

APLICACIÓN DE UN ALGORITMO DE SPLIT-WINDOW PARA LA ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE TERRESTRE DESDE DATOS AVHRR-NOAA

Application of a split-window algorithm to estimate land surface temperature from NOAA-AVHRR data

Juan Parra^{1*}, José Sobrino², Luis Morales³, Giorgio Castellaro⁴, Juan Uribe⁴
y Nelba Gaete⁵

ABSTRACT

The estimation of land surface temperature, in partial to completely cloudless clear days, was estimated using data from the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) sensor aboard the satellites of the series National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) for application of an algorithm based in the Split Window's method. The utilized algorithm presupposes corrections for emissivity and the total atmospheric water vapour, and it was validated with field measurements of surface temperature. To this end an LI-1000 data logger was installed at the Agrometeorology Station dependent of the National Institute of Agricultural Research, Carillanca Regional Research Center Carillanca, Region of the Araucanía (38°41' S lat; 72°25'W long; 200 m.o.s.l.). The measurements of temperature were realized at time intervals of one hour. Obtained results showed that the application of the algorithm permits obtaining the land surface temperature with a high degree of confidence, having a root mean square error (RMSE) inferior to 1%.

Keys words: emissivity, land surface temperature, water vapour, radiometer, satellite.

RESUMEN

Estimaciones de temperatura de la superficie terrestre, en días parciales a completamente despejados, fueron realizadas a partir de los datos proporcionados por el sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), a bordo de la serie de satélites de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) por aplicación de un algoritmo basado en el método de Split-Window. El algoritmo utilizado supone correcciones por emisividad y contenido de vapor de agua atmosférico, y fue validado con mediciones de temperatura de la superficie terrestre realizadas en terreno. Para esto, un data logger LI-1000 se instaló en la Estación Agrometeorológica dependiente del Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Carillanca, Región de la Araucanía (38°41' lat. S; 72°25' long. O; 200 m.s.n.m). Las mediciones de temperatura se realizaron a intervalos temporales de una hora. Los resultados obtenidos muestran que la aplicación del algoritmo permite obtener la temperatura de la superficie terrestre con un alto grado de confianza, obteniéndose un error cuadrado medio de la predicción (RMSE) inferior al 1%.

Palabras clave: emisividad, temperatura de la superficie terrestre, vapor de agua, radiómetro, satélite.

¹ Universidad de La Frontera, Facultad de Ingeniería Ciencias y Administración, Casilla 54 D, Temuco, Chile.
E-mail: jparra@ufro.cl *Autor para correspondencia.

² Universidad de Valencia, Facultad de Física, Dr. Moliner 50, 46100, Valencia, España.

³ Universidad Tecnológica Metropolitana, Facultad de Ciencias Naturales, Matemáticas y del Medio Ambiente, Casilla 9845, Santiago, Chile.

⁴ Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Casilla 1004, Santiago, Chile.

⁵ Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Carillanca, Casilla 58-D, Temuco, Chile.

Recibido: 20 de enero de 2005. Aceptado: 20 de mayo de 2005.

INTRODUCCIÓN

La determinación de la temperatura de la superficie terrestre, T_s , constituye uno de los parámetros más relevantes en la estimación de diversas variables de interés agronómico, tales como el flujo de radiación neta y la evapotranspiración, entre otras (Villalobos *et al.*, 2002; Ortega *et al.*, 2004). En la práctica, la estimación de la T_s se realiza mediante termómetros o termistores, y por lo tanto, con la problemática asociada a los altos costos económicos involucrados si se quieren cubrir extensas áreas geográficas. La solución a estos inconvenientes surge en los años 50 con el desarrollo de la tecnología infrarroja y con su posterior ubicación a bordo de satélites artificiales. Desde el primero de ellos, el Television Infrared Operation Satellite (TIROS), hasta los actuales satélites de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y Land Satellite (LANDSAT), que permiten el acceso de información a escala sinóptica de la superficie de la tierra.

No obstante, uno de los mayores problemas que plantea la medida de la T_s desde satélites, es la acción combinada de las perturbaciones debidas a la emisividad del terreno y el efecto atmosférico. 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 (Sobrino *et al.*, 2004a), en cambio, el efecto de la emisividad se debe a la heterogeneidad de los elementos presentes en la superficie terrestre (Morales y Parra, 2002). Por lo tanto, una adecuada estimación de la T_s desde datos aportados por satélites, requerirá corregir los efectos antes mencionados.

