

NUEVA TÉCNICA PARA ESTIMAR LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR CON EL NOAA/AVHRR

M. ARBELO (*), G. P. PODESTÁ (**), y P. A. HERNÁNDEZ-LEAL (*)

marbelo@ull.es

(*) Departamento de Física Fundamental y Experimental. Universidad de La Laguna. Avda. Astrofísico Fco. Sanchez s/n. 38200 La Laguna. Tenerife.

(**) Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science. University of Miami. 4600 Rickenbacker Causeway, Miami, Florida 33149. USA.

RESUMEN: La temperatura superficial del mar (SST) es uno de los principales indicadores del cambio climático global. La posibilidad de usar los datos proporcionados por los sensores de los satélites de teledetección, para obtener este parámetro, ha propiciado el desarrollo de diferentes algoritmos. Sin embargo, las estimaciones de las SST con algoritmos globales, provocan errores sistemáticos que dependen de las condiciones atmosféricas, oceánicas y de observación. Con objeto de contribuir a la minimización de estos errores, hemos explorado y modificado la forma funcional de los términos predictores del algoritmo operacional NLSST (Non-Linear Sea Surface Temperature), mediante el uso de Modelos Aditivos Generalizados (GAM). La nueva técnica produce un algoritmo con un comportamiento homogéneo para una amplia variedad de condiciones, lo que potencia el uso de los datos del sensor NOAA/AVHRR en estudios de variabilidad climática mundial.

ABSTRACT: Global sea surface temperature (SST) has great importance for understanding global change. Many satellite algorithms to derive this parameter have been developed. However, the SST retrievals with global algorithms may produce systematic errors depending of atmospheric, oceanographic and observation geometry conditions. To contribute to the minimization of these errors, we have explored and modified the functional form of predictor terms on the operational algorithm NLSST (Non-Linear Sea Surface Temperature) using Generalized Additive Models (GAM). The new technique produces an algorithm with a uniform performance throughout a broader range of conditions, and facilitate the use of NOAA/AVHRR data in studies of global climate variability.

Palabras clave: SST, GAM, AVHRR, Cambio climático.

INTRODUCCIÓN

Todos los algoritmos para estimar la SST son similares y se comportan razonablemente bien en condiciones promedio (Barton, 1995).

La mayor parte de estos algoritmos hacen suposiciones simplificadoras para facilitar la estimación y computación. Sin embargo, las desviaciones de estas suposiciones, pueden producir errores sistemáticos en la determinación de la SST. Dichos errores no son muy marcados cuando los algoritmos están sintonizados para una región particular, donde el intervalo de variabilidad atmosférica y oceánica suele ser pequeño o moderado. Por el contrario, cuando se producen campos de SST globales, los fallos sistemáticos de los algoritmos son considerables debido al más amplio margen de condi-

ciones existentes. Por ejemplo, se han identificado sesgos estacionales consistentes para varias franjas latitudinales en los campos de SST globales obtenidos en el Proyecto NOAA/NASA AVHRR Oceans Pathfinder (Kilpatrick *et alii*, 2001).

En este trabajo no se pretende desarrollar un algoritmo para reducir la dispersión de las estimaciones de la SST. Las inexactitudes en las medidas *in situ* usadas para la validación, las diferencias en la naturaleza de las medidas realizadas por los radiómetros de los satélites y los termómetros *in situ*, las desviaciones de las condiciones atmosféricas supuestas implícitamente, entre otros inconvenientes, impiden reducir significativamente la variabilidad de las estimaciones de las SST calculadas con el sensor AVHRR. Nuestro propósito es minimizar

los errores sistemáticos del algoritmo operacional NLSST, errores que no pueden ser eliminados simplemente promediando en espacio o tiempo.

BASE DE DATOS

Para desarrollar y comprobar formulaciones alternativas del algoritmo NLSST, hemos utilizado una base de datos de medidas de SST tomadas *in situ* por boyas fijas y a la deriva, y observaciones del AVHRR instalado en el satélite NOAA-14, que coinciden en el tiempo dentro de ± 30 minutos y en el espacio en $\pm 0.1^\circ$ de latitud y longitud. Los datos analizados son todos los disponibles para el periodo 1995-96.

Esta base de datos incluye dos parámetros adicionales: contenido total en vapor agua at-mosférico (CWV) y valores de OISST (Reynolds/NCEP Optimally Interpolated SST). Los CWV se obtienen del radiómetro de microondas SSM/I y han sido calculados con el algoritmo propuesto por Wentz (1997). Los datos de OISST son extraídos de los campos semanales de esta base de datos climatológica, cuya resolución espacial es 1° (Reynolds y Smith, 1994).

