatura en el año 2100 varían desde 1.4 a 5.8 K, dependiendo de los diferentes escenarios (hipótesis de desarrollo social) y modelos considerados. Pero una gran parte de esta incertidumbre en las predicciones es causada por el conocimiento limitado de la física atmosférica, principalmente en lo referente a las interacciones de las nubes y los aerosoles con la radiación.

Es en este marco donde nace EarthCARE, misión conjunta entre Europa y Japón, que se encargará de medir por primera vez, de forma global y consistente desde el punto de vista radiativo, perfiles de nubes y aerosoles. Una tarea fundamental para poder mejorar las parametrizaciones de las nubes y aerosoles en los modelos climáticos es que reproduzcan el balance de radiación en el techo de la atmósfera. Este balance será medido de forma independiente con el BBR (*Broad-Band Radiometer*), radiómetro de banda ancha a bordo de EarthCARE. Presentamos un estudio de optimización de este tipo de sensores, basado en la dependencia de los modelos de distribución angular (ADM, de *Angular Distribution Model*) con la geometría de observación.

La sección 2 presenta una descripción de la misión EarthCARE, así como las características de sus sensores, especialmente el BBR, en el que centramos nuestro trabajo. La sección 3 describe la metodología usada para llevar a cabo la optimización del sensor, y muestra algunos resultados significativos. Finalmente, la sección 4 presenta un resumen y las conclusiones obtenidas.

2. LA MISIÓN EarthCARE

El ESA *Living Planet Programme* incluye dos tipos de misiones complementarias: las orientadas a investigación, llamadas misiones *Earth Explorer*, y las orientadas a servicios operacionales o misiones *Earth Watch*. Hay dos clases de misiones *Earth Explorer*, las *Core* y las *Opportunity*. Las primeras son misiones de gran coste económico que tratan fenómenos complejos y de amplio interés científico, mientras que las segundas son misiones más baratas y tratan problemas más limitados. Las misiones son propuestas, definidas, evaluadas y recomendadas por la comunidad científica.

Las misiones *Core* y *Opportunity* son implementadas en ciclos independientes de cuatro años. Las dos misiones *Core* seleccionadas en el primer ciclo de los *Earth Explorer* fueron: *Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer* (GOCE), y la misión *Atmospheric Dynamics Mission* (ADM-Aeolus), cuyos lanzamientos están previstos en 2005 y 2007, respectivamente. El primer ciclo en el caso de las *Opportunity* también está en marcha, y cristalizará con los lanzamientos de las misiones *CryoSat* y *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS) en 2004 y 2006, respectivamente.

EarthCARE es una de las tres misiones *Core* seleccionadas para su paso a la fase A de estudio tras el *Earth Explorers Granada 2001 User Consultation Meeting*, que tuvo lugar en Granada en octubre de 2001. El lanzamiento de las misiones seleccionadas en este segundo ciclo está previsto entre 2008 y 2010.

Debido a que gran parte de este trabajo se ha realizado en el marco de los estudios de optimización de la misión EarthCARE, particularmente de aquéllos concernientes a la optimización del radiómetro de banda ancha (LÓPEZ BAEZA et al., 2001), presentaremos una breve descripción de los objetivos de la misión EarthCARE y de los instrumentos que irán a bordo de la plataforma. Asimismo, dedicaremos un apartado a describir el radiómetro de banda ancha de EarthCARE con más profundidad. Una descripción más detallada de la misión y los instrumentos puede encontrarse en ESA (2001).

2.1. Objetivos

EarthCARE ha sido definida con los objetivos científicos de determinar por primera vez, y de forma consistente desde el punto de vista radiativo, la distribución global de perfiles verticales de nubes y aerosoles. Así, proporcionará datos de entrada esenciales en la modelización numérica y estudios globales de:

- Divergencia de energía radiativa.
- Interacciones entre aerosoles, nubes y radiación.
- Distribución vertical de agua y hielo, y su transporte por las nubes.
- Solapamiento vertical de los campos de nubes, y las interacciones entre nubes y precipitación.

Los efectos radiativos de nubes y aerosoles dependen de diferentes parámetros, entre los que se pueden destacar:

- Estructura macroscópica de las nubes (altura, espesor, inhomogeneidad horizontal, etc).
- Contenido en agua o hielo de las nubes.
- Estructura microfísica de las nubes.
- Parámetros de aerosoles (espesores ópticos, tamaños y composición).

