

Short Communication

Estimación de la temperatura superficial del mar desde datos satelitales NOAA-AVHRR: validación de algoritmos aplicados a la costa norte de Chile

Juan C. Parra¹, Luis Morales², José A. Sobrino³ & Juan Romero⁴

¹ Departamento de Ciencias Físicas, Universidad de La Frontera, P.O. Box 54-D, Temuco, Chile

² Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables, Universidad de Chile
P.O. Box 1004, Santiago, Chile

³ Image Processing Laboratory, Universitat de València, P.O. Box 22085, Valencia, España

⁴ Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de La Frontera, P.O. Box 54-D, Temuco, Chile

RESUMEN. Se aplicaron y compararon tres algoritmos del tipo Split-Window (SW), que permitieron estimar la temperatura superficial del mar desde datos aportados por el sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), a bordo de la serie de satélites de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). La validación de los algoritmos fue lograda por comparación con mediciones *in situ* de temperatura del mar provenientes de una boya hidrográfica, ubicada frente a la costa norte de Chile (21°21'S, 70°6'W; Región de Tarapacá), a 3 km de la costa aproximadamente. Los mejores resultados se obtuvieron por aplicación del algoritmo propuesto por Sobrino & Raissouni (2000). En efecto, diferencias entre la temperatura medida *in situ* y la estimada por SW, permitieron evidenciar una media y desviación estándar de 0,3° y 0,8°K, respectivamente.

Palabras clave: algoritmo, split-window, temperatura superficial del mar, sensor, satellite, norte de Chile.

Sea surface temperature estimation from NOAA-AVHRR satellite data: validation of algorithms applied to the northern coast of Chile

ABSTRACT. The present article applies and compares three split-window (SW) algorithms, which allowed the estimation of sea surface temperature using data obtained from the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) on board the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) series of satellites. The algorithms were validated by comparison with *in situ* measurements of sea temperature obtained from a hydrographical buoy located off the coast of northern Chile (21°21'S, 70°6'W; Tarapacá Region), approximately 3 km from the coast. The best results were obtained by the application of the algorithm proposed by Sobrino & Raissouni (2000). The mean and standard deviation of the differences between the temperatures measured *in situ* and those estimated by SW were 0.3° and 0.8°K, respectively.

Keywords: algorithm, split-window, sea surface temperature, sensor, satellite, northern Chile.

Corresponding author: Juan C. Parra (jparra@ufro.cl)

Una de las aplicaciones oceanográficas que puede derivarse del empleo de sensores remotos a escala regional es el cálculo de la temperatura de superficie del mar (SST, en inglés), donde cada píxel de la imagen contiene información sobre la temperatura a la que se encuentra el territorio, lo que es de especial aplicación al medio marino (Pinilla & Fenoy, 2008).

Entre las plataformas aerotransportadas más empleadas para la estimación de la SST están los

satélites de la serie NOAA, portador del sensor multiespectral Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) que posee cinco canales en el espectro electromagnético; tiene un ángulo de visión de 110,8° y genera una franja de barrido de 3000 km de ancho, que equivale en el Ecuador a 27,2° de longitud. La resolución espacial del píxel es de 1 km x 1 km en el nadir (Sobrino *et al.*, 2000). La ventaja del sensor AVHRR estriba, por una parte, en un tamaño

de píxel que se adecúa a las pretensiones de estudios de gran escala, y por otra, a la existencia de dos bandas espectrales correspondientes al infrarrojo térmico, que permite la obtención de la temperatura radiométrica (o de brillo) de la superficie terrestre.

No obstante, uno de los mayores problemas que plantea la medida de la SST desde datos satelitales, es la acción combinada de la perturbación generada por la atmósfera y la variabilidad espacial de la emisividad. La perturbación atmosférica es debida casi por entero a la absorción y emisión de radiación térmica por parte del contenido de vapor de agua atmosférico, mientras, que la emisividad se debe a la heterogeneidad de los elementos presentes en la superficie terrestre (Morales & Parra, 2002). En el caso de la superficie del mar, la emisividad presenta mayor homogeneidad y por tanto tiene menor importancia que en el caso terrestre.

