

## Mejora en la estimación de la TSM usando datos de velocidad de viento desde satélite

Arbelo, Manuel<sup>1</sup>; Barreto, Africa; Hernández-Leal, Pedro A.;  
Arvelo-Valencia, Luis; González-Calvo, Alejandro

Grupo de Observación de la Tierra y la Atmósfera (GOTA).  
Departamento de Física. Universidad de La Laguna.

38200 La Laguna, Tenerife, Islas Canarias, España.

### RESUMEN

Se ha seleccionado el mejor conjunto de observaciones del sensor AVHRR de la base de datos Pathfinder, para obtener la temperatura superficial del mar, en función de información de la velocidad de viento del DMSP/SSM/I. El periodo estudiado es 1995-99. Para velocidades de viento superiores a un cierto umbral, el algoritmo Pathfinder muestra resultados razonables. Este valor umbral se detecta desarrollando nuevos algoritmos para la TSM con datos AVHRR, para día y noche, y se establece entre 3,5-4 ms<sup>-1</sup>. La mejora es relevante en ambos casos, con un error medio inferior a 0.01 K.

Palabras claves: Temperatura superficial del mar, velocidad del viento SSM/I, AVHRR.

### ABSTRACT

The best set of observations for AVHRR from Pathfinder Matchups Database has been chosen for deriving the sea surface temperature using surface wind speed information from DMSP/SSM/I. The period studied encompasses the years 1995-99. The Pathfinder algorithm shows a suitable behaviour for wind speed greater than a certain threshold. This threshold value was detected developing new algorithms to retrieve sea surface temperature using day and night AVHRR data, and it is established between 3,5-4 ms<sup>-1</sup>. The improvement is relevant in both cases with a mean error below 0.01 K

Keywords: Sea surface temperature, SSM/I wind speed, AVHRR.

### Introducción

La temperatura superficial del mar (TSM) es una de las variables más importantes en relación al sistema global Océano-Atmósfera. Es fundamental en las predicciones climáticas y meteorológicas. La variación de la TSM es el indicador más importante del cambio climático. La necesidad de conocer y entender el clima oceánico requiere de un conocimiento preciso de la TSM globalmente. Sólo los sensores a bordo de satélites nos ofrecen la posibilidad de alcanzar este propósito, debido a su gran reso-

lución espacial y radiométrica, un muestreo regular y su perspectiva sinóptica única.

Para este propósito, el sensor AVHRR a bordo de los satélites de órbita polar NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), es sin duda, el sensor que provee la mayor base de datos de TSM conocida. Esta ha sido la razón por la que los datos del AVHRR se han seleccionado en el Proyecto Pathfinder, con el propósito de crear la base de datos emparejados Pathfinder (PFMDB). Esta base de datos ha sido desarrollada conjuntamente por NASA y NOAA,

---

<sup>1</sup> Contacto autor: Tfno: +34 922318226 Fax: +34 922318228

Correo electrónico: marbelo@ull.es

Copyright: Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires, Argentina.

y contiene información simultánea del AVHRR y datos *in situ* provenientes principalmente de boyas fijas y a la deriva. Estos emparejamientos o «*matchups*» se pueden usar para desarrollar algoritmos que determinen de forma precisa la TSM desde los satélites NOAA, tal que los coeficientes de los algoritmos se obtienen por regresión de las temperaturas de brillo frente a las TSM *in situ*. Sin embargo, como demuestra Donlon et al. (2002), la estructura vertical altamente variable y compleja de las capas superiores oceánicas, hace imposible comparar la TSM obtenida de datos de satélite (temperatura representativa de apenas unos micrómetros de espesor de la capa más superficial del mar) con la medida *in situ* (temperatura de la capa de mezcla oceánica representativa de uno o varios metros de profundidad). Los sensores de contacto *in situ* que se usan tradicionalmente, no proveen información acerca de esta estratificación térmica. Así pues, necesitamos información auxiliar sobre la homogeneidad de la capa superior oceánica para validar los datos de sensores remotos con medidas *in situ*.

