

Análisis de los errores de un algoritmo global para estimar la temperatura superficial del mar en Canarias

M. Arbelo, P. A. Hernández-Leal y A. Barreto
marbelo@ull.es

Grupo de Observación de la Tierra y la Atmósfera (GOTA). 38200 La Laguna. Tenerife

RESUMEN

Se ha desarrollado un algoritmo "split-window" global para la estimación de la temperatura superficial del mar con el AVHRR usando un código de transferencia radiativa. Hemos analizado su comportamiento para la región de las Islas Canarias mediante un conjunto de medidas de satélite simuladas. Se clasificaron los errores determinados por el algoritmo global dependiendo de la situación atmosférica en cada momento. Los resultados muestran la ineficiencia de este algoritmo global frente a un algoritmo regional.

PALABRAS CLAVE: temperatura superficial del mar, AVHRR, algoritmo "split-window", Canarias.

ABSTRACT

A global split-window algorithm for the retrieval of sea surface temperature from AVHRR has been developed using a radiative transfer code. In order to analyze the performance of the equation obtained which is applied to the Canary Islands zone, we have simulated a set of satellite measurements. The purpose was to classify the errors determined by the global algorithm, depending on the atmospheric situation at each moment. In the final results we give an explanation of the inefficient performance of global algorithm in comparison with a regional algorithm.

KEY WORDS: sea surface temperature, AVHRR, split-window algorithm, Canary Islands.

INTRODUCCIÓN

Todos los algoritmos para determinar la temperatura superficial del mar (TSM) suponen una primera aproximación del estado de la atmósfera entre el sensor del satélite y la superficie del mar (Barton, 1998). Esa primera aproximación se relaciona principalmente con la distribución atmosférica promedio del vapor de agua y la temperatura sobre el mar. Sin embargo, en la mayoría de las situaciones, estos algoritmos producen estimaciones inexactas de la TSM debido al desacuerdo entre las condiciones atmosféricas reales y la primera aproximación. Este es el caso típico que se produce cuando intentamos aplicar un algoritmo global a un área de condiciones climáticas particulares, donde la distribución vertical de los constituyentes atmosféricos se aleja de la situación promedio sobre los océanos.

El objetivo de este estudio es investigar la eficiencia de un algoritmo "split-window" global cuando se aplica a la región subtropical de las Islas Canarias. Este archipiélago está situado en frente de

la costa nor-occidental africana (26-30° N, 13-19° O). Para llevar a cabo nuestro propósito hemos simulado las radiancias medidas por el sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) usando el código de transferencia radiativa MODTRAN 2 (Berck *et al.*, 1989), con los perfiles de atmósferas estándares incluidos en el paquete y un conjunto de radiosondeos de la zona estudiada que será descrito en la siguiente sección.

DATOS Y METODOLOGÍA

Algoritmo global

Las ecuaciones de los algoritmos "split-window" hacen uso de las radiancias medidas por el sensor del satélite a dos longitudes de onda diferentes pero dentro de una misma ventana atmosférica (10.5–12.5 μm). Este tipo de ecuaciones está bien descrito en la literatura (McMillin y Crosby, 1984) y es una de las técnicas más usadas para corregir la

M. Arbelo, P. A. Hernández-Leal y A. Barreto

atenuación atmosférica que afecta a la radiancia infrarroja ascendente desde la superficie del mar.

Mediante el MODTRAN 2 se simuló teóricamente un conjunto de temperaturas de brillo de los canales 4 y 5 (T_4 , T_5) del sensor NOAA 14-AVHRR. Se usaron como perfiles atmosféricos las seis atmósferas estándares incluidas en el modelo: Tropical, Verano Latitudes Medias, Invierno Latitudes Medias, Verano Subártico, Invierno Subártico y 1976 US Estándar. Cada perfil genérico contiene las concentraciones de once moléculas (H_2O , CO_2 , O_3 , CO , CH_4 , N_2O , NO , NO_2 , NH_3 , O_2 , y SO_2) que fueron consideradas en las simulaciones. Además, para considerar unas condiciones atmosféricas más reales, se incluyó un modelo de aerosoles con una visibilidad de 23 Km para la capa límite. Para cada atmósfera, se consideraron cuatro ángulos de observación (0° , 15° , 30° , 45°) y tres temperaturas para la superficie del mar (temperatura del aire al nivel superficial i.e. T_s , $T_s - 2.5$ K y $T_s + 2.5$ K). La emisividad del mar se estimó, teniendo en cuenta el trabajo de Watts *et al.* (1996), para los diferentes ángulos y las longitudes de onda de los canales 4 y 5 del AVHRR. Así, se obtuvieron 72 valores de T_4 y T_5 a partir de los cuales, mediante un análisis de regresión múltiple, se obtuvo la siguiente ecuación "split-window" global