Dentro de las técnicas disponibles que abordan el problema de la corrección atmosférica y de emisividad, destaca el método de Split-Window (SW), basado en la absorción diferencial de la atmósfera en dos anchos de banda en el espectro electromagnético (McMillin, 1975). En el caso del sensor AVHRR-NOAA, estas son dos bandas espectrales situadas dentro de la ventana atmosférica entre 10,3 y 12,5 μm , donde la absorción atmosférica es diferente. A partir de esta técnica, en la actualidad existe una gran cantidad de algoritmos encaminados a la obtención de la temperatura superficial del suelo (Zhilhao *et al.*, 2001; Parra *et al.*, 2006; Vera *et al.*, 2010), como del mar (McClain *et al.*, 1985; Coll *et al.*, 1991; Sobrino & Raussoni, 2000). La formulación clásica de un algoritmo de SW, responde a la ecuación (Coll *et al.*, 1992).

$$SST = T4 + A (T4 - T5) + B$$

donde $T4$, $T5$ son las temperaturas radiométricas correspondientes a las bandas espectrales 4 (10,3-11,3 μm) y 5 (11,5-12,5 μm) del sensor AVHRR-NOAA; donde A : coeficiente relacionado con la absorción del vapor de agua, y B : término que corrige el efecto de la emisividad de la superficie.

En el presente artículo se aplican y comparan tres algoritmos del tipo SW, que permiten estimar la SST desde datos aportados por el sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), a bordo de la serie de satélites de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

La información analizada consta de una base datos de SST *in situ* obtenida frente a la costa norte de Chile, región de Tarapacá (21°21'S, 70°06'W), distante 3 km de la costa aproximadamente. El registro de temperatura se obtuvo con una boya superficial fija,

programada para realizar registros de temperatura cada 4 h totalizando seis medidas diarias. La información disponible correspondió al periodo julio a noviembre 2005, siendo adquirida y administrada por el Laboratorio de Procesos Oceanográficos y Clima, de la Universidad de Concepción.

Adicionalmente, se utilizaron imágenes del satélite NOAA en sus bandas espectrales del visible e infrarrojo térmico, facilitadas por el Comprehensive Large Array-data Stewardship System (CLASS). Las imágenes en formato LAC (Local Area Coverage), nivel 1B, se sometieron a calibración radiométrica y georeferenciación. Posteriormente, se realizó una selección rigurosa de las mismas atendiendo a dos criterios: (a) una diferencia máxima de 35 min entre la pasada del satélite por la región de estudio y la adquisición de la SST *in situ* (Donlon *et al.*, 2006); (b) días libres de nubosidad sobre el área de estudio.

De un total de 153 imágenes satelitales, solo 13 de ellas (Tabla 1), cumplieron con los criterios antes mencionados. Lo anterior, deja en evidencia la dificultad para validar correctamente algoritmos orientados a la estimación de la SST.

En la Tabla 2, se presenta la estructura matemática de los algoritmos de SW utilizados.

Los algoritmos propuestos, presentan distintas variaciones a la clásica ecuación de SW. En el caso de McClain *et al.* (1985), se ha tenido en cuenta explí-

Tabla 1. Fechas de selección, horas de paso y ángulo de observación del satélite NOAA. La hora de medición de la SST *in situ* corresponde a las 19:00 h (GMT) para la totalidad de las muestras.

Table 1. Selected dates, time of pass and angle of observation of the NOAA satellite. The time of the *in situ* measurement of SST is 19:00 h (GMT) for all the samples.

Fecha	Hora de paso (GMT)	Angulo de observación (°)
31/08/2005	19:09	34
09/09/2005	19:18	47
20/09/2005	19:07	33
21/09/2005	18:56	17
03/10/2005	18:35	22
11/10/2005	18:54	14
12/10/2005	18:44	5
14/10/2005	18:25	38
19/10/2005	19:17	43
28/10/2005	19:23	49
30/10/2005	19:03	29
01/11/2005	18:42	7
02/11/2005	18:32	25

Tabla 2. Algoritmos de SW seleccionados para la estimación de la SST. T_4 y T_5 : temperaturas radiométricas correspondientes a los canales 4 y 5 del sensor AVHRR-NOAA; θ : ángulo de observación del sensor.

Table 2. SW algorithms selected for estimating SST. T_4 and T_5 : radiometric temperatures corresponding to channels 4 and 5 of the AVHRR-NOAA sensor; θ : angle of observation of the sensor.

Autor (es)	Abreviatura	Algoritmo
McClain <i>et al.</i> (1985)	MC	$SST = 1,0561T_4 + 2,542 (T_4 - T_5) + 0,888 (T_4 - T_5)(\sec\theta - 1) - 16,98$
Coll <i>et al.</i> (1992)	C	$SST = T_4 + [1,41 + 0,24 (T_4 - T_5)] (T_4 - T_5)$
Sobrino & Raussoni (2000)	SR	$SST = T_4 + 1,4(T_4 - T_5) + 0,32(T_4 - T_5)^2 + 0,83$

citamente la dependencia con el ángulo de observación del sensor, θ . Esto se debe a que se ha determinado que el error producido al estimar la SST aumenta con el ángulo de observación, a consecuencia del crecimiento de la atenuación atmosférica debido al aumento de espesor óptico (Arbelo, 1997).