La velocidad del viento es un parámetro fundamental para estudiar la homogeneidad térmica en la capa más superficial del mar, de forma que podría ser utilizado para mejorar la precisión de la TSM desde satélite (Donlon et al. 2002, Donlon et al. 2001, Barton 2001). El uso de medidas *in situ* de la TSM parece ser una fuente de información apropiada para validar los datos de satélite siempre y cuando la velocidad de viento superficial alcance un valor umbral de  $6 \text{ m s}^{-1}$  (Donlon et al. 2002). Sin embargo, este umbral aun está abierto a la discusión, encontrando otros autores un valor por debajo de  $4 \text{ m s}^{-1}$  (Barton, 2001).

Con el objetivo de reducir el error en la estimación de la TSM desde satélite, hemos usado datos auxiliares que permiten comparar las temperaturas *in situ* (de la capa de mezcla) y las de satélite (de la piel del mar). Hemos extendido la PFMDB mediante la inclusión de datos coincidentes de la velocidad de viento superficial obtenida del sensor SSM/I (Special Sensor of Microwave/Imager), lo que nos permite desarrollar y validar algoritmos alternativos para determinar la TSM con la precisión suficiente que requieren los estudios climáticos.

#### **Datos TSM *in situ* y de satélite**

PFMDB es una base de datos plurianual, de varios satélites y múltiples variables coincidentes con datos del sensor NOAA/AVHRR y medidas *in situ* de la TSM de boyas ancladas y de deriva del NDBC (National Data Buoy Center), TOGA-TAO (Tropical Ocean-Global Atmosphere - Tropical Atmosphere Ocean), NOAA AOML (Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory), DAC (Drifting Buoy Data Assembly Center), además de las plataformas operadas por la Agencia Meteorológica Japonesa y la Oficina Meteorológica del Reino Unido. Los «*matchups*» son medidas de la TSM *in situ* coincidentes con las del AVHRR en  $\pm 30$  minutos y  $\pm 0.1^\circ$  de latitud y longitud ( $\sim 10 \text{ km}$ ). El conjunto de datos usado en este trabajo incluye el periodo de 1995 a 1999 y el sensor AVHRR a bordo del satélite NOAA-14.

#### **Velocidad del viento SSM/I**

El SSM/I es un sensor que vuela a bordo de los satélites meteorológicos de Defensa de los Estados Unidos. Tiene cinco canales en el intervalo de las microondas ( $19 \text{ GHz v y h pol}$ ,  $22 \text{ GHz v pol}$ ,  $37 \text{ GHz v y h pol}$ ) y mediante un algoritmo basado en los principios fundamentales de la teoría de transferencia radiativa se pueden obtener varios parámetros geofísicos a partir de sus medidas: velocidad de viento superficial (VVS), contenido de agua líquida y tasa de lluvia (Wentz, 1997).

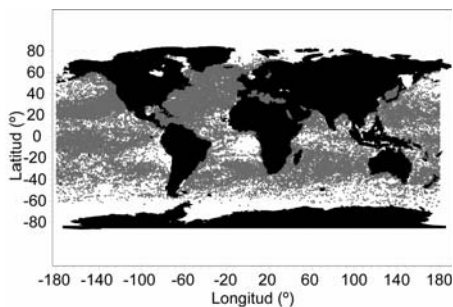
Toda la información disponible en la actualidad de velocidad de viento del sensor SSM/I es gestionada por Remote Sensing Systems y se ha obtenido a través de <http://www.ssmi.com> via ftp. Para el periodo estudiado, 1995-1999, los datos pertenecen al satélite F13. Consiste en una compilación de datos diarios y globales de mapas de cuatro bits con una resolución espacial de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (matriz de  $1440 \times 720$  datos). Las coordenadas geográficas del primer elemento de la matriz son  $0,125^\circ$  Este y  $89,75^\circ$  Sur. Nosotros hemos reformateado estos mapas cambiando la resolución de cada elemento a  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ , resultando finalmente un total de 720 puntos en longitud por 360 de latitud. Después de un minucioso análisis de estimación del error, tras la aplicación rutinaria del correspondiente algoritmo, se puede conocer la VVS con un error cuadrático medio de  $0,9 \text{ m s}^{-1}$  (Wentz, 1997). Un estudio posterior, particularizado para el periodo 1987-1997 muestra aun mejores resultados de estimación,  $0,4 \text{ m s}^{-1}$ , (Mears et al., 2000).

## Metodología y resultados

### Proceso de emparejamiento

Se dispone de un conjunto de datos distribuidos espacialmente de forma irregular, las TSM medidas por la boyas marinas incluidas en la PFMDB, y datos de VVS del sensor SSM/I repartidos de forma regular en una malla de resolución  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . Nuestro objetivo inicial es emparejar ambos conjuntos de observaciones en tiempo y espacio.