$$GTSM = 0.9923 T_4 + 2.1842 (T_4 - T_5) + 0.8329 (T_4 - T_5) (\sec\theta - 1) + 2.3348 \quad (1)$$

donde GTSM es la "TSM global" (K) y θ el ángulo cenital del satélite. El error estándar de estimación es de 0.1315 K.

Datos de validación regional

Los perfiles atmosféricos de temperatura y humedad se obtuvieron de los radiosondeos lanzados por el Instituto Nacional de Meteorología en la Isla de Tenerife. Se seleccionaron 30 perfiles verticales libres de nubes de los disponibles entre Diciembre de 1993 y Septiembre de 1994. Se realizaron las simulaciones de las temperaturas de brillo de los canales 4 y 5 del AVHRR teniendo en cuenta las mismas consideraciones anteriores para el algoritmo global, es decir; cuatro ángulos de observación, tres temperaturas de la superficie, todos los gases atmosféricos, modelo de aerosoles y emisividades. Todo ello da lugar a un conjunto final con 360 medidas de satélite que forman nuestro conjunto de datos de validación regional.

Con objeto de clasificar los errores del algoritmo global GTSM cuando se aplica al conjunto de validación regional, se dividieron los perfiles atmosféricos en tres capas de presiones: superficie-700 hPa (capa-1), 700-500 hPa (capa-2) y 500-300 hPa (capa-3). En la Tabla 1, se muestran los valores del contenido en vapor de agua (g/cm^2) calculados para cada capa en el perfil del promedio regional y para el perfil promedio de las atmósferas estándares.

De forma similar, se separaron los perfiles que incluían las típicas inversiones térmicas en la región canaria de aquellos en los que no aparecían.

Capa presiones (hPa)	Promedio estándar (g/cm^2)	Promedio región (g/cm^2)
Total	1.5783	1.4752
Sup-700	1.3378	1.2044
700-500	0.2136	0.2304
500-300	0.0258	0.0403

Tabla 1. Contenido en vapor de agua (g/cm^2) para el total y las diferentes capas de los perfiles promedio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los errores obtenidos por el GTSM, cuando se aplicó al conjunto de validación, se compararon con los errores producidos por un algoritmo regional desarrollado explícitamente para Canarias (Tabla 2). El algoritmo regional se obtuvo por medio de la técnica de simulación con un conjunto independiente de 50 radiosondeos característicos de la zona y su ecuación "split-window" es:

$$RTSM = 1.0186 T_4 + 1.2348 (T_4 - T_5) + 1.3178 (T_4 - T_5) (\sec\theta - 1) - 4.4616 \quad (2)$$

donde RTSM es la "TSM regional" (K) y el error estándar de estimación es 0.1514 K. Podemos observar en la Tabla 2 un error sistemático del GTSM de +0.3 K y una diferencia cuadrática media (rmsd) dos veces superior al RTSM.

Inversión de temperatura

La capa atmosférica seca, que nos encontramos inmediatamente por encima del límite de las típicas inversiones térmicas en los perfiles verticales de las Islas Canarias, nos induce a pensar en la dificultad que debe tener cualquier algoritmo global para ade-

cuarse a estas condiciones. Para estudiar estas situaciones hemos separado el conjunto de datos de validación en días con inversión y sin inversión. Los errores obtenidos con el GTSM se muestran en la Tabla 2. El error medio para los perfiles con inversión térmica es ligeramente mayor, pero la rmsd sigue un comportamiento contrario, de forma que no nos permite establecer diferencias significativas entre ambas situaciones. La diferencia media para el algoritmo RTSM es de 0.0246 K, un valor muy pequeño comparado con la rmsd.

