

## Determinación de propiedades de nubes usando datos nocturnos del sensor MODIS

Juan C. Pérez<sup>(1)</sup>, Albano González<sup>(1)</sup> y Abidán Cerdeña<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Dep. Física Fundamental y Exp., Electrónica y Sistemas. Universidad de La Laguna. Tenerife. Avda. Francisco Sánchez s/n, 38200 La Laguna, Tenerife, Canarias. jcperez@ull.es, aglezf@ull.es, acerdana@ull.es.

### Resumen

En este trabajo se presenta un método para la determinación del espesor óptico, el radio efectivo de las gotas y la temperatura, para nubes estratiformes compuestas de agua, a partir de los datos nocturnos proporcionados por los sensores infrarrojos del instrumento MODIS. Esta técnica se basa en la inversión de un modelo teórico de transferencia radiativa que simula las radiancias en las distintas bandas espectrales a partir de los parámetros característicos de las nubes. Para la inversión de este modelo se hace uso de una técnica numérica basada en algoritmos genéticos conocida como "scatter search". El método propuesto se ha aplicado durante la campaña DYCOMS-II, en la cual se tomaron datos in-situ de estratocúmulos marinos en la costa de California a través de medidas nocturnas realizadas desde avión. Los resultados obtenidos para imágenes temporalmente próximas a las medidas del avión muestran una buena concordancia con las medidas in-situ.

### 1. Introducción

Durante las últimas décadas, un interés creciente en torno al conocimiento del medio que nos rodea ha tomado protagonismo. En concreto, el estudio de los diversos procesos que regulan el clima ha sido uno de los campos en los que la comunidad científica ha centrado sus esfuerzos. De estos procesos, el papel que desempeñan las nubes en el balance radiativo del sistema Tierra-Atmósfera es uno de los que más complejidad plantea su caracterización debido, principalmente, a la multitud de tipos de nubes que cubren la Tierra y a la alta variabilidad tanto espacial como temporal que éstas presentan. Estos condicionantes han proporcionado a la teledetección un papel primordial en el estudio y caracterización de la cubierta nubosa a una escala global. Durante los últimos años se han realizado muchos trabajos dirigidos a la obtención de las propiedades ópticas y microfísicas de las nubes usando los datos proporcionados por sensores a bordo de satélites tales como el AVHRR [1], [2], [3]. La

gran mayoría de estas técnicas se basan en que la reflectividad de la nube en un canal situado en el visible depende principalmente del espesor óptico de la capa, mientras que la radiancia recibida en una banda de absorción del vapor de agua depende en gran medida del tamaño de las gotas de agua que componen dicha capa. Sin embargo estas técnicas, que hacen uso de la energía solar reflejada, son aplicables exclusivamente durante el día.

Durante la noche, el proceso de caracterización de nubes es más complejo puesto que la radiancia recibida en los distintos canales en el infrarrojo se encuentra afectada en distinta medida por los diferentes parámetros característicos de la capa nubosa. Algunos métodos se han desarrollado para este fin, basándose en la diferencia de temperaturas de brillo detectadas en las distintas bandas [4], [5].

Con estos antecedentes, el objetivo del presente trabajo es el desarrollo de una técnica que permita la obtención de los parámetros característicos de nubes de agua: tamaño de gotas, espesor óptico y temperatura media, a partir de los datos nocturnos proporcionados por el sensor de última generación MODIS, a bordo de los satélites EOS. Así, en la Sección 2 se presenta el modelo teórico de transferencia radiativa propuesto para simular las temperaturas de brillo en lo alto de la atmósfera a partir de los parámetros nubosos y atmosféricos. En la Sección 3 se describen los procedimientos utilizados para eliminar el *ruido de bandeo* presente en algunas bandas del citado sensor para, posteriormente, en la Sección 4 presentar el método propuesto para la extracción de los parámetros característicos de las nubes utilizando una técnica numérica que permite la inversión del modelo radiativo. Por último, en la Sección 5 se muestran algunos resultados obtenidos al aplicar la técnica propuesta a algunas imágenes correspondientes al Proyecto DYCOMS-II y se presentan las conclusiones del trabajo.