Inicialmente se seleccionan los datos de boyas y SSM/I de cada día. A continuación suponemos una malla de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  en el conjunto de datos de boyas, con el dato del SSM/I centrado en cada cuadrado de lado  $0.25^\circ$ . El procedimiento de emparejamiento se realiza buscando el dato de boya más cercano al correspondiente dato del SSM/I dentro un radio límite de  $0,25^\circ$ . Una vez finalizado el proceso para todos los días y todos los datos disponemos de un total de 123.661 «*matchups*», de los 227.540 datos originalmente incluidos en PFMDB. La figura 1 presenta la distribución espacial de estos «*matchups*». Se observa claramente una mayor distribución en el Hemisferio Norte, especialmente en los océanos Atlántico y Pacífico entorno a las costas de Norteamérica. También en el océano Índico existe una gran cantidad de datos, mientras que el océano Atlántico Sur y el Mar Mediterráneo presentan una menor distribución.



**Figura 1.** Distribución global de las TSM in situ coincidentes en tiempo y espacio con las medidas de la velocidad del viento SSM/I.

### Análisis de los datos de velocidad de viento SSM/I

Para analizar la validez de los datos de VVS del SSM/I, estos se han comparado con los medidos por los anemómetros instalados en un subconjunto de boyas incluidas en la PFMDB. El número de comparaciones disponibles es

16.764. La mayor parte de estos datos se encuentran concentrados en el Pacífico Ecuatorial y entorno a las costas este y oeste de Norteamérica. También se sitúan en menor medida en el Mar Caribe y el Pacífico Sur.

Con anterioridad, hemos comentado los estudios de validación previos de la VVS SSM/I. Mears et al. (2000) utilizaron datos de boyas operacionales de TAO y NDBC, reportando un valor medio de la diferencia SSM/I – boya de  $0,4 \text{ m s}^{-1}$  con una desviación estándar de  $1,4 \text{ m s}^{-1}$ . Los resultados de este análisis fueron obtenidos considerando todas las boyas y años desde 1987 hasta 1997.

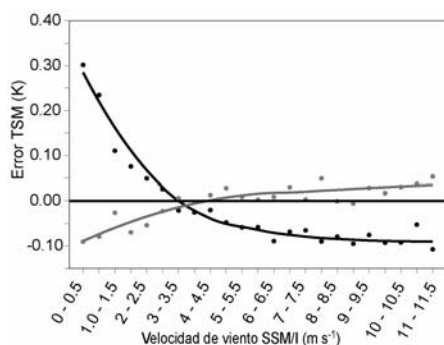
Para nuestro estudio particular, hemos obtenido una diferencia media de  $0,36 \text{ m s}^{-1}$ , con una desviación estándar de  $1,9 \text{ m s}^{-1}$  similares a los de Mears et al (2000). No podemos obviar que puede existir una sustancial diferencia entre la hora de observación del SSM/I y la medida de la boya. Esta diferencia, entorno a las dos horas, podría ser suficiente para generar cambios significativos en las condiciones atmosféricas entre ambas medidas. Aún y así, los resultados sugieren un buen emparejamiento entre ambos conjuntos de datos.

### Error en la estimación de la TSM de satélite

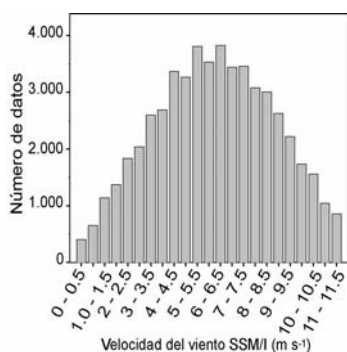
La TSM de satélite se estima usando el algoritmo del Proyecto Pathfinder (PFSST) (Kilpatrick et al., 2001). PFSST se basa en la formulación NLSST (Non-Linear Sea Surface Temperature) propuesta por Walton et al. (1998). Los coeficientes de PFSST se calculan mediante regresión estadística de las medidas de la TSM *in situ* (boyas) y las del AVHRR, con la particularidad de que son diferentes mes a mes.