Dentro de las técnicas disponibles que abordan el problema de la corrección atmosférica y de emisividad, destaca el método de Split-Window, que combina los datos obtenidos simultáneamente por dos canales espectrales en la misma ventana de transmi-

sión atmosférica (McMillin y Crosby, 1984; Sobrino *et al.*, 1991; Parra *et al.*, 2002; Sobrino *et al.*, 2004b). La base de esta técnica radica en el hecho que la atenuación atmosférica que experimenta la radiancia emitida por la superficie terrestre, es proporcional a la diferencia entre las radiancias medidas desde satélite y realizadas simultáneamente en dos canales térmicos distintos. En la actualidad existe una variedad de algoritmos, que basados en la técnica de Split-Window, estiman la T_s desde datos provenientes de los satélites de la serie NOAA (Barton, 1983; Becker y Li, 1990; Prata y Platt, 1991; Zhilhao *et al.*, 2001). Estos satélites describen una órbita heliosíncrona, casi polar, situada a una altitud entre 830-870 km, con un período orbital de 101 minutos. Uno de los sensores a bordo es el Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), que posee cinco canales en el espectro electromagnético (Cuadro 1), tiene un ángulo de visión de $110,8^\circ$, y genera una franja de barrido de 3000 km de ancho, lo que equivale en el ecuador a $27,2^\circ$ de longitud. La resolución espacial del píxel es de 1 km x 1 km en el nadir (Sobrino, 2000),

Uno de los algoritmos, del tipo Split-Window, a utilizar en la presente investigación, es el sugerido por Sobrino *et al.* (1996), que además de su sencillez matemática tiene la ventaja de no requerir información ajena a la aportada por el satélite. Su implementación requiere del conocimiento del contenido de vapor de agua atmosférico, temperatura radiométrica, emisividad media, y la variación espectral de la emisividad en la ventana atmosférica $10,3 - 12,5 \mu\text{m}$. De acuerdo a lo propuesto por el autor antes citado, la T_s ($^\circ\text{K}$) puede ser estimada por la siguiente ecuación:

$$T_s = T_4 + (2 + 0,28 W) (T_4 - T_5) - (0,4 - 0,48 W) + (53 - 4W) (1 - \epsilon) + (149 - 26W) \Delta\epsilon \quad (\text{Ecuación 1})$$

Cuadro 1. Bandas espectrales del sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR).
Table 1. Spectral bands of the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) sensor.

Banda	Intervalo espectral, mm	Aplicaciones
1	0,58-0,68	Seguimiento de nubes, nieve y capa de hielo
2	0,72-1,1	Discriminación de superficies de aguas y vegetación, aplicaciones agrícolas
3	3,55-3,93	Temperatura superficial del mar, volcanes e incendios forestales
4	10,3-11,3	Temperatura del mar, humedad del suelo
5	11,5-12,5	Temperatura del mar, humedad del suelo

donde T_4 y T_5 , medidas en °K, son las temperaturas radiométricas provenientes de los canales 4 (10,3-11,3 μm) y 5 (11,5-12,5 μm) del sensor AVHRR, obtenidas bajo la hipótesis de que la superficie terrestre emite como cuerpo negro, y de la inexistencia de atmósfera entre la superficie observada y el sensor; W corresponde al contenido en vapor de agua existente en la atmósfera (g cm^{-2}); ϵ representa la emisividad media, la cual es estimada como el promedio simple de las emisividades de los canales 4 (ϵ_4) y 5 (ϵ_5), ($\epsilon = \frac{\epsilon_4 + \epsilon_5}{2}$) y $\Delta\epsilon$ representa la variación espectral ($\Delta\epsilon = \epsilon_4 - \epsilon_5$). Tanto ϵ como $\Delta\epsilon$ son cantidades adimensionales.

En la ecuación (1), todas las variables de entrada involucradas para el cálculo de la T_s pueden ser obtenidas a partir de la información aportada por el sensor a bordo del satélite. Teóricamente, W en el intervalo de alturas z - h (m) puede ser calculado por la expresión indicada en la ecuación (2):

$$W(h, z) = \int_z^h \rho(z') dz' \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde $\rho(z')$ es la densidad del vapor de agua (kg m^{-2}) a una altura z' (m).

