



CORRECCIONES PARA LA MEDIDA DE LA TEMPERATURA DESDE SATÉLITE

Dr. Raúl Rivas

Comisión de Investigaciones Científicas de Buenos Aires

Instituto de Hidrología de Llanuras

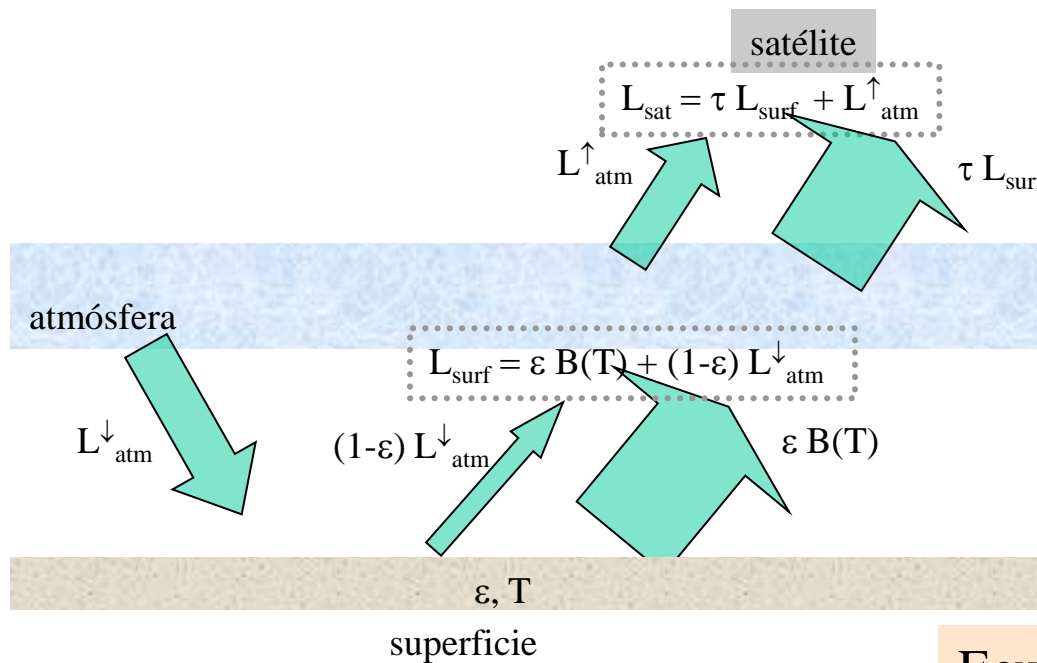
Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires



CORRECCIONES EN EL INFRARROJO TÉRMICO

El efecto atmosférico: Medio **absorbente** y **emisor** (H_2O , CO_2 , O_3 , ...)
Medio **no dispersivo** (excepto aerosoles)

El efecto de la emisividad: Modifica la **emisión térmica** de la superficie
Reflexión de la emisión atmosférica