Para eliminar datos de dudosa calidad o contaminados por nubes, hemos aplicado los tests propuestos por Kilpatrick *et alii* (2001). El número de datos que superaron estos criterios es de 39.498.

Con objeto de garantizar la validación de los algoritmos estudiados, se han dividido los datos aleatoriamente en dos conjuntos totalmente separados de 19.674 registros: un conjunto de entrenamiento para estimar los coeficientes del algoritmo, y un conjunto de validación usado para estimar el comportamiento del mismo. La distribución geográfica de ambos conjuntos es muy parecida, con el mayor número de datos situados entre 20°S y 40°N .

ALGORITMO NLSST

El NLSST es el algoritmo operacional usado por NOAA/NESDIS y U.S. Naval Oceanographic Office para producir campos de SST con el sensor AVHRR. Su forma funcional es (Walton *et alii* 1998):

$$\text{NLSST} = aT_4 + bT_{sfc}(T_4 - T_5) + c(T_4 - T_5)(\sec\theta - 1) + d \quad (1)$$

donde NLSST es la SST estimada por el satélite, T_4 y T_5 son las temperaturas de brillo de los canales 4 y 5 del AVHRR, θ es el ángulo cenital del satélite y T_{sfc} es una suposición previa de la temperatura superficial del mar. Los coeficientes a , b , c y d son constantes y se obtienen mediante regresión lineal de SST medidas por boyas con medidas simultáneas del AVHRR.

La ecuación (1) es el resultado de la simplificación del algoritmo propuesto por Walton *et alii* (1988), denominado CPSST (Cross Product Sea Surface Temperature). La diferencia entre ambos radica en el segundo término de la expresión (1): una aproximación lineal, (bT_{sfc}) , ha reemplazado al cociente $(SST_4 - T_4) / (SST_5 - T_5 + T_4 - SST_4)$ original, donde SST_4 y SST_5 son estimaciones de la SST resultantes de la aplicación de ecuaciones monocanales lineales simples de la forma $SST_i = a'T_i + b'$, que se obtienen mediante regresión de medidas *in situ* y de satélite coincidentes.

Al intentar reproducir con nuestro conjunto de datos la modificación realizada por Walton *et alii* (1998), encontramos que la aproximación lineal no es adecuada en todas las situaciones y podría ser la causante de ciertas desviaciones sistemáticas observadas en la aplicación del algoritmo de forma operacional.

Para identificar de forma directa las posibles no-linealidades en el término que incluye a la T_{sfc} y por extensión, en el NLSST, utilizaremos los Modelos Aditivos Generalizados (GAM) que describiremos a continuación.

MODELOS ADITIVOS GENERALIZADOS

Los GAM son una extensión de los tradicionales modelos lineales generalizados. Esta técnica de modelado no-paramétrica estima objetivamente la relación funcional de cada término predictor en un modelo aditivo (Hastie y Tibshirani, 1990). La idea básica de los GAM es reemplazar la función lineal usual de cada variable por una función de suavizado no especificada, permitiéndole así a los datos, mostrar la forma funcional más adecuada.

Para una variable continua como la SST, los GAM ajustan un modelo como una suma de funciones no lineales independientes y de media cero, g_p , de cada una de las variables predictoras X_p ,

$$\text{SST} = \alpha + \sum_{i=1}^q g_i(X) \quad (2)$$

donde α es el término independiente constante, análogo al de una regresión lineal y las variables predictoras X_i son, en el caso del NLSST, T_4 , $T_{sfc}(T_4 - T_5)$ y $(T_4 - T_5)(\sec\theta - 1)$.

APLICACIÓN DE LOS GAM AL NLSST

Inicialmente usamos los GAM para explorar las relaciones funcionales alternativas entre cada término de la ecuación NLSST y la SST. Posteriormente, proponemos y comprobamos formulaciones de algoritmos alternativos que evolucionan desde el algoritmo básico

NLSST. Para cada forma de algoritmo explorada, se ha elegido el mejor GAM mediante una técnica de selección automatizada paso a paso. Para cada predictor X_i en una formulación de algoritmo dada, hemos considerado un conjunto de posibles ajustes de diferente complejidad. Este conjunto incluye las siguientes posibilidades: (a) no inclusión del predictor, (b) inclusión como término lineal, (c) e inclusión como una función de suavizado de X_i , denotada como $s(X_i, df = 2, 5 \text{ o } 10)$, donde df indican los grados de libertad consumidos por el componente no paramétrico del ajuste suavizado. Cuando df aumenta, la cantidad de suavizado disminuye.