Sin embargo, la determinación de W desde los datos AVHRR es insatisfactoria. Una estimación adecuada para este parámetro se logra a partir de la información aportada por los radiosondeos, pero en la práctica no siempre son posibles de obtener, ya sea por su costo o por el inconveniente que supone disponer de la información que sea coincidente con la fecha y hora de pasada del satélite. Una solución es recurrir a bases de datos históricas generadas por organismos de meteorología, como la proporcionada por el proyecto conjunto entre el National Center for Environment Prediction (NCEP) y el National Center for Atmospheric Research (NCAR), cuyo propósito es generar diversos análisis del estado de la atmósfera usando datos disponibles, tanto históricos (desde 1948) como actuales (Kalnay *et al.*, 1996; Kistler *et al.*, 2001). Éstos se presentan en datos medios diarios y mensuales, y abarcan todo el planeta, con una resolución de 2,5 grados. En esta línea de acción y a partir de un análisis de tipologías o de cluster, Morales *et al.* (2002) encontraron para el Cono Sur de América la variabilidad espacio-temporal de W .

El objetivo del presente trabajo fue aplicar el algoritmo sugerido por Sobrino *et al.* (1996) para estimar la temperatura de la superficie terrestre a partir de datos proporcionados por el sensor AVHRR-NOAA.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para evaluar el algoritmo propuesto en este trabajo, se realizaron medidas en terreno de la temperatura de la superficie terrestre (temperatura *in situ*), a intervalos de 1 h, mediante un sensor de temperatura de suelo conectado a un data logger (LI-1000, LICOR, Nebraska, USA), que se instaló en la Estación Agrometeorológica del Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Carillanca, Región de La Araucanía (38°41' lat. S; 72°25' long. O; 200 m.s.n.m). Esta estación se ubica en la macroárea agroclimática II (Rouanet, 1983), caracterizada por un clima mediterráneo frío, en que la temperatura media anual es de 10°C, con una máxima media del mes más calido (enero) de 21,5°C y una mínima media del mes más frío (julio) de 2,3°C (Novoa y Villaseca, 1989). El sector se caracteriza por poseer topografía plana, con pendientes de 0-25%. La fisiografía corresponde a la depresión intermedia, en posición de terrazas aluviales recientes. Los suelos son derivados de cenizas volcánicas modernas (andisoles), pertenecientes a la serie de suelos Vilcún (Tosso, 1985).

El data logger LI-1000 es un equipo multipropósito que tiene 10 canales de entrada pudiendo, por tanto, conectar diversos tipos de sensores. Para este estudio se utilizó un sensor de temperatura de suelo, termistor no lineal, calibrado en el rango -10 a 50°C, con un error medio cuadrático de 0,05603°C (LI-COR, 1990). Con el propósito de medir efectivamente la temperatura en superficie, el sensor se enterró a 1,0 cm de profundidad.

Para implementar el algoritmo propuesto en la Ecuación 1, se utilizaron imágenes correspondientes al satélite NOAA 16 en sus bandas espectrales del visible e infrarrojo térmico, obtenidas gratuitamente del Comprehensive Large Array-data Stewardship System (CLASS). CLASS es una iniciativa de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) del Departamento de Comercio de los Estados Unidos de América. La base de datos de imágenes en formato LAC (Local Area Coverage), nivel 1B, abarcaron los meses de septiembre a

octubre de 2003 y enero de 2004, debido a que en esas fechas se programaron las mediciones de terreno. A objeto de evitar el efecto generado por la nubosidad, se realizó una selección rigurosa de las imágenes considerando días parcialmente nublados a completamente despejados. De un total de 92 imágenes revisadas, y debido a que algunas presentaron defectos en la recepción de la información, se seleccionaron sólo 17 imágenes que cumplieron con los requisitos antes indicados (Cuadro 2).

Para las diferentes imágenes y mediante la utilización del programa ENVI (ENVI, 2003) versión 4.0, se obtuvieron las temperaturas radiométricas correspondientes a las bandas 4 y 5 del sensor AVHRR-NOAA. La obtención de la imagen termal se realizó a través de la utilización del módulo Calibrate Data, que transforma los valores de cuentas digitales en temperaturas radiométricas.