Por otra parte, los algoritmos de Coll *et al.* (1992) y Sobrino & Raussoni (2000), presentan ajustes de tipo cuadrático, donde el coeficiente A no es constante sino que depende linealmente de la diferencia de las temperaturas radiométricas, esto es, $A = a_0 + a_1 (T_4 - T_5)$, mientras el coeficiente B permanece constante.

La implementación de los distintos algoritmos presentados supone contar con información correspondiente a temperatura radiométrica en las bandas 4 y 5, que son obtenidas desde la imagen satelital original, utilizando el software especializado en tratamiento de imágenes ENVI en su versión 4.3.

En la Tabla 3 se presenta un resumen con las temperaturas estimadas por los distintos algoritmos mostrados en la Tabla 2 y para las fechas seleccionadas, en conjunto con las temperaturas radiométricas en las bandas 4 y 5 del sensor AVHRR y las temperaturas *in situ* registradas mediante la boya hidrográfica.

Al comparar las columnas que muestran las temperaturas radiométricas de las bandas 4 y 5, se aprecia (Fig. 1), como en todo momento las temperaturas de la banda 5 aparecen subestimadas con respecto a sus similares de la banda 4. Esto se puede atribuir a que en la ventana atmosférica 8-13 μm la absorción atmosférica es casi completamente debida al vapor de agua, con una variación poco acusada y aumentando monótonamente con la longitud de onda (Varanasi, 1988).

En la Figura 1, queda de manifiesto que al obtener las diferencias entre las mediciones superficiales de temperatura del mar *in situ* con las correspondientes temperaturas radiométricas o de brillo calculadas con los datos NOAA-AVHRR, se observa una subesti-

mación continua que significa encontrar diferencias de hasta 6,6°K (Fig. 2).

Al aplicar los algoritmos de SW, se observó una disminución en la diferencia entre la temperatura de mar medida *in situ* y la estimada por los algoritmos. En este caso, las diferencias estuvieron acotadas entre +2,8 y -0,9°K.

En la Tabla 4, se ilustra un cuadro resumen, con la media (μ) y la desviación estándar (σ) de la diferencia entre la temperatura superficial del mar medida *in situ*, T_{in} , con la temperatura radiométrica, T_4 y T_5 , y la temperatura estimada por los distintos algoritmos, SST.

Antes de comentar los resultados obtenidos, se destaca que los algoritmos empleados mostraron que la SST se expresó como una función lineal o cuadrática de la diferencia entre las temperaturas radiométricas, cuyos coeficientes se estimaron sobre la base de correlaciones estadísticas entre la SST medida *in situ* y las temperaturas T_4 y T_5 . Estas últimas pueden ser estimadas a partir de: (a) la información que aporta el satélite, es el caso del algoritmo de McClain *et al.* (1985), donde las regresiones se obtuvieron para una amplia variedad de condiciones atmosféricas, desde tropicales a latitudes medias; y del algoritmo de Sobrino & Raussoni (2000), que utilizaron la base de datos Pathfinder Oceans Match-up Database (PFMDB). La base PFMDB, con un registro de 17.817, es una compilación de datos con aproximadamente una diferencia en tiempo de 30 min y 10 km en espacio entre las medidas *in situ* de la SST y las temperaturas radiométricas T_4 , T_5 ; (b) la utilización de un modelo de transferencia radiativa, que permite simular las temperaturas radiométricas para una gran variedad de condiciones atmosféricas. Este es el caso del algoritmo propuesto Coll *et al.* (1992), que utilizan el modelo de transferencia radiativa LOWTRAN 7 (Kneizys *et al.*, 1988) para condiciones atmosféricas del tipo tropical, latitudes medias de verano e invierno, estándar (USA) y radiosondeos.

Tabla 3. Temperaturas radiométricas en las bandas 4 (T_4) y 5 (T_5) del sensor AVHRR, temperatura superficial del mar medida *in situ* (T_{in}) y temperatura superficial del mar estimada por los algoritmos SW de la Tabla 2.

Table 3. Radiometric temperatures in bands 4 (T_4) and 5 (T_5) from the AVHRR sensor; sea surface temperature measured *in situ* (T_{in}); and sea surface temperature estimated by the SW algorithms of Table 2.