Para alcanzar los objetivos propuestos, es crucial medir de forma consistente desde el punto de vista radiativo tantos de estos parámetros como sea posible. La figura 1 muestra esquemáticamente los objetivos de la misión.

2.2. Contribución de la misión

Actualmente, la mayoría de los parámetros de nubes y aerosoles se infieren mediante teledetección pasiva, y casi no existe información de la estructura vertical de los campos de nubes y aerosoles.

Las agencias espaciales japonesa y europea han aunado esfuerzos en la misión EarthCARE para hacer volar en una misma plataforma dos instrumentos activos y tres pasivos:

- **ATLID** (*Atmospheric Lidar*): el ATLID se requiere para medir perfiles verticales de capas de nubes ópticamente finas y aerosoles, así como la altitud de los límites de las nubes. Además, discriminará la retrodispersión molecular (Rayleigh) de la señal de retorno de procedente de las partículas de nubes y aerosoles (Mie). Está diseñado para proporcionar, con gran resolución y precisión, sondeos verticales de la atmósfera desde el suelo hasta unos 20 km de altitud con 100 m de resolución vertical.

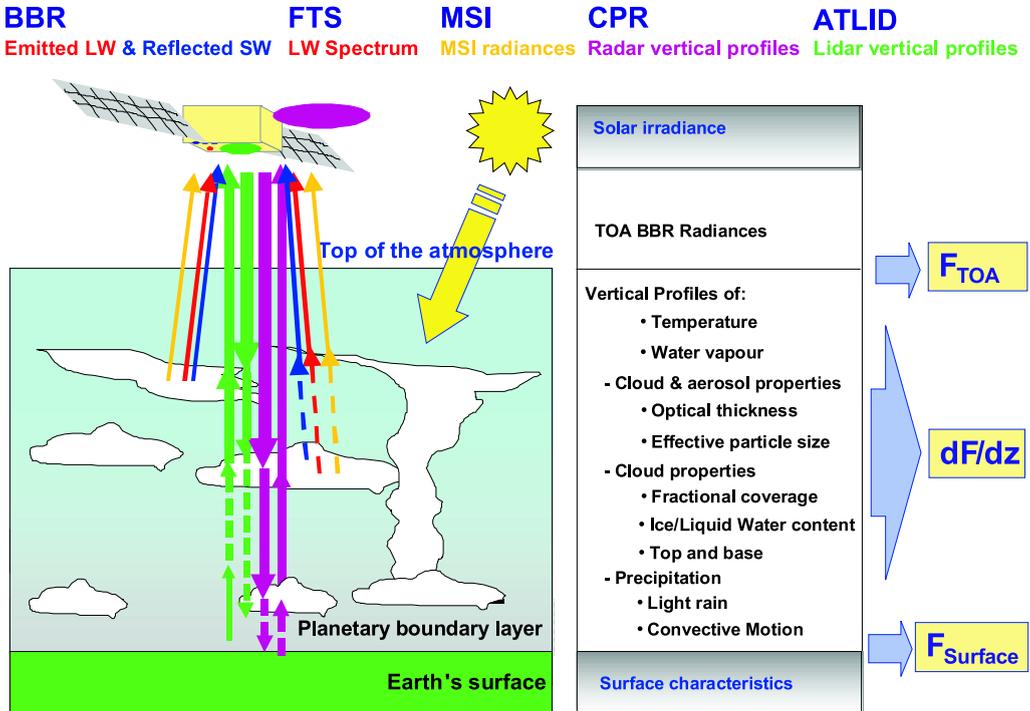


Figura 1: Objetivos de la misión EarthCARE. El objetivo principal es obtener perfiles verticales de nubes, aerosoles, vapor de agua y temperatura para así determinar gradientes de flujos radiativos en la Atmósfera, así como flujos en la superficie. Los flujos radiativos de onda corta y onda larga en el techo de la Atmósfera se medirán directamente.