La emisividad media y su variación espectral, se estimaron mediante la aplicación del método de umbrales (Sobrino y Raissouni, 2000). Este método utiliza el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) para clasificar los píxeles de acuerdo al

Cuadro 2. Fechas de selección y horas de pasadas del satélite NOAA 16, que dan cuenta de las imágenes utilizadas en las estimaciones de la temperatura de superficie.

Table 2. Dates of selection and passing time of the NOAA 16 satellite, reporting the images utilized in surface temperature estimations.

Número de la imagen	Fecha	Hora de paso (GMT)
1	02/09/2003	19:03
2	08/09/2003	19:36
3	09/09/2003	19:25
4	10/10/2003	18:36
5	14/10/2003	19:32
6	22/10/2003	19:42
7	26/10/2003	18:57
8	27/10/2003	18:45
9	28/10/2003	18:34
10	03/01/2004	19:20
11	04/01/2004	19:08
12	05/01/2004	18:57
13	11/01/2004	19:30
14	13/01/2004	19:07
15	14/01/2004	18:55
16	20/01/2004	19:28
17	30/01/2004	19:15

porcentaje de cobertura de la vegetación. Los criterios de umbralización usados para el NDVI se basan en la respuesta de este índice frente a distintas coberturas de suelo y vegetación. En el caso de píxeles solamente con vegetación el $NDVI > 0,5$; con suelo desnudo el $NDVI < 0,2$; o mezcla de ambos $0,2 \leq NDVI \leq 0,5$ (Carlson y Ripley, 1997). De esta manera, según se trate de un tipo de píxel o de otro, se utilizan distintas formas para calcular la emisividad. Los valores de NDVI se calcularon a partir de la expresión:

$$NDVI = \frac{\rho_{irc} - \rho_r}{\rho_r + \rho_{irc}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

donde ρ_r y ρ_{irc} son las reflectividades (adimensional) en los canales rojo e infrarrojo cercano, respectivamente.

a) Píxeles mixtos ($0,2 \leq NDVI \leq 0,5$): estos píxeles se consideran compuestos por superficies heterogéneas y rugosas, que son los más habituales de encontrar. En este caso la emisividad se obtiene al considerar la superficie compuesta por una mezcla de suelo desnudo y vegetación. Bajo esta premisa, los algoritmos de cálculo para ε y $\Delta\varepsilon$ son:

$$\varepsilon = 0,971 + 0,018 P_v \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$\Delta\varepsilon = 0,006 (1 - P_v) \quad (\text{Ecuación 5})$$

donde el término P_v representa la proporción de vegetación, el cual se obtiene por la ecuación (6) (Carlson y Ripley, 1997):

$$P_v = \frac{(NDVI - 0,2)^2}{0,09} \quad (\text{Ecuación 6})$$

b) Píxeles con suelo desnudo ($NDVI < 0,2$): para este tipo de condición, la proporción de vegetación (P_v) es igual a cero, por lo que en estos casos, ε y $\Delta\varepsilon$ se expresan como una combinación lineal de la reflectividad en el ancho de banda correspondiente al rojo (ρ_r):

$$\varepsilon = 0,980 + 0,042 \rho_r \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$\Delta\varepsilon = 0,003 - 0,029 \rho_r \quad (\text{Ecuación 8})$$

c) Píxeles sólo con vegetación ($NDVI > 0,5$): en este caso, como los píxeles están cubiertos completamente con vegetación, P_v es igual a la unidad. Como la vegetación presenta variaciones espectrales mínimas dentro del rango 8-13 μm , se pueden

asignar a estos pixeles un valor de emisividad media constante para todo el ancho de banda, con un valor típico de:

$$\epsilon = 0,99 \quad \text{(Ecuación 9)}$$

$$\Delta\epsilon = 0 \quad \text{(Ecuación 10)}$$

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para comparar los datos de temperatura de la superficie terrestre medidos en terreno con los obtenidos mediante el método evaluado en este trabajo (algoritmo de Split-Window), se calculó una ecuación de regresión lineal entre los valores observados (X) y los valores simulados (Y) (Shannon, 1988). Los parámetros de tales ecuaciones se evaluaron planteando pruebas de hipótesis simultáneas para el intercepto (Ho: a = 0) y para la pendiente (Ho: b = 1) mediante la prueba “t” de Student y un valor P ≤ 0,05 (Steel y Torrie, 1988). Adicionalmente, se calculó la raíz del error cuadrado medio de la predicción (RMSE), expresando el resultado en unidades absolutas, como también en unidades porcentuales en relación al valor promedio obtenido en las observaciones reales (Rabat, 1995). Este coeficien-