Contenido en vapor de agua en capa-1

Para analizar la influencia del contenido en vapor de agua en la capa-1 (va_1) hemos separado el conjunto de datos de validación en dos subconjuntos, atendiendo al valor medio del va_1 , esto es 1.2 g/cm^2 . En la Tabla 2 aparecen los resultados de ambos algoritmos, sugiriendo un mejor comportamiento del RTSM frente al GTSM. La diferencia entre los errores medios de los dos subconjuntos para el GTSM es de 0.35 K, valor muy importante cuando se compara con la rmsd de este algoritmo para el total de los datos (0.34 K). Esto puede resultar sorprendente, ya que podríamos pensar que en las condiciones atmosféricas con un $va_1 \geq 1.2 \text{ g/cm}^2$, normalmente habría una inversión térmica y, por lo tanto, el vapor de agua y la distribución de temperaturas sería significativamente diferente de las atmósferas estándares usadas en la simulación para el GTSM. Sin embargo, se ha encontrado realmente una débil asociación entre la inversión y el va_1 (Tabla 3), sólo el 33% de los días responden a esa situación. En aquellas atmósferas sin inversión y $wv_1 \geq 1.2 \text{ g/cm}^2$, el error medio es el más bajo, sugiriéndonos el buen comportamiento del GTSM aquí. Por otro lado, si hay inversión, el error medio se incrementa como en los casos en los cuales es menor que 1.2 g/cm^2 . La única explicación razonable a estos resultados resulta de la existencia de un mayor contenido medio en vapor de agua para las atmósferas estándares que para la capa-1 del perfil regional promedio (Tabla 1). El GTSM funciona mejor cuando el va_1 está próximo a 1.34 g/cm^2 , es decir, a su "primera aproximación", y lógicamente, cuando no hay inversión.

Contenido en vapor de agua en capa-2

La relación entre los errores de GTSM y el contenido en vapor de agua de la capa-2 (va_2) sigue un comportamiento particular. En la Figura 1 podemos

observar la tendencia de los errores del GTSM cuando aumenta va_2 . El umbral sugerido por la Figura 1 para dividir el conjunto de datos de validación es 0.4 g/cm^2 . En este caso, (Tabla 2), la diferencia en el error medio del GTSM es de 0.6 K, considerablemente mayor que la rmsd de 0.34 K.

Algoritmo TSM	Min	Max	Media	rmsd
RTSM (total)	-0.6206	0.4591	0.0148	0.1766
GTSM (total)	-1.0800	0.9920	0.2753	0.3394
GTSM (inv.)	-0.5419	0.9889	0.2814	0.2868
GTSM (no inv.)	-1.0800	0.9920	0.2647	0.4158
RTSM (inv.)	-0.5330	0.4591	0.0238	0.1780
RTSM (no inv.)	-0.6206	0.4211	-0.0007	0.1736
GTSM ($va_1 \geq 1.2$)	-1.0800	0.5356	0.1007	0.2822
GTSM ($va_1 < 1.2$)	-0.5419	0.9920	0.4499	0.3001
RTSM ($va_1 \geq 1.2$)	-0.6206	0.4591	0.0187	0.1909
RTSM ($va_1 < 1.2$)	-0.5333	0.3781	0.0109	0.1615
GTSM ($va_2 \geq 0.4$)	-1.0800	0.2082	-0.1874	0.3074
GTSM ($va_2 < 0.4$)	-0.1200	0.9920	0.3909	0.2315
RTSM ($va_2 \geq 0.4$)	-0.6206	0.2747	-0.1350	0.1887
RTSM ($va_2 < 0.4$)	-0.2700	0.4591	0.0522	0.1522
GTSM ($va_3 \geq 0.1$)	-1.0800	-0.2219	-0.5569	0.2445
GTSM ($va_3 < 0.1$)	-0.1913	0.9920	0.3347	0.2573
RTSM ($va_3 \geq 0.1$)	-0.6206	0.1069	-0.2651	0.1859
RTSM ($va_3 < 0.1$)	-0.3308	0.4591	0.0347	0.1582

Tabla 2. Estadísticas de los errores (en K) de los algoritmos para el conjunto de validación regional ($va_{i=1,2,3}$ in g/cm^2).

Una última consideración a tener en cuenta en esta capa es que los mayores errores absolutos se relacionan con los valores más bajos de va_2 y se corresponden con días donde más del 90% del vapor de agua está concentrado bajo el tope de la inversión térmica.