- **CPR (Cloud Profiling Radar):** el objetivo del CPR es proporcionar perfiles verticales de estructuras de nubes en el punto subsatélite a lo largo de su trayectoria. Una característica única del CPR es la emisión de pulsos de microondas que penetran profundamente en las capas de nubes, regiones inobservables por sensores pasivos y no alcanzadas por la señal del lidar. El CPR proporcionará una resolución vertical de 500 m, y horizontal de 650 m a 1 km.
- **MSI (Multi-Spectral Imager):** el MSI obtendrá imágenes en 4 bandas solares y en 3 del infrarrojo térmico, como soporte a los instrumentos activos. Proporcionará datos sobre nubes y aerosoles, así como información contextual de las capas de nubes y aerosoles. También será usado para la identificación de la escena. Tendrá una resolución de 500 m en nadir, y un ancho de barrido de 150 km.

- **BBR** (*Broad-Band Radiometer*): proporcionará estimaciones de los flujos reflejados de onda corta (0.2-4 μm) y emitido de onda larga (4-50 μm) en el techo de la atmósfera, con una resolución constante de 10 km en observación *along-track*.
- **FTS** (*Fourier Transform Spectrometer*): el FTS proporcionará flujos de onda larga de alta resolución espectral, así como perfiles de temperatura y vapor de agua sobre el techo de las nubes o con cielo despejado.

Earth CARE es la primera misión dedicada a la obtención de perfiles de propiedades de nubes para su uso en estudios meteorológicos y climatológicos, con la restricción de una precisión en términos de flujos TOA (*Top of Atmosphere*) de 10 W/m^2 . Este objetivo gobierna las precisiones seleccionadas en el resto de instrumentos.

La alta sensibilidad del radar asegurará una detección del 99 % de las nubes de hielo que tengan impacto radiativo. El corregistro de los píxeles del radar y lidar proporcionará estimaciones del contenido en hielo y radio efectivo con errores menores del 30-40 %, condiciones necesarias para obtener la precisión impuesta en la densidad de flujo en el techo de la atmósfera.

El radiómetro de banda ancha y espectrómetro por transformada de Fourier proporcionarán información adicional esencial. El radiómetro multiespectral proporcionará la identificación de la escena, así como información sobre nubes y aerosoles en una escala espacial mayor. El espectrómetro por transformada de Fourier también proporcionará perfiles de vapor de agua y temperatura que son necesarios para cerrar completamente el balance radiativo en el techo de la Atmósfera.

2.3. El BBR

Dado que el objetivo principal del presente trabajo es la optimización de un radiómetro de banda ancha, conviene prestar algo más de atención al BBR, objetivo del estudio. Como hemos dicho, proporcionará estimaciones de los flujos reflejados de onda corta (0.2-4 μm) y emitido de onda larga (4-50 μm) provenientes de la columna vertical atmosférica observada por los instrumentos activos. Específicamente, el BBR proporcionará medidas calibradas para la determinación de radiancias en banda ancha no filtradas.

El radiómetro observará en configuración *along-track*, pudiendo así obtener diferentes visiones del mismo punto desde distintos ángulos de observación casi simultáneamente. Tal y como se observa en la figura 2, dispondrá de tres visiones simultáneas, una en observación nadir, y otras dos en el plano de la órbita y simétricas respecto de la primera. Estas dos observaciones oblicuas se realizarán con un ángulo de visión cenital, θ_v , de aproximadamente 55 grados, que es equivalente a una inclinación de 50 grados respecto de la observación nadir. Las tres observaciones se realizarán con tres telescopios diferentes, cuyo diseño óptico proporcionará el mismo tamaño de píxel, 10 km por 10 km, para las tres visiones.

El BBR es un radiómetro de dos canales, en el que el canal de onda larga se obtiene substrayendo la componente de onda corta de un canal que cubre todo rango espectral. Los tres telescopios estarán montados juntos en un mismo bloque, permitiendo su movilidad hacia un cuerpo negro interno y visión solar externa para la calibración en vuelo.

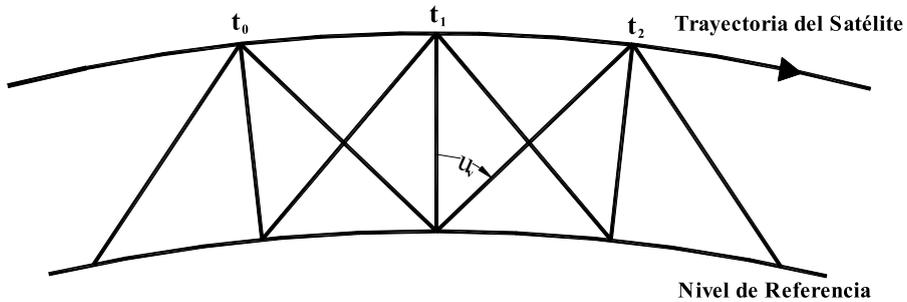


Figura 2: Geometría de observación del BBR. En cualquier instante observará tres posiciones a lo largo de su órbita, la nadir y dos simétricas respecto a la vertical con un ángulo de visión cenital, θ_v , de 55 grados.