te indica el grado de sobre o subestimación que realiza el modelo respecto del promedio de los valores observados.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ValSim_i - ValObs_i)^2}{n}} \left(\frac{100}{ValObsprom} \right) \quad \text{(Ecuación 11)}$$

En la ecuación anterior, *ValSim_i* y *ValObs_i*, representan los valores de las observaciones simuladas y las medidas en terreno, respectivamente, *ValObsprom*, es el promedio de las observaciones reales y *n* representa el número de pares de datos utilizados en el cálculo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 3 se ilustran por fecha el contenido de vapor de agua atmosférico (g cm⁻²), la emisividad media (ε) y su variación espectral (Δε), las temperaturas radiométricas en las bandas 4 y 5 del sensor AVHRR (T₄ y T₅, °K), la temperatura medida *in situ* (T_{*in situ*}, °K) y la temperatura estimada por el

Cuadro 3. Contenido de vapor de agua atmosférico (W), emisividad media (ε), variación espectral (Δε), temperaturas radiométricas en las bandas 4 y 5 del sensor AVHRR (T₄, T₅), temperatura medida *in situ* (T_{*in situ*}) y la temperatura de superficie estimada por el algoritmo de Split-Window (T_s), en diferentes fechas.

Table 3. Atmospheric water vapor content (W), mean emissivity (ε), spectral variation (Δε), radiometric temperatures in the 4 and 5 bands (T₄, T₅), measurement of *in situ* temperature (T_{*in situ*}) and surface temperature estimated for by the Split-Window algorithm (T_s), in different dates.

Fecha	W (g cm ⁻²)	ε	Δε	T ₄ (°K)	T ₅ (°K)	T _{<i>in situ</i>} (°K)	T _s (°K)
02/09/2003	0,98	0,97	0,00500	278,3	276,1	289,3	285,7
08/09/2003	0,98	0,97	0,00400	274,0	272,1	286,4	283,4
09/09/2003	0,98	0,98	0,00098	286,5	284,6	287,2	289,1
10/10/2003	1,09	0,98	0,00020	288,8	287,1	293,9	293,3
14/10/2003	1,09	0,99	0,00000	296,6	295,4	296,9	300,7
22/10/2003	1,09	0,99	0,00000	292,2	290,6	300,3	296,3
26/10/2003	1,09	0,99	0,00000	288,3	287,2	294,3	291,4
27/10/2003	1,09	0,99	0,00000	291,1	288,9	295,0	296,7
28/10/2003	1,09	0,99	0,00000	291,6	289,1	300,2	297,8
03/01/2004	1,09	0,99	0,00000	295,2	294,0	298,9	299,0
04/01/2004	1,57	0,99	0,00000	283,4	278,1	299,4	297,0
05/01/2004	1,57	0,98	0,00230	292,2	289,7	300,9	299,6
11/01/2004	1,57	0,99	0,00000	294,4	292,3	300,6	300,3
13/01/2004	1,57	0,99	0,00000	299,1	297,1	305,8	304,5
14/01/2004	1,57	0,98	0,00150	301,2	298,6	307,2	308,2
20/01/2004	1,57	0,97	0,00480	293,1	289,6	302,1	298,0
30/01/2004	1,57	0,98	0,00160	297,7	295,8	300,4	303,7

algoritmo de Split-Window (T_s , °K). Según se advierte del cuadro, las temperaturas radiométricas en las bandas 4 y 5 aparecen subestimadas si se las compara con las temperaturas de superficie medidas *in situ*, obteniéndose diferencias absolutas de hasta 21°K. Lo anterior deja de manifiesto el efecto introducido al omitir la emisividad del suelo y el contenido de vapor de agua atmosférico en la temperatura radiométrica. En la Figura 1 se evidencia este efecto para el mes de enero del 2004.