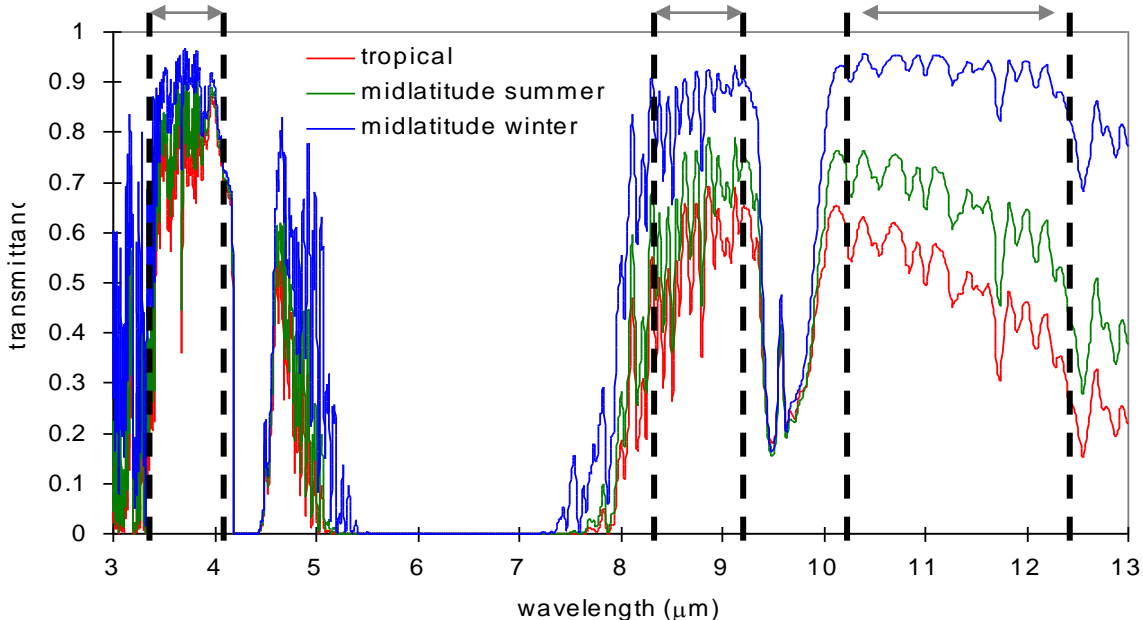
Ecuación de transferencia radiativa

$$L_{\text{sat}} = [\varepsilon B(T) + (1-\varepsilon) L_{\text{atm}}^{\downarrow}] \tau + L_{\text{atm}}^{\uparrow}$$

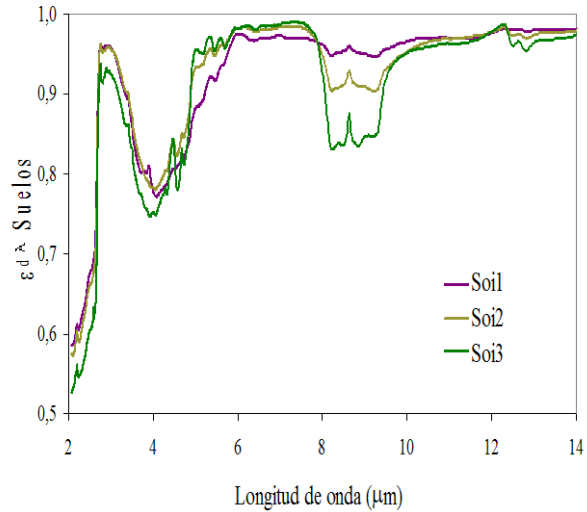
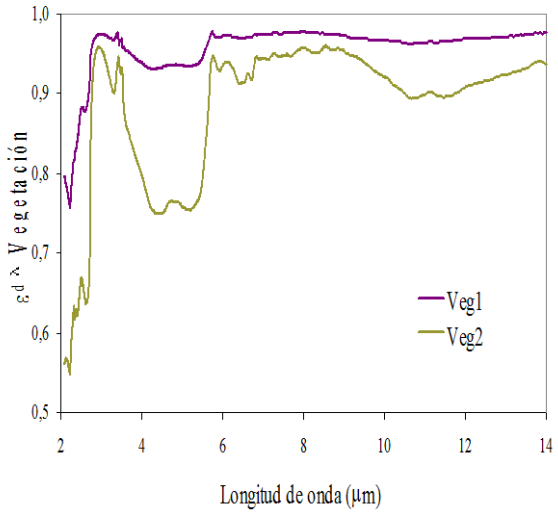


Ventanas atmosféricas

Banda A: 3,4 – 4,1 μm
 Banda B: 8,3 – 9,2 μm
 Bandas C y D: 10 – 12,5 μm



Emisividad de la superficie



Muestra	ϵ_{8-14}	$\epsilon_{10-12.5}$
Herbáceas secas	0,967±0,014	0,959±0,022
Especies arbóreas	0,984±0,006	0,985±0,009
Herbáceas verdes	0,985±0,007	0,986±0,011
Especies arbustivas	0,987±0,005	0,990±0,008
Suelos arenosos	0,915±0,014	0,969±0,006
Suelos limosos	0,948±0,005	0,973±0,006
Suelos arcillosos	0,955±0,006	0,973±0,006