Fecha	T_4 (°K)	T_5 (°K)	T_{in} (°K)	MC (°K)	C (°K)	SR (°K)
31-ago-05	286,6	286,2	289,2	286,8	287,6	288,0
09-sep-05	288,8	288,3	289,7	289,7	290,1	290,5
20-sep-05	286,6	286,2	288,7	286,7	287,5	288,0
21-sep-05	283,9	281,9	288,6	288,0	288,7	288,8
03-oct-05	288,1	287,6	289,2	288,7	289,3	289,8
11-oct-05	286,9	286,7	289,1	286,5	287,6	288,0
12-oct-05	289,5	289,3	289,6	289,4	290,3	290,7
14-oct-05	287,3	286,7	289,4	288,3	288,7	289,2
19-oct-05	286,6	286,4	288,8	286,2	287,3	287,7
28-oct-05	286,4	285,9	288,5	287,3	287,7	288,1
30-oct-05	286,9	286,6	288,9	286,7	287,7	288,1
01-nov-05	289,1	288,9	289,7	288,8	289,8	290,2
02-nov-05	287,9	287,8	290,2	287,4	288,6	288,9

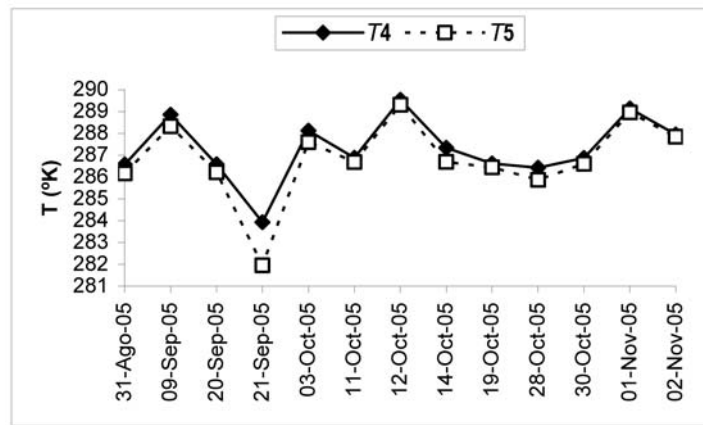


Figura 1. Series de tiempo correspondientes a las temperaturas radiométricas en los canales espectral 4 (T_4) y 5 (T_5) del sensor AVHRR-NOAA.

Figure 1. Time series corresponding to the radiometric temperatures in spectrum channels 4 (T_4) and 5 (T_5) of the AVHRR-NOAA sensor.

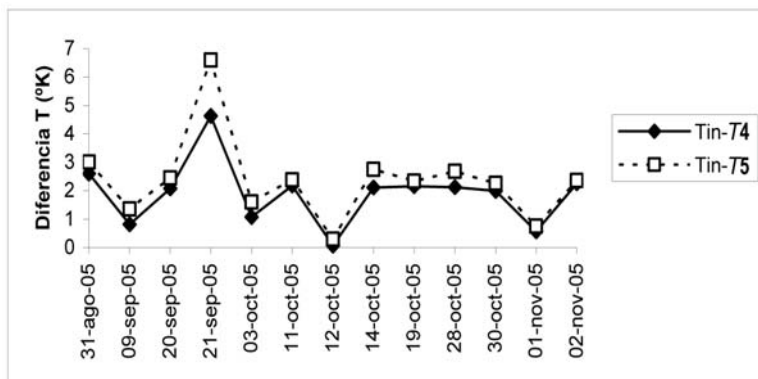


Figura 2. Diferencias entre las temperaturas superficiales del mar medidas *in situ* (T_{in}) y las radiométricas T_4 y T_5 .

Figure 2. Differences between the sea surface temperatures measured *in situ* (T_{in}) and the radiometric temperatures T_4 and T_5 .

Tabla 4. Media (μ) y desviación estándar (σ) de la diferencia entre la temperatura superficial del mar medida *in situ* (T_{in}), con la temperatura radiométrica en las bandas 4 y 5 (T_4 y T_5) y la temperatura estimada (SST) por los diferentes algoritmos.

Table 4. Mean (μ) and standard (σ) deviation of the difference between the sea surface temperatures measured *in situ* (T_{in}); the radiometric temperature in bands 4 and 5 (T_4 and T_5); and the temperature (SST) estimated by the different algorithms.