Al incluir la emisividad y el vapor de agua atmosférico, ambos contenidos en la ecuación de Split-Window utilizada, se obtienen diferencias

absolutas entre la T_s (°K) estimada y la temperatura medida *in situ*, de hasta 4°K. En efecto, al calcular la relación existente entre la T_s (°K) estimada y la $T_{in situ}$ (°K), se logró obtener una ecuación significativa ($P < 0,00001$) a un nivel de confianza del 99%, con un error estándar de 2,575°K (Cuadro 4).

El coeficiente de determinación de la regresión lineal indica que este algoritmo permite explicar en un 85,44% la variabilidad de la temperatura de superficie (Figura 2). Al realizar los test de hipótesis a los valores del intercepto y la pendiente de dicha ecuación, se pudo concluir que éstos no difirieron del valor cero y uno, respectivamente. El error

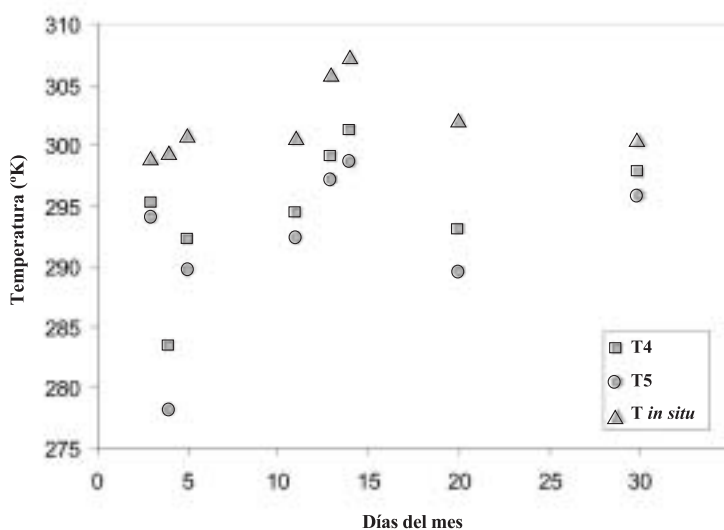


Figura 1. Temperaturas radiométricas en las bandas 4 y 5 (T_4 , T_5) y $T_{in situ}$ medidas en el mes de enero de 2004, Estación Agrometeorológica INIA-Carillanca (38°41' lat. S; 72°25' long. O; 200 m.s.n.m.).

Figure 1. Radiometric temperatures in the 4 and 5 bands (T_4 , T_5) and $T_{in situ}$ measured in January 2004, Agrometeorology Station, INIA-Carillanca (38°41' S lat; 72°25' W long; 200 m.o.s.l.).

Cuadro 4. Ecuación de regresión obtenida entre los valores medidos (T_s) y estimados ($T_{in situ}$) de la temperatura de superficie mediante el algoritmo de Split-Window.

Table 4. Regression equation obtained between measured values (T_s) and estimated values ($T_{in situ}$) of surface temperature using Split-Window algorithm.

Modelo lineal: $T_s = a + bT_{in situ}$				
Parámetro	Estimación	Error estándar	Valor t	Valor p
a (intercepto)	-6,88434	32,3644	-0,212714	0,8344
b (pendiente)	1,02035	0,10874	9,3834	0,0000
Coeficiente de correlación = 0,924358.				
$R^2 = 85,4437\%$.				
Error estándar = 2,57479 °K				