ASTER library: <http://speclib.jpl.nasa.gov/> MODIS library: <http://www.ices.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html>



Métodos de *corrección atmosférica* y de *emisividad*: Obtención de la *temperatura* de la superficie

- Métodos monocanales (ecuación de transferencia radiativa)
 - Aplicación a *Landsat*, *Meteosat*, ...
 - Perfiles atmosféricos y modelos de transferencia radiativa
 - Métodos de absorción diferencial
 - Aplicación a *NOAA-AVHRR*, *EOS Terra/Aqua-MODIS*, *ERS-ATSR*, *Envisat-AATSR*, *MSG-Seviri*,...
 - Modelos de *split-window* o multicanales y bi-angulares
- ♦ **En todos los casos se requiere la emisividad de la superficie (ϵ)**

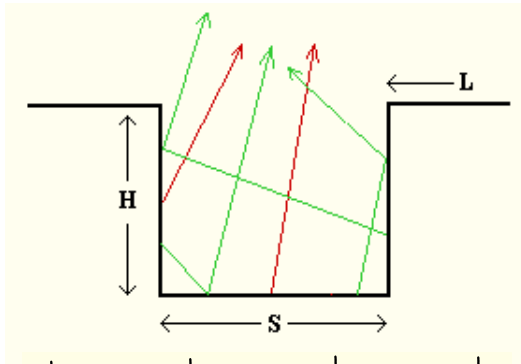
Métodos de *separación temperatura-emisividad*: Obtención de T y ϵ

- Aplicación a sensores multiespectrales (3 o más bandas - *ASTER*)
- Corrección atmosférica monocanal \Rightarrow radiancia en la superficie (L_{surf})
- Hipótesis sobre $\epsilon \Rightarrow T$ y espectro de emisividad



Determinación y cartografía de la emisividad

- Método de la Cobertura Vegetal (Valor y Caselles 1996): Se usa un **modelo físico** junto con datos del **dominio óptico** \Rightarrow Suficiente **precisión** y aplicación **operativa**



Emisividad efectiva

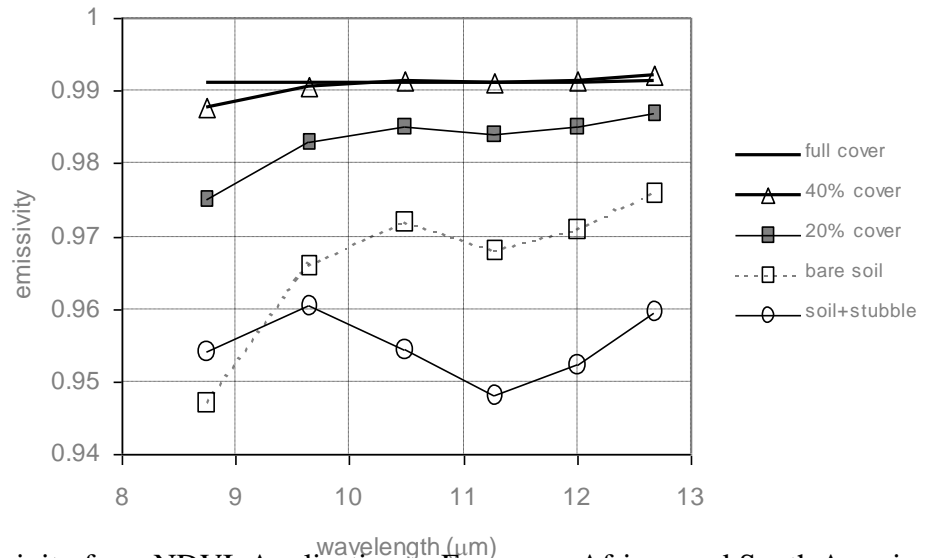