ΔT (°K)	μ (°K)	σ (°K)
$T_{in} - T_4$	1,9	1,1
$T_{in} - T_5$	2,3	1,5
$T_{in} - SST$ (MC)	1,5	1,0
$T_{in} - SST$ (C)	0,7	0,8
$T_{in} - SST$ (SR)	0,3	0,8

Con estos antecedentes, se observó que los algoritmos más recientes mostraron un mejor comportamiento; lo que significa que se ha producido una mejora en los modelos de simulación y/o en las medidas *in situ* de la SST. En efecto, de la tabla 4 se comprueba que el algoritmo que exhibe la mejor bondad de ajuste corresponde al de Sobrino & Raussoni (2000), con una media 0,3°K. En cuanto a las desviaciones se comprueba que los valores obtenidos son iguales, exceptuando el caso del algoritmo de McClain *et al.* (1985).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto DI08-0029, de la Universidad de La Frontera por su apoyo a la presente investigación, al Dr. Samuel Hormazábal de la Universidad de Concepción por facilitar la información *in situ* de la SST, y al Comprehensive Large Array-data Stewardship System (CLASS) por facilitar gratuitamente las imágenes satelitales correspondientes al satélite NOAA.

REFERENCIAS

Arbelo, M. 1997. Determinación de la temperatura superficial de mar mediante la sinergia de los sensores AVHRR y TOVS: aplicación a Canarias. Tesis Doctoral, Universidad de la Laguna, Canarias, 207 pp.

Coll, C., V. Casselles & J.A. Sobrino. 1991. Desarrollo de un modelo de corrección atmosférica en el térmico. II. Aplicación a los canales 4 y 5 del NOAA. *Rev. Esp. Fís.*, 25: 120-132.

Donlon, C., W. Wimmer, I. Robinson, G. Fisher, D. Poulter, & G. Corlett. 2006. Validation of AATSR using *in situ* radiometers in the English channel and bay of Biscay. *Proceedings. Second Working Meeting MAVT-2006, Frascati*, pp. 20-24.

Kneizys, F., E. Shettle, L. Abreu, G. Anderson, J. Chetwynd, W. Gallery, J. Selby & S. Clough. 1988. *Users guide to LOWTRAN 7. Technical Report AFGL-TR-88-0177, Optical/Infrared Technology Division US Air Force Geophysics Laboratory, Hascom Air Force Base, Massachusetts*, 137 pp.

McClain, E., W. Pichel & C. Walton. 1985. Comparative performance of AVHRR based multichannel sea surface temperatures. *J. Geophys. Res.*, C6: 11587-11601.

McMillin, L.M. 1975. Estimation of the sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption, *J. Geophys. Res.*, 36: 5113-5117.

Morales, L. & J. Parra. 2002. Estimating thermal infrared radiance emitted by the atmosphere using reanalysis data. *Rev. Mex. Fis.*, 48: 119-121.

Parra, J., J.A. Sobrino, L. Morales, G. Castellaro, J. Uribe & N. Gaete. 2006. Aplicación de un algoritmo de split-window para la estimación de la temperatura de la superficie terrestre desde datos AVHRR-NOAA. *Agric. Téc.*, 66(4): 385-392.

Pinilla, C. & J. Fenoy. 2008. Temperatura de superficie del mar (SST) del Mar de Alborán. En: L. Hernández, & J.M. Parreño (eds.). *Tecnologías de la información geográfica para el desarrollo territorial. Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la ULPGC. Las Palmas de Gran Canaria*, pp. 695-706.

Quin, Z., G. Dall'Olmo, A. Karnieli & P. Berluser. 2001. Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis for retrieving land surface temperature from NOAA-AVHRR data. *J. Geophys. Res.*, 106(D19): 22655-22670.

Sobrino, J.A. & N. Raissouni. 2000. Toward remote sensing methods for land cover dynamics monitoring: application to Morocco. *Int. J. Remote Sens.*, 21(2): 353-366.

Sobrino, J.A., N. Raissouni, Y. Kerr, A. López, A. Belaid, M. El Kharraz, J. Cuenca & L. Dempere. 2000. Sensores y Plataformas. En: J.A. Sobrino (ed.). *Teledetección. Servicio de Publicaciones, Universitat de Valencia, Valencia*, pp. 33-73.

Varanasi, P. 1988. Infrared absorption by water vapor in the atmospheric window. *Proceedings of the Meeting. Modeling of the Atmosphere Orlando, Florida*, pp. 213-230.

Vera, L., J. Parra, L. Morales, C. Mattar & E. Jorquera. 2010. Comparative analysis of Split-Window algorithms for estimating soil temperature. *R.C. Suelo Nutr. Veg.*, 10(1): 35-39.