## 2. Modelo teórico de transferencia radiativa

Para simular las temperaturas de brillo en lo alto de la atmósfera se propone el siguiente esquema para el sistema Tierra-atmósfera. Sobre una superficie de mar de emisividad 1, se sitúa una capa nubosa homogénea plano-paralela dentro de una atmósfera que se considera compuesta exclusivamente por vapor de agua. La distribución vertical de este vapor de agua se asume conocida, bien a partir de modelos atmosféricos estándar, radiosondeos o a partir de los datos proporcionados por MODIS (producto MOD07\_L2), mientras que la cantidad total de vapor en la atmósfera es otro de los parámetros derivados del método propuesto. Esta hipótesis limita el conjunto de canales MODIS que pueden ser utilizados como entrada a aquellos que se encuentren situados bien en ventanas espectrales o en aquellos rangos donde los componentes absorbentes atmosféricos se reduzcan al vapor de agua.

Para el modelado de la capa nubosa, se asume que está compuesta por gotas de agua esféricas siguiendo una distribución de tamaños de tipo *gamma* representada con su radio efectivo  $r_{eff}$  mientras que para caracterizar el espesor de la nube y el número total de partículas presentes en la misma se utiliza el espesor óptico,  $\tau$ . Para cada distribución de gotas, se utiliza la teoría de Mie para el cálculo de los procesos de dispersión simple, mientras que los procesos de dispersión múltiple en la capa son tenidos en cuenta usando el método de ordenadas discretas DISORT [6].

A partir de este modelo teórico, se realizaron múltiples simulaciones para diferentes condiciones atmosféricas y para nubes de distintas características. En la Fig. 1 se presentan los resultados de algunas de estas simulaciones, donde se muestran los canales más sensibles a cada parámetro. Estos resultados se muestran en diagramas de diferencias de temperatura de brillo (Brightness Temperature Differences BTD's) tomando como referencia la temperatura de brillo del canal 31 ( $11 \mu\text{m}$ ). Las curvas generadas por el modelo se han superpuesto a datos reales de MODIS para una región dominada por estratocúmulos marinos, comprobándose que el modelo es capaz de justificar las radiancias observadas por el satélite. Como se esperaba, los procesos de dispersión predominan en la región del infrarrojo medio (canales 20 y 22), mientras que en el infrarrojo térmico el proceso predominante es el de absorción. También se puede observar la utilidad de los canales situados en las bandas de absorción del vapor de agua para la extracción

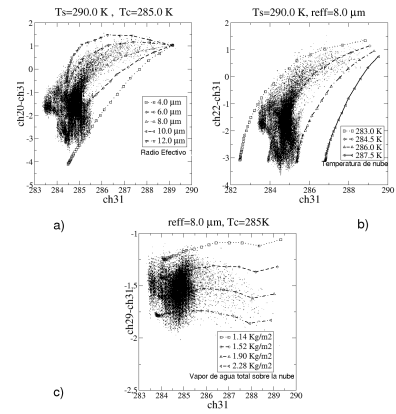


Figura 1: Comportamiento del modelo propuesto en función de los parámetros del mismo.

de este parámetro.

## 3. Filtrado de las imágenes

Como se comentó en la Introducción, algunos de los canales del sensor Modis presentan un aspecto ruidoso como consecuencia de un efecto conocido como *ruido de bandedo* o *striping effect*. Para suavizar el efecto que este ruido puede provocar en el proceso de extracción de los parámetros, se implementaron algunos filtros digitales. En concreto, se utilizaron los filtros de Wiener en el dominio frecuencial y filtros rechazo de banda de Butterworth. Sin embargo, después de analizar las características del ruido, el cual se presenta en unas frecuencias concretas en la dimensión vertical de las imágenes, se implementó un filtro en el dominio frecuencial que eliminase, exclusivamente, estas frecuencias. La Fig. 2 muestra una imagen del canal 31 original y la correspondiente después de aplicar el filtro propuesto.

## 4. Extracción de los parámetros

En esta sección se presenta el método propuesto para la obtención de los parámetros característicos de las nubes a partir de las imágenes nocturnas del sensor MODIS. Para ello, inicialmente se muestra la técnica numérica utilizada para la inversión del modelo teórico para, a continuación, describir el proceso de extracción implementado.