La precisión de los algoritmos para obtener la TSM desde satélite depende críticamente de una óptima selección del conjunto de «*matchups*» usados para estimar los coeficientes. Para garantizar que los datos sean de calidad, es decir, no afectados por contaminación nubosa ni otros errores instrumentales, se han aplicado los criterios establecidos por Kilpatrick et al. (2001), resultando un total de 89.290 «*matchups*» de los 123.661 encontrados en el proceso de emparejamiento. Además, con objeto de proveer un conjunto estable de estadísticas globales, hemos seleccionado solamente aquellos *matchups* con ángulos cenitales de satélite inferiores a  $50^\circ$  y cuyos residuos (diferencia entre TSM satélite – TSM *in situ*) se hallen dentro de los límites de  $\pm 3 \text{ K}$ . El conjunto final, después

de aplicar todos los filtros previos, dispone de 56.126 «matchups» para nuestro estudio.



**Figura 2.** Errores en la estimación de la TSM del algoritmo Pathfinder (PFSST) en función de la velocidad del viento SSM/I. Periodo 1995-99



**Figura 3.** Histograma de velocidades de viento SSM/I para intervalos de 0,5 m s<sup>-1</sup>.

Con objeto de analizar el comportamiento del PFSST en función de diferentes valores de velocidad de viento del SSM/I, hemos representado gráficamente los residuos frente a este parámetro para intervalos de 0,5 m s<sup>-1</sup> (Figura 2). Para facilitar la visualización se han ajustado los valores a líneas de tendencia no paramétrica, que consisten en una regresión pesada localmente (Cleveland et al., 1988). Un hecho observable de importancia, es la clara divergencia entre los datos de día y noche para velocidades de viento inferiores al intervalo 3,5 - 4 m s<sup>-1</sup>. A partir de este valor, se observa un comportamiento asintótico hacia -0,10 K y 0,04 K para día y noche respectivamente. Estos resultados son sorprendentes, básicamente porque el algoritmo PFSST no ha sido diseñado teniendo en cuenta la VVS ni la separación entre las medidas día o de noche. La figura 2 nos sugiere que PFSST parece adecuado para velocidades de viento superiores a 3,5 - 4 ms<sup>-1</sup>, mostrando errores sistemáticos fácilmente sustraíbles.

En la Figura 3 se representa un histograma de la distribución de velocidades de viento SSM/I para los intervalos de 0,5 en 0,5 m s<sup>-1</sup> de la Figura 2. El 82.1% de los «matchups» (46.084), se relacionan con VVS superiores a 3.5 m s<sup>-1</sup>, mientras que los restantes (10.042) están por debajo de dicho umbral. El intervalo con el mayor número de datos es 5.5 - 6.5 m s<sup>-1</sup>, con 7.360 datos.

Para continuar investigando el comportamiento del PFSST se han obtenido estadísticas de los residuos para diferentes franjas latitudinales y tomando como valor umbral de la VVS, el punto de corte de los datos diurnos y

**Tabla 1.** Errores de PFSST para diferentes franjas de latitud (Tropical -20° a 20°N, Media 20°S a 40°S y 20°N a 40°N y Alta 40°S a 90° y 40°N a 90°N) y momento del día (D = Día y N=Noche)

Latitud	VVS < 3.5 m s <sup>-1</sup>		VVS ≥ 3.5 m s <sup>-1</sup>		Nº datos		
	Media (K)	Desviación estándar (K)	Media (K)	Desviación estándar (K)			
Tropical	D+N	-0.043	0.607	D+N	-0.086	0.503	15957
	D	0.042	0.659	D	-0.125	0.484	8841
	N	-0.116	0.549	N	-0.035	0.522	7116
Media	D+N	0.006	0.539	D+N	-0.023	0.505	26336
	D	0.051	0.503	D	-0.064	0.480	14045
	N	-0.035	0.513	N	0.026	0.530	12291
Alta	D+N	0.054	0.569	D+N	0.032	0.516	13833
	D	0.065	0.591	D	0.011	0.497	8230
	N	0.042	0.542	N	0.064	0.543	5603

nocturnos de la Figura 2, esto es,  $3,5 \text{ m s}^{-1}$  aproximadamente (Tabla 1). Sólo para los datos tropicales nocturnos se observa una evidente mejoría de la TSM, mostrando un error medio que cae desde  $-0,116 \text{ K}$ , para VVS SSM/I inferiores  $3,5 \text{ m s}^{-1}$  hasta  $-0,035 \text{ K}$  para valores superiores. Para el resto de franjas no hemos encontrado diferencias significativas en el valor medio, posiblemente debido a otros fenómenos que escapan al objetivo inicial de este trabajo, sin embargo, la desviación estándar disminuye hasta en  $0,2 \text{ K}$ .