EarthCARE centrará su esfuerzos en combinar datos de los instrumentos activos y pasivos para obtener perfiles verticales a lo largo de la trayectoria del satélite. Esto introduce el requerimiento de radiancias calibradas con una resolución espacial de 10 km, compatible con los tamaños de píxel más pequeños de los instrumentos activos. La comunidad científica también necesita ser capaz de determinar radiancias y flujos integrados de onda corta y onda larga compatibles con los modelos de circulación general, sobre una rejilla de unos 50 km de resolución. Por lo tanto, un muestreo *along-track* esencialmente continuo será necesario, con extensión fuera del píxel del BBR proporcionada por sinergia con el MSI.

La determinación de flujos instantáneos de banda ancha requiere información de la anisotropía del campo de radiancias emergente de la Atmósfera, que será obtenida mediante las medidas no nadir realizadas a lo largo de la trayectoria del satélite, con un ángulo de visión cenital cercano a 55 grados. Junto con la medida nadir, las medidas en observación oblicua proporcionarán medidas casi simultáneas ($\Delta t < 100$ s) de la anisotropía de los campos de radiancias reflejado de onda corta y emitido de onda larga. Esto proporcionará información para la aplicación de un modelo angular elegido previamente de acuerdo con una identificación de escena obtenida por el MSI.

Las medidas proporcionadas por el BBR pueden ser usadas de dos formas diferentes:

- El uso principal de los datos BBR en EarthCARE será el de condición de contorno en el techo de la Atmósfera para la derivación de los perfiles verticales de los componentes del balance de radiación. El punto relevante es que los flujos calculados no sólo dependen de las propiedades físicas medidas por los sensores activos, sino también de hipótesis sólo parcialmente validadas en los modelos, concernientes a propiedades espectrales y angulares de la columna atmosférica. Las medidas del BBR proporcionarán una ligadura independiente sobre estas hipótesis. Tal ligadura integrada, proporciona una condición de contorno para la obtención de los perfiles radiativos. Para que estos perfiles sean correctos es necesario,

Tabla 1: Resumen de los requerimientos técnicos del BBR.

Parámetro		Requerimiento de la Misión
Canales	SW (onda.corta)	SW = 0.2 a 4.0 μm
	LW (onda larga)	LW = 4 a $> 50 \mu\text{m}$
Rango dinámico	SW	0 a 450 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$
	LW	0 a 130 $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$
Precisión Absoluta	SW,LW	$< 3 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$
Ángulos de visión cenital	0° (nadir)	Corregistrado con lidar, radar y FTS
	55°	Simétricos respecto al nadir, along-track
Campo de visión instantáneo	Todos los canales	$\sim 10 \text{ km}$
Distancia de muestreo	Todos los canales	Contiguos

aunque desafortunadamente no suficiente, que los flujos TOA calculados coincidan con los observados por el BBR.

- En las determinaciones “tradicionales” de las componentes del balance de radiación en el techo de la Atmósfera, como por ejemplo en las misiones ERBE (*Earth Radiation Budget Experiment*), ScaRaB (*Scanner for Radiation Budget*) y CERES (*Clouds and the Earth’s Radiant Energy System*), las radiancias de onda corta y onda larga se convierten en flujos instantáneos mediante modelos angulares. Un algoritmo de corrección espectral específico de EarthCARE que use datos del MSI, FTS y ATLID proporcionará radiancias no filtradas de excelente calidad, las cuales serán invertidas a flujos mediante modelos angulares que aprovechen la observación *along-track*. Otros satélites se usarán para observar nubes y propiedades atmosféricas, e incluirán radiómetros multispectrales, con resolución espacial y canales espectrales comparables a los del MSI. Los equipos científicos de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), y también europeos, han producido estimaciones del balance de radiación usando radiancias AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) en banda estrecha y datos de satélites geoestacionarios. Análogamente, estimaciones basadas en los canales de banda estrecha de ScaRaB se han comparado con medidas simultáneas en banda ancha. En EarthCARE, las radiancias en banda ancha medidas por el BBR podrán ser comparadas sistemáticamente con las estimaciones corregistradas espacial y temporalmente proporcionadas por el MSI y el FTS. Esto ayudará a ajustar los algoritmos para estimar flujos TOA en banda ancha a partir de radiancias en banda estrecha, lo que permitirá imponer un límite de confianza al seguimiento a largo plazo del balance de radiación basado en satélites meteorológicos operacionales. Además, el análisis de los datos radar y lidar deberá mejorar nuestro entendimiento en los casos en que las estimaciones del balance de radiación con radiancias de banda estrecha sean erróneas.