Contenido en vapor de agua en capa-3

El estudio de los errores con respecto al vapor de agua en la capa-3 (va_3) debe ser realizado con cierta precaución debido a los posibles errores en los radiosondeos a estas alturas. El valor límite elegido para dividir el conjunto de datos en esta capa fue 0.1 g/cm^2 . En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos. Las diferencias en el error medio de ambos algoritmos son mayores que las rmsd, de forma que ninguno de ellos tiene un buen funcionamiento para $va_3 \geq 0.1 \text{ g/cm}^2$. Estas situaciones anómalas se corresponden con valores de rmsd para el va_1 , más pequeños que lo esperado y para el va_2 y va_3 , mayores que los valores normales.

M. Arbelo, P. A. Hernández-Leal y A. Barreto

	Nº días	Error medio (K)
$va_1 \geq 1.2 \text{ g/cm}^2$ inv	10	0.1778
$va_1 \geq 1.2 \text{ g/cm}^2$ no inv	9	-0.0535
$va_1 < 1.2 \text{ g/cm}^2$ inv	5	0.3965
$va_1 < 1.2 \text{ g/cm}^2$ no inv	6	0.5299

Tabla 3. Errores medios del GTSM para diferentes valores de va_1 e inversiones térmicas.

CONCLUSIÓN

Se ha desarrollado un estudio que intenta demostrar el ineficiente comportamiento de un algoritmo “split-window” global (GTSM) cuando se aplica a la zona de Canarias. Este algoritmo produce un error medio de 0.3 K y una rmsd mucho más grande que el algoritmo regional (RTSM). Sólo en aquellas situaciones atmosféricas de Canarias similares a la primera aproximación del algoritmo global, los resultados pueden ser considerados como satisfactorios.

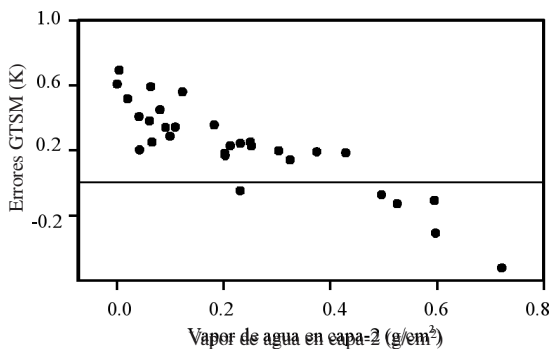


Figura 1. Errores de GTSM versus contenido vapor de agua (g/cm^3) en capa-2 (700–500 hPa) para simulaciones al nadir y temperatura superficial igual a la del nivel más bajo del radiosondeo.

En el 33% de los casos de este análisis, el GTSM genera una estimación de la TSM con un sesgo próximo a 0 K. Estos casos se corresponden con valores de va_1 mayores que 1.2 g/cm^2 y sin inversión típica de temperatura. Además, se ha encontrado que para contenidos muy altos o muy bajos de vapor de agua en la capa-2 (Figura 1), se producen los mayores errores absolutos en el GTSM.

También encontramos varias situaciones anómalas que conducen a malos resultados para el algoritmo regional, son aquellas en las que el porcentaje de vapor de agua en la capa-1 es menor que el esperado y mayor en las capas superiores. Pero en cualquier caso, los beneficios de usar algoritmos “split-window” regionales en el área de Canarias, con sus condiciones climáticas particulares, han quedado claramente demostrados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto CGL2004-06099-C03-02 del MEC.

BIBLIOGRAFÍA

- BARTON, I. J. 1998. Improved techniques for the derivation of sea surface temperatures from ATSR data. *J. Geophys. Res.*, 103: 8139-8152.
- BERK, A., BERNSTEIN, L. S. y ROBERTSON, D. C. 1989. MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN 7, GL-TR-89-0122.
- McMILLIN, L. M. y CROSBY, D. S. 1984. Theory and validation of the multiple window sea surface temperature technique, *J. Geophys. Res.* 89: 3655-3661.
- WATTS, P. D., ALLEN, M. R. y NIGHTINGALE, T. J. 1996. Wind-speed effects on sea-surface emission and reflection for the along-track scanning radiometer, *J. Atmos. Oceanic Tech.* 13: 126-141.