Una vez que un modelo ha sido ajustado usando los datos del conjunto de entrenamiento, calculamos las SST usando como T_{sfc} la OISST, y los residuos de las SST, definidos como SST *in situ* menos SST del satélite, para el conjunto de validación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Nuestro modelo de referencia inicial fue la ecuación del NLSST:

$$\text{NLSST} = 0.954 T_4 + 0.071 T_{sfc} (T_4 - T_5) + 0.870 (T_4 - T_5) (\sec\theta - 1) + 1.392 \quad (3)$$

Los coeficientes de la expresión (3) fueron calculados usando el conjunto de entrenamiento, al igual que para los restantes algoritmos propuestos, asegurando así, que cualquier diferencia en comportamiento entre ellos es debida a la formulación del algoritmo y no a los datos disponibles.

El modelo final que consideramos y que denotamos GAMSST es similar al NLSST, pero el efecto del ángulo cenital del satélite aparece separado de la diferencia $(T_4 - T_5)$ y un término adicional, que involucra una función empírica de la latitud, ha sido incluido. La forma final no paramétrica de este algoritmo es:

$$\text{GAMSST} = 0.733 T_4 - 2.623 (T_4 - T_5) + s(T_{sfc} (T_4 - T_5), df=10) + s(\sec\theta, df=2) + s(lat, df=10) + 3.943 \quad (4)$$

donde s indica un "smooth cubic spline" con df grados equivalentes de libertad, y lat indica latitud. Todas las temperaturas dadas en $^{\circ}\text{C}$.

El GAMSST, muestra una considerable mejora en las tendencias de sus residuos para casi cualquier situación atmosférica, oceánica o de observación en comparación con los residuos del NLSST, sin que para ello, hayamos tenido que recurrir a la optimización regional de los coeficientes del algoritmo. Su comportamiento es uniforme desde temperaturas bajas a altas (Figura 1.a), para cualquier contenido en vapor de agua (Figura 1.b),

diferencia $(T_4 - T_5)$ (Figura 1.c), ángulo de observación (Figura 1.d) o franja latitudinal (Figura 1.e).

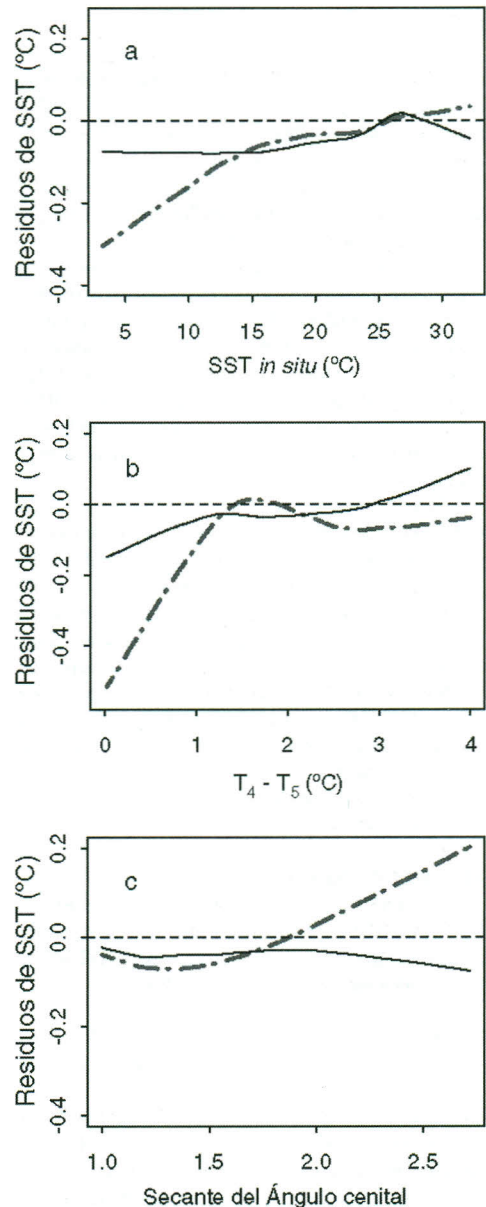


Figura 1. Tendencias de los residuos de la SST calculados para NLSST (línea discontinua) y GAMSST (línea continua) representados frente a (a) SST *in situ*, (b) $(T_4 - T_5)$, (c) $\sec\theta$.