Para demostrar la posible mejoría en la estimación de la TSM obtenida con el sensor AVHRR usando información auxiliar de la velocidad de viento del SSM/I, hemos desarrollado y validado un conjunto de nuevos algoritmos NLSST (Walton et al., 1998). La forma funcional de estos algoritmos es:

$$\text{NLSST} = aT_4 + bT_5(T_4 - T_5) + c(T_4 - T_5)(\sec \epsilon - 1) + d \quad (1)$$

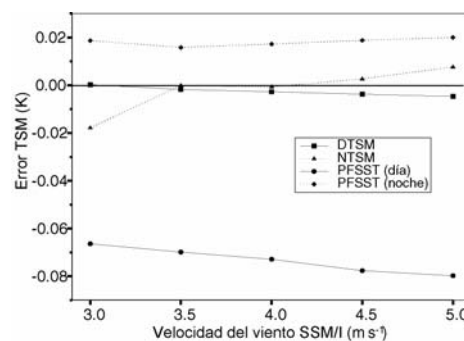
donde NLSST es la TSM del AVHRR,  $T_4$  y  $T_5$  son las temperaturas de brillo de los canales 4 y 5,  $\epsilon$  es el ángulo cenital del satélite, y  $T_s$  es una primera aproximación de la TSM. Los coeficientes de cada algoritmo  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  se obtienen empíricamente como en el caso del PFSST, mediante regresión de las temperaturas de los canales del AVHRR frente a las observaciones de las boyas coincidentes en tiempo y espacio.

Se han calculado 5 nuevos algoritmos con «*matchups*» afectados por VVS superiores a un valor umbral que hemos ido variando desde  $3,0$  hasta  $5 \text{ ms}^{-1}$ , diferenciando entre datos de día (DTSM) y noche (NTSM). Cada algoritmo

se ha obtenido dividiendo el conjunto de «*matchups*» correspondiente, en dos conjuntos aleatorios completamente separados, uno para estimar los coeficientes (conjunto de entrenamiento) y otro para validar (conjunto de validación). En la Figura 4 se muestra el error medio de los algoritmos PFSST, DTSM y NTSM, usando, en el caso del PFSST, a efectos de comparación en igualdad de condiciones, los mismos «*matchups*» que para el caso particular de día o noche e intervalo de velocidad de viento.

PFSST, como habíamos comprobado previamente, se comporta satisfactoriamente para

VVS superiores a  $H \gg 3,5 \text{ m s}^{-1}$ , tanto para datos diurnos ( $-0,070 \text{ K}$ ) como nocturnos ( $0,016 \text{ K}$ ). Para esta misma velocidad de viento, DTSM y NTSM estiman la TSM con un error medio cuasi-despreciable. Observándose



**Figura 4.** Errores de PFSST, DTSM y NTSM en función de la velocidad del viento SSM/I.

un progresivo aumento de los errores para ambos algoritmos, tanto para velocidades de viento SSM/I superiores a  $H \gg 3,5 \text{ m s}^{-1}$  como para valores inferiores. Sin embargo, en términos absolutos, la mejoría del DTSM con respecto al PFSST es mayor que las del NTSM.

## Conclusiones

Resulta fundamental reconciliar la diferente naturaleza de las medidas de la TSM realizadas *in situ* (boyas), con termómetros de contacto y característica de una capa de mezcla de varios metros de la superficie oceánica, con la temperatura de la piel del mar, obtenida mediante radiometría infrarroja a partir de sensores remotos a bordo de satélites. Podemos intentar solucionar este inconveniente utilizando información de la velocidad del viento del sensor de microondas SSM/I. Para ello hemos emparejado los datos de velocidad del viento, que forman un reticulado regular, con medidas dispersas globalmente de la base de datos PFMDB, haciéndolos coincidir en tiempo y espacio. La inclusión de este nuevo parámetro en PFMDB supone una fuente de información complementaria para desarrollar y validar algoritmos de la TSM con el sensor AVHRR.