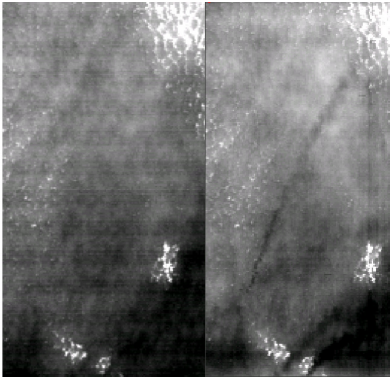


Figura 2: Imagen original (a) y filtrada (b) del canal 31 de MODIS.

#### 4.1. Inversión del modelo

Debido a la complejidad del modelo teórico directo propuesto, la inversión del mismo no puede ser realizada de forma analítica, debiéndose recurrir a métodos numéricos para efectuar la misma. Con este fin, se ha definido una función de coste que tiene en cuenta la diferencia entre las temperaturas de brillo medidas por el satélite y la simulada en el modelo:

$$Cost = \sum_i (T_{model,i} - T_{satelite,i})^2,$$

$$i = (20, 21, 22, 29, 31)$$

De esta manera, para cada píxel de la imagen, el conjunto de parámetros obtenidos, es aquél que minimiza esta función. Para determinar el método numérico apropiado para esta minimización, se realizó un análisis exhaustivo de la misma, observándose que, aunque ésta presenta un mínimo global, existen múltiples mínimos locales. Para solventar el inconveniente de estos extremos locales, se hizo uso de un método numérico conocido como *scatter search* [7], que puede ser considerado como una técnica evolutiva, similar a los *algoritmos genéticos*, pero a diferencia de éstos, los individuos de cada generación se generan a partir de combinaciones lineales de cada dos elementos de la generación anterior. Además, en cada etapa evolutiva no sólo sobreviven aquellos individuos más fuertes, es decir, aquellos que den lugar a los valores mínimos de la función de coste, sino también aquellos que proporcionan las soluciones más lejanas a las

consideradas “óptimas”. Por último, una vez seleccionados los individuos de la nueva generación, éstos son sometidos a un proceso heurístico clásico para situar cada una de estas soluciones en el mínimo más cercano. A partir de unas pocas generaciones, este método es capaz de proporcionar el conjunto de parámetros que minimizan la función de coste.

#### 4.2. Procedimiento de extracción

El procedimiento para la obtención de los parámetros característicos de las nubes se divide en varias etapas. Inicialmente, se realiza la selección de datos a utilizar. Así, como se indicó en la Introducción, el único componente atmosférico contemplado en el modelo propuesto es el vapor de agua. De esta manera, de los 15 canales que MODIS dispone en la región del infrarrojo, hemos descartado los que se sitúan en la banda de absorción de cualquier otro componente y aquellos que se encuentran fuertemente afectados por el *striping effect*. Los canales seleccionados para este estudio han sido: 20, 21, 22, 29 y 31. Por otra parte, utilizando los píxeles despejados se determinan tanto la temperatura de la superficie como el contenido total de vapor de agua en la atmósfera. Para el resto de los píxeles de la imagen, se interpolan estos valores. Por último, para los píxeles cubiertos, se aplica el algoritmo de inversión descrito en la sección anterior para obtener los parámetros nubosos que mejor ajusten el modelo teórico propuesto.

### 5. Resultados

El método propuesto ha sido aplicado a imágenes MODIS correspondientes al proyecto DYCOMS-II [8]. Durante esta campaña, desarrollada en Julio de 2001, se realizaron vuelos a distintas alturas para tomar medidas nocturnas de las características de los estratocúmulos marinos en la costa de California. La Fig. 3 presenta el caso de estudio conocido como Rf03 (13 de Julio), donde en la Fig. 3.a se muestra el canal 20 ( $3.7 \mu\text{m}$ ) y en la Fig. 3.b los valores extraídos para el radio de las gotas de agua. En primer lugar, cabe destacar el aspecto ruidoso de esta imagen como consecuencia del ruido de bandeado no eliminado totalmente para algunos canales en el proceso de filtrado. Por otra parte, se observa que los valores obtenidos para el radio se encuentran en torno a  $10 \mu\text{m}$  excepto en unas zonas bien definidas de la imagen donde decrecen hasta las  $7 \mu\text{m}$ . Estas zonas se corresponden con la presencia de “estelas de barco” en la imagen, donde como es bien conocido, estas estelas