La visión nadir del BBR estará corregistrada espacialmente con los píxeles del lidar, radar, FTS, y el píxel central del MSI. El tamaño del píxel será de unos 10 km, similar al del FTS. Aunque los píxeles del BBR y del FTS son significativamente más grandes que los de los instrumentos activos

y del MSI, sus campos de visión son lo suficientemente pequeños para proporcionar valiosos datos sobre la heterogeneidad de los campos de nubes a escalas iguales o mayores de 10 km, que es la escala vertical aproximada de la troposfera. Como resumen de las características del BBR, la tabla 1 muestra los requerimientos técnicos del BBR.

3. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Si bien los radiómetros a bordo de satélites miden flujo de radiación, éstos son interpretados como radiancias debido a que el campo de visión en el que observan es estrecho. Por tanto, para obtener el flujo saliente del sistema Tierra-Atmósfera, deberíamos disponer de múltiples sensores observando el mismo punto y al mismo tiempo para así proporcionar muestreo angular suficiente del campo de radiancias. Es evidente que esta aproximación al problema es técnicamente inviable, y se necesitan algoritmos de inversión para estimar el flujo (RASCHKE *et al.*, 1973).

El procedimiento de inversión puede basarse en Modelos de Distribución Angular (ADMs), los cuales tienen en cuenta el comportamiento medio de la anisotropía del campo de radiancias, para así permitir una estimación del flujo a partir de una única radiancia. Desde el punto de vista conceptual, un ADM no es más que un factor de corrección por anisotropía respecto al flujo lambertiano, y se define como el cociente entre el flujo medio lambertiano y el flujo medio real, tal y como se muestra más adelante. Esto implica que es necesario optimizar los procesos de inversión para obtener medidas precisas del balance de radiación desde satélite. La elección de 55° como ángulo de observación óptimo se ha definido acorde a un estudio previo que consta de tres pasos fundamentales:

- Generación de una base de datos de radiancias en el techo de la Atmósfera.
- Construcción de modelos de distribución angular.
- Parametrización del error de inversión en función de la geometría de visión.

La base de datos se ha generado mediante un código de transferencia radiativa plano-paralelo haciendo variar los parámetros físicos que influyen en la anisotropía de la radiación, bien en onda corta o en onda larga. Incluye tanto cielos despejados como nubosos. Los parámetros que se han variado han sido el tipo de superficie, el tipo de atmósfera estándar, el contenido en vapor de agua, la temperatura de la superficie, el modelo de aerosoles, la altura del techo de las nubes, el espesor óptico de las nubes y el ángulo solar cenital.

A partir de esta base de datos se han construido modelos de la anisotropía del campo de radiancias en el techo de la Atmósfera. Se obtuvieron las radiancias medias, iL_{ijkl} , donde los subíndices i , j , k , y l hacen referencia a intervalos de ángulo solar cenital, acimut relativo, ángulo de visión cenital y cobertura nubosa, respectivamente. Integrando estas radiancias medias hemisféricamente (subíndices j y k), obtenemos los flujos medios en el techo de la Atmósfera para un intervalo de ángulo solar y cobertura nubosa, F_{il} . Con estas radiancias y flujos medios se define el factor