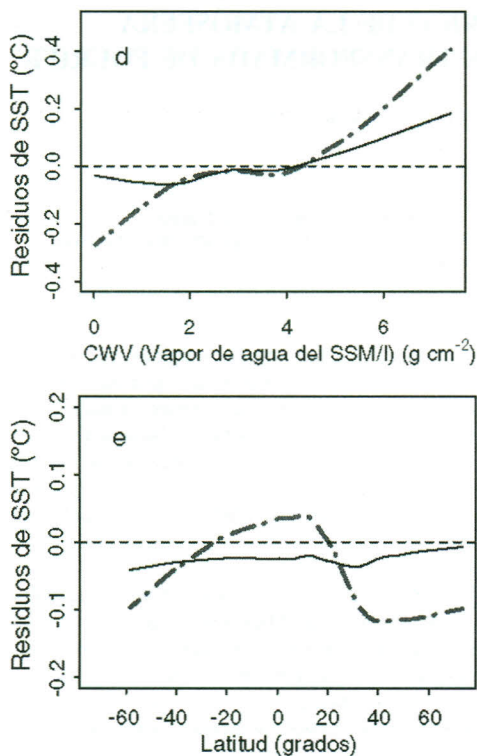


Figura 1. (Continuación) (d) Vapor de agua atmosférico y (e) Latitud.

Los resultados indican una notoria y clara ventaja para los GAM sobre el método de regresión lineal típico para las regiones y épocas con condiciones extremas, esto es, para la región Tropical durante todo el año y para los meses y zonas más frías de ambos hemisferios.

A bajas temperaturas, la aproximación hecha por los algoritmos basados en la técnica "split-window", donde la absorción diferencial es proporcional al contenido total en vapor de agua, deja de funcionar. En estos casos, el resto de constituyentes atmosféricos suelen predominar y provocan incluso, valores negativos en las diferencias ($T_a - T_s$) que producen errores en la obtención de la SST. La modificación introducida en el NLSST al usar la T_{sf} como suposición previa, atenúa en parte este inconveniente, pero como hemos podido demostrar, continúa fallando en muchas ocasiones. El uso de los GAM permite modificar la forma funcional del producto $T_{sf}(T_a - T_s)$, mejorando los resultados para estas condiciones.

Análogamente, las altas temperaturas que se pueden llegar a registrar en la zona ecuatorial, así como el

elevado contenido total en vapor de agua atmosférico, insensibilizan a los algoritmos globales actuales, provocando subestimaciones sistemáticas de la SST. En el caso del GAMSST estas tendencias se corrigen, alcanzando en muchas ocasiones mejoras de hasta 0.1°C tanto en la dispersión como en la media de los residuos.

CONCLUSIONES

Los GAM nos han permitido descubrir no linealidades en algunos términos del NLSST y proponer una modificación del mismo que mejora la producción de mapas globales de SST.

La nueva técnica produce un algoritmo con un comportamiento uniforme para una amplia variedad de condiciones, lo que potencia el uso de los datos del sensor NOAA/AVHRR para desarrollar una climatología de SST globales, con sesgos minimizados, y válida para estudios de variabilidad climática mundial.

BIBLIOGRAFÍA

- BARTON, I. J., 1995: Satellite-derived sea surface temperatures: Current status, *J. Geophys. Res.*, 100, 8777-8790.
- HASTIE, T. J., and R. J. TIBSHIRANI, 1990: *Generalized Additive Models*, Chapman and Hall, London, 335 pp.
- KILPATRICK, K., G. P. PODESTÁ, and R. H. EVANS, 2001: Overview of the NOAA/NASA Pathfinder version 4.2 algorithm for sea surface temperature and associated matchup database. *J. Geophys. Res.* En prensa.
- REYNOLDS, R. W. and T. M. SMITH, 1994: Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation, *J. Clim.*, 7, 929-948.
- WALTON, C. C., 1988: Nonlinear multichannel algorithms for estimating sea surface temperature with AVHRR satellite data, *J. Appl. Meteorol.*, 27, 115-124.
- WALTON, C. C., W. G. PICHEL, F. J. SAPPER, and D. A. MAY, 1998: The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with NOAA polar-orbiting environmental satellites, *J. Geophys. Res.*, 103, 27999-28012.
- WENTZ, F. J., 1997: A well-calibrated ocean algorithm for SSM/I, *J. Geophys. Res.*, 102, 8703-8718.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se llevó a cabo mientras el primer autor realizaba una colaboración científica en RSMAS (Universidad de Miami), financiada por una beca de la Dirección General de Universidades e Investigación del Gobierno de Canarias. Así mismo, agradecemos la financiación de los Proyectos de NASA NA37RJ0200, NAS5-31362 Y NAS5-31361.