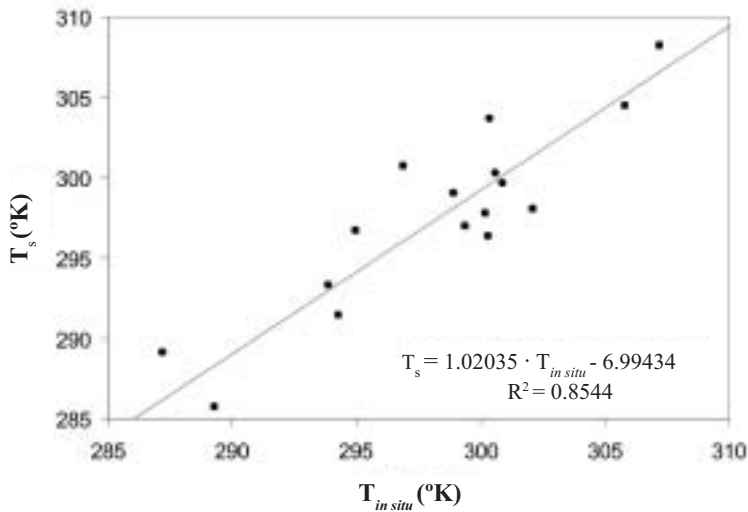


Figura 2. Valores reales ($T_{in\ situ}$) y estimados (T_s) de temperatura de superficie obtenidos mediante la aplicación del algoritmo de Split-Window, Estación Agrometeorológica INIA-Carillanca (38°41' lat. S; 72°25' long. O; 200 m.s.n.m.).

Figure 2. Real ($T_{in\ situ}$) and estimated (T_s) values of surface temperature obtained using through the application of the Split-Window algorithm, Agrometeorology Station, INIA-Carillanca (38°41' S lat; 72°25' W long; 200 m.o.s.l.).

cuadrático medio de la predicción (RMSE) fue de 2,26°K, lo que en porcentaje respecto del promedio de los datos observados representó un 0,86%.

La literatura cita otros algoritmos del tipo Split-Window para estimar la temperatura de la superficie terrestre, los cuales difieren en su estructura matemática en relación al vapor de agua y la emisividad (Sobrino *et al.*, 1994). Una comparación entre los tres algoritmos más usados (Prata y Platt, 1991; Sobrino *et al.*, 1993; Ulivieri *et al.*, 1994) permite advertir errores medios cuadráticos relativos superiores al 0,90%, en cambio el logrado en este trabajo fue de 0,86%.

CONCLUSIONES

La aplicación de un algoritmo Split-Window ha permitido estimar la temperatura de la superficie terrestre, a partir de los datos suministrados por los canales 4 y 5 del sensor AVHRR. Su implementación requiere conocer las temperaturas radiométricas, emisividad media en la ventana atmosférica 10,3-12,5 μ m, variación espectral de la emisividad dentro de esta ventana, además del contenido de vapor de agua atmosférico.

Los resultados logrados en esta investigación indican

que las variaciones encontradas entre la temperatura radiométrica y la medida en terreno dejan en evidencia el efecto introducido al omitir la emisividad del terreno y el contenido de vapor de agua atmosférico. Así, las temperaturas radiométricas T_4 y T_5 (°K) aparecen subestimadas al compararlas con la $T_{in\ situ}$ (°K), obteniéndose diferencias absolutas de hasta 21°K. Por el contrario, al introducir la corrección por emisividad y vapor de agua y al contrastar la T_s (°K) estimada con la $T_{in\ situ}$ (°K), se logró obtener una ecuación significativa ($P < 0,00001$) a un nivel de confianza del 99%, con un error estándar de 2,575°K.

La aplicación del algoritmo permitió obtener la temperatura de la superficie terrestre con un alto grado de confianza y con un RMSE inferior al 1%. Este valor resultó menor respecto al calculado con otros algoritmos del tipo Split-Window. Lo anterior, puede ser atribuible a la mejora observada en los modelos de transferencia radiativa y las bases de datos utilizadas en la confección de los algoritmos.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen el apoyo financiero prestado por el Proyecto DIDUFRO N° 120320, financiado por la Universidad de La Frontera (Chile) y a la Agencia Española de Cooperación Internacional (AECI) en el marco del proyecto A/0229/03.