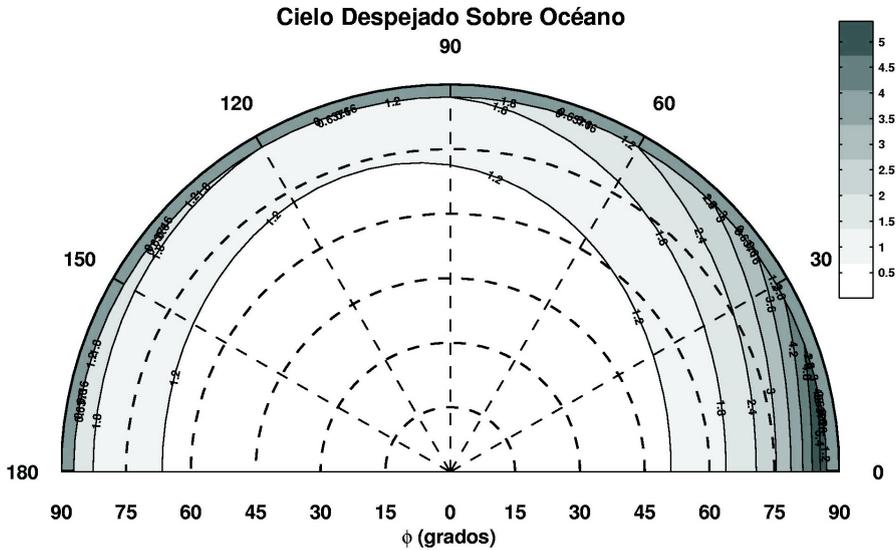


Figura 3: Modelo de distribución angular para cielo despejado sobre océano, para ángulos solares cenitales entre 55 y 65 grados.

anisotrópico o modelo de distribución angular como:

$$R_{ijkl} = \frac{\pi L_{ijkl}}{F_{il}} \tag{1}$$

que da cuenta de la anisotropía media del campo de radiancias. R_{ijkl} no es más que el cociente entre los flujos medios lambertiano (isotrópico) y real.

La figura 3 muestra un ejemplo de modelo angular. Se representa el factor anisotrópico para océano sobre cielo despejado en forma de diagrama de contornos en coordenadas cilíndricas. La coordenada radial corresponde al ángulo de visión cenital, mientras que la coordenada acimutal es el acimut relativo entre la posición del satélite y el plano principal, definido por la vertical y la posición del Sol. El origen del acimut relativo se define en la dirección de dispersión hacia delante, con lo que el Sol se encuentra en un acimut de 180 grados, a la izquierda de la figura. Se observa claramente el dominio de la dispersión hacia delante debido a la reflexión especular.

Una vez construidos los modelos angulares para todas las escenas definidas, se procedió al estudio del error de inversión a partir de una única radiancia. Es decir, cada una de las radiancias obtenidas en la base de datos está clasificada por sus ángulos y su cobertura nubosa, teniendo asignada el valor correspondiente R_{ijkl} , que se usará para estimar el flujo mediante la relación (1). De este modo tenemos el flujo estimado a partir del modelo angular, y el que tomamos como real, proporcionado por la base de datos. Parametrizando el error cuadrático medio del flujo estimado respecto de la

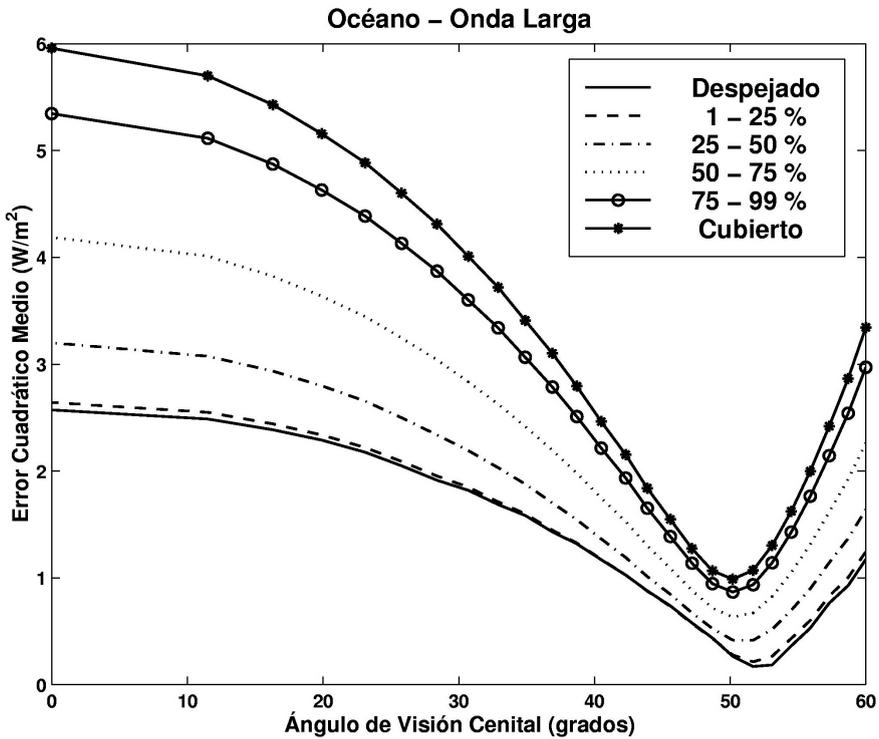


Figura 4: Error cuadrático medio de la inversión de onda larga en función del ángulo de visión cenital. Los resultados son para océano y con diferentes coberturas nubosas.

geometría de observación se obtiene que el error se minimiza para un ángulo de visión cenital alrededor de 55 grados en onda corta y entre 50 y 55 grados en onda larga. Es decir, la variabilidad del factor anisotrópico es menor en un entorno de 55 grados, haciendo así que el valor medio del factor anisotrópico represente de manera fiable los valores instantáneos. En la figura 4 se puede ver el comportamiento del error cuadrático medio en el caso de onda larga, para diferentes coberturas nubosas, desde cielo despejado hasta cielo completamente cubierto. Independientemente de la cobertura nubosa, aparece una forma similar en las curvas, minimizándose el error entre 50 y 55 grados de ángulo de visión cenital.

Aunque no se muestran aquí, en onda corta las curvas que se obtienen son muy similares, desplazándose la región del mínimo ligeramente hacia ángulos mayores. Por otra parte, los errores son mayores en onda corta debido a que la variabilidad y anisotropía del campo de radiancias en la parte solar del espectro son mayores.

Estos resultados implican que existen ángulos de observación privilegiados para la obtención de flujos en el techo de la Atmósfera a partir de medidas de satélite, pudiéndose aprovechar para optimizar el diseño de radiómetros cuyo objetivo sea medir el balance de radiación.

4. CONCLUSIONES

Hemos presentado una descripción de la futura misión Earth CARE, cuyo objetivo es la obtención de perfiles de nubes y aerosoles de modo global, con el fin de mejorar su parametrización en los modelos climáticos.

Para mejorar esta parametrización es necesario que los cálculos se lleven a cabo con unas condiciones de contorno precisas en el techo de la atmósfera. Estas condiciones de contorno vienen dadas por el intercambio energético entre el sistema Tierra-Atmósfera y el espacio: el balance de radiación terrestre. Este balance de radiación puede medirse con radiómetros a bordo de satélites, aunque son necesarios procesos de inversión que introducen errores.

Se han construido modelos de distribución angular para estudiar la dependencia del error en el proceso de inversión con la geometría de observación, mostrándose que existen ciertos ángulos de observación que permiten obtener una medida más precisa del balance de radiación en el techo de la atmósfera. Para el rango solar del espectro (onda corta), el ángulo de observación cenital óptimo se encuentra alrededor de 55 grados, siendo ligeramente inferior en el caso del rango terrestre (onda larga).

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Agencia Espacial Europea mediante el contrato ESTEC 14685/00/NL/JSC. Alejandro Bodas disfruta de una beca del *Plan de Formación del Personal Investigador*, de la *Conselleria de Cultura, Educació i Ciència de la Generalitat Valenciana*.

6. REFERENCIAS

ESA (2001): The five candidate Earth Explorer Core Missions –Earth CARE– Earth, Clouds, Aerosols, and Radiation Explorer, ESA-SP 1257(1).

IPCC (2001): Intergovernmental Panel on Climate Change, Third Assessment Report, WG I Climate Change 2001: The Scientific Basis, Summary for Policy Makers.

LÓPEZ BAEZA, E., BODAS SALCEDO, A. y GIMENO FERRER, J. (2001): BBR Optimisation Study, Final Report, ESA Contract No. 14685/00/NL/JSC.

RASCHKE, E., VONDER HAAR, T.H., BANDEEN, W.R. y PASTERNAK, M. (1973): The Annual Radiation Balance of the Earth-Atmosphere System During 1969-70 From Nimbus 3 Measurements, *J. Atmos. Sci.*, 30, pp. 341-364.