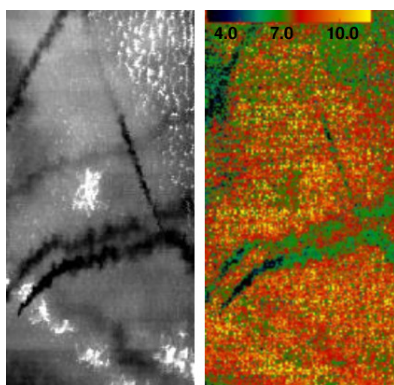


Figura 3: Aplicación del método al caso Rf03. a) Canal 20 MODIS, b) Radio efectivo de las gotas recuperado.

modifican las características de la nube haciendo que las gotas sean de menor tamaño como consecuencia del incremento de CCN's. Haciendo un análisis comparativo de los resultados obtenidos con las medidas tomadas in-situ por el avión, se extrae que, en general, los radios obtenidos por el método se aproximan a aquéllos medidos en la zona central de la nube (consecuencia de la hipótesis de nube homogénea), mientras que las temperaturas concuerdan con las medidas en el tope de la misma.

## 6. Conclusiones

En este trabajo se presenta un método para la obtención de las propiedades macro y microfísicas de nubes de agua a partir de los datos nocturnos proporcionados por el sensor de última generación MODIS. Este método se basa en la inversión de un modelo teórico de transferencia radiativa, utilizando técnicas numéricas evolutivas para realizar dicha inversión y técnicas de filtrado digital para eliminar el ruido presente en algunos canales. Este método ha sido aplicado a imágenes temporalmente coincidentes con medidas realizadas in-situ durante la campaña DYCOMS-II obteniéndose en general, resultados consistentes con dichas medidas.

Sin embargo, de este trabajo también se desprende la posibilidad de realizar nuevos estudios, como la hipótesis de nubes adiabáticas para la inclusión en el modelo de la inhomogeneidad vertical de las mismas, que serán abordados en trabajos posteriores.

## 7. Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado gracias al Ministerio de Ciencia y Tecnología y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), a través del Proyecto de Investigación REN2004-08013.

## 8. References

- [1] Arking, A., and J. D. Childs, "Retrieval of cloud cover parameters from multispectral satellite images", *J. Climate Appl. Meteor.*, 24, 322-333, 1985.
- [2] Nakajima, T., and M. D. King, "Determination of optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation", *J. Atmos. Sci.*, 47, 1878-1893, 1990.
- [3] Nakajima, T. Y., and T. Nakajima, "Wide area determination of cloud microphysical properties from NOAA AVHRR measurements for FIRE and ASTEX region", *J. Atmos. Sci.*, 52, 4043-4059, 1995.
- [4] Pérez, J. C., F. Herrera, F. Rosa, A. González, M. A. Wetzel, R. D. Borys y D. H. Lowenthal, "Retrieval of marine stratus cloud droplet size from NOAA-AVHRR nighttime imagery", *Rem. Sens. Environ.*, 73, 31-45, 2000.
- [5] González, A., J. C. Pérez, F. Herrera, F. Rosa, M. A. Wetzel, R. D. Borys y D. H. Lowenthal, "Stratocumulus properties retrievals method from NOAA-AVHRR data based on the discretization of cloud parameters", *Int. J. Rem. Sens.*, 23, 627-645, 2002.
- [6] Stamnes, K., S. Tsay, W. Wiscombe, y K. Jayweera, "Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media", *Appl. Opt.*, 27, 2502-2509, 1988.
- [7] Glover, F., M. Laguna, y R. Martí, *Theory and applications of Evolutionary Computation: Recent trends*, Springer-Verlag, 2002.
- [8] Stevens, B. D., et al., "DYCOMS-II", *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84, 579-593, 2003.