LITERATURA CITADA

- Barton, I.J. 1983. Dual channel satellite measurements of sea surface temperature. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 109:365-378.
- Becker, F., and Z.L. Li. 1990. Towards a local split window method over land surfaces. *Int. J. Remote Sens.* 11:369-394.
- Carlson, T., and D. Ripley. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sens. Environ.* 62:241-252.
- ENVI. 2003. Environments for visualizing images. Research System Inc. Available at: <http://www.RSInc.com/envi> Accessed 30 November 2004.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, *et al.* 1996. The NCEP/NCAR 40 year Reanalysis Project. p. 437-471. *Bull. Am. Meteorol. Soc., Washington D.C., USA.*
- Kistler R., E. Lkalnay, W. Collins, S. Saha, G. White, J. Woollen, *et al.* 2001. The NCEP NCAR 50 year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and documentation. p. 247-267. *Bull. Am. Meteorol. Soc., Washington D.C., USA.*
- LI-COR. 1990. LI-1000 Datalogger instruction manual. 77 p. Publication N° 8510-0051. LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA.
- Morales, L., and J.C. Parra. 2002. Estimating thermal infrared radiance emitted by atmosphere using reanalysis data. *Rev. Mex. Fis.* 48:119-121.
- Morales, L., J.C. Parra, and J.A. Sobrino. 2002. Estimating land surface temperature in South America from NOAA-AVHRR images and reanalysis data. p. 698-707. *Proc. First International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing.* 16-20 September. Universidad de Valencia, Valencia, España.
- McMillin, L., and D. Crosby. 1984. Theory and validation of the multiple window sea surface temperatures technique. *J. Geophys. Res.* 89:3655-3661.
- Novoa S.-A., R., y C.S. Villaseca. 1989. Mapa agroclimático de Chile. 221 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago, Chile.
- Ortega, S., R. Calderón, N. Martelli, y R. Antonioletti. 2004. Evaluación de un modelo para estimar la radiación neta sobre un cultivo de tomate industrial. *Agric. Téc. (Chile)* 64:41-49.
- Parra, J.C., J. Sobrino, and L. Morales. 2002. Cartography of thermal inertia for deposits of volcanic ash from AVHRR-NOAA data: eruption of Lonquimay volcano (1988), Chile. p. 87. *In Proc. First International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing.* 16-20 September. Universidad de Valencia, Valencia, España.
- Prata, A.J., and C. Platt. 1991. Land surface temperature measurements from the AVHRR. p. 433-438. *Proc. of the 5th AVHRR Data Users Meeting.* June 25-28. Tromso, Norway.
- Rabat, P.M. 1995. Modelling and parametrization of the soil-plant-atmosphere system. 513 p. Wageningen Press, Wageningen, The Netherlands.
- Rouanet M., J. 1983. Clasificación Agroclimática IX Región. Macroárea II, 2ª aproximación. *Investigación y Progreso Agropecuario Carillanca* 2(2):23-26.
- Sobrino J., 2000. Teledetección. 467 p. Universitat de Valencia, Valencia, España.
- Sobrino J., V. Caselles, and C. Coll. 1993. Theoretical split window algorithms for determining the actual surface temperature. *II Nuovo Cimento* 16:219-236.
- Sobrino, J., C. Coll, and V. Caselles. 1991. Atmospheric correction for land surface temperature using NOAA-11 AVHRR channels 4 and 5. *Remote Sens. Environ.* 38:19-34.
- Sobrino, J., J.C. Jiménez, J. El-Kharraz, M. Gómez, M. Romaguera, and G. Soria. 2004a. Single channel and two channels methods for land surface temperature retrieval DAIS data and its application to Barrax site. *Int. J. Remote Sens.* 25:215-230.
- Sobrino, J. A., J. C. Jiménez-Muñoz, y L. Paolini. 2004b. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sens. Environ.* 90:434-440.
- Sobrino, J., Z.L. Li, M.P. Stoll, and F. Becker. 1994. Improvements in the Split-Window technique for land surface temperature determination. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 32:243-253.
- Sobrino, J., Z.L. Li, M.P. Stoll, and F. Becker. 1996. Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data. *Int. J. Remote Sens.* 17:2089-2114.
- Sobrino, J., and N. Raissouni. 2000. Toward remote sensing methods for land cover dynamics monitoring: Application to Morocco. *Int. J. Remote Sens.* 21:353-366.
- Shannon, E. 1988. Simulación de sistemas, diseño, desarrollo e implementación. 427 p. Editorial Trillas, México DF.
- Steel, R., y J. Torrie. 1988. Bioestadística, principios y procedimientos. 622 p. Mc Graw-Hill, New York, USA.
- Tosso T., J. 1985. Suelos volcánicos de Chile. 723 p. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Santiago, Chile.
- Ulivieri, C., M. Castronuovo, R. Francioni, and A. Cardillo. 1994. A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellites. *Advances in Space Research* 14(3):59-65.
- Zhilhao, Q., G. Dall'Olmo, and A. Karneili. 2001. Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis for retrieving land surface temperature from NOAA-Advanced Very High Resolution Radiometer Data. *J. Geophys. Res.* 106:22.655-22.670.