Un análisis previo del error de estimación de la velocidad del viento del SSM/I comparado con datos de anemómetros montados en boyas fi-

jas, revela un buen acuerdo entre las mismas, similar a estudios de otros autores, mostrando un error medio de  $0,36 \text{ m s}^{-1}$  y una desviación estándar de  $1,90 \text{ m s}^{-1}$  válido para nuestro propósito.

Para velocidades del viento SSM/I superiores a aproximadamente  $3,5 \text{ m s}^{-1}$  el error del algoritmo PFSST es inferior a  $0,1 \text{ K}$ . PFSST muestra los mejores resultados para datos de noche y velocidades de viento superiores a ese valor, que parece ser un umbral a partir del cual se minimizarían las diferencias entre la TSM *in situ* y de satélite. Por franjas latitudinales, la zona tropical es aquella para la que el PFSST muestra un menor error medio para VVS superiores a  $3,5 \text{ m s}^{-1}$  y datos nocturnos. Mientras que las desviaciones estándar disminuyen en casi todas las regiones latitudinales, tanto para datos de día como de noche, alcanzándose una diferencia máxima de casi  $0,2 \text{ K}$ .

Se ha demostrado experimentalmente, mediante el desarrollo de nuevos algoritmos para la TSM desde satélite con la base de datos PFMDB, que existe un valor de la velocidad del viento, entre  $3,5$  y  $4 \text{ m s}^{-1}$ , a partir del cual los resultados de estos algoritmos muestran un error medio de estimación de la TSM mínimo e inferior a  $0,01 \text{ K}$ , tanto para datos diurnos como nocturnos. Para día se mejoran las estimaciones del PFSST significativamente mientras que para noche la mejora no es tan notable. Sin embargo, este umbral de VVS también podría ser válido para PFSST tal como se encuentra diseñado y operativo en estos momentos, siempre que se aplique en condiciones oceanográficas con una VVS superior a  $3,5 - 4,0 \text{ m s}^{-1}$ . Entendemos que esa velocidad de viento, inferior en aproximadamente  $2,5 \text{ m s}^{-1}$  a la sugerida por Donlon et al. (2002) y muy próxima a la propuesta por Barton (2001), garantizaría un emparejamiento adecuado de las medidas de TSM de satélite e *in situ*, al encontrarse una ausencia de la estratificación superficial de las primeras capas oceánicas que sería rota a consecuencia de la fuerza del viento a esa velocidad mínima.

Estos resultados son esperanzadores y sugieren una redefinición del algoritmo operacional actual que mejoraría la estimación de los mapas de TSM dentro del Proyecto Pathfinder, crucial para estudios de variabilidad climática.

#### Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia (Proyecto de Investigación CGL2004-06099-C03-02/CLI).

#### Referencias

- Barton, I.J. Interpretation of satellite-derived sea surface temperatures. *Adv. Space Res.* 28 (1), 165-170, 2001.
- Cleveland, W.S. y Devlin, S. J. Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting. *J. Amer. Stat. Assoc.* 83, 596-610, 1988.
- Donlon, C.J., Minnett, P.J., Barton, I.J., et al. The character of skin and subsurface sea surface temperature. Workshop on intercomparison and validation of ocean-atmosphere flux fields. World Climate Research Program, Scientific Committee on Ocean Research, Washington, Mayo 2001, (<http://www.soc.soton.ac.uk/JRD/MET/WGASF/workshop/PDF/45Donlon.doc.pdf>).
- Donlon, C. J., Minnett, P., Gentemann, C., et al. Towards improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research. *J. Climate.* 15, 353-369, 2002.
- Kilpatrick, K., Podestá, G. y Evans, R.H. Overview of the NOAA/NASA AVHRR Pathfinder algorithm for sea. *J. Geophys. Res. - Oceans*. 106 (C5), 9179-9197, 2001.
- Mears, C. A., Smith, D. y Wentz, F.J. Comparison of Special Sensor Microwave Imager and buoy measured wind speeds from 1987 to 1997. *J. Geophys. Res.* 106, 11719-11729, 2001.
- Walton, C. C., Pichel, W. G., Sapper, F. J. y May, D. A. The development and operational application of nonlinear algorithm for the measurement of sea surface temperature with NOAA polar-orbiting environmental satellite. *J. Geophys. Res.* 103, 27999-28012, 1998.
- Wentz, F.J. A well-calibrated ocean algorithm for Special Sensor Microwave / Imager. *J. Geophys. Res.* 102, 8703-8718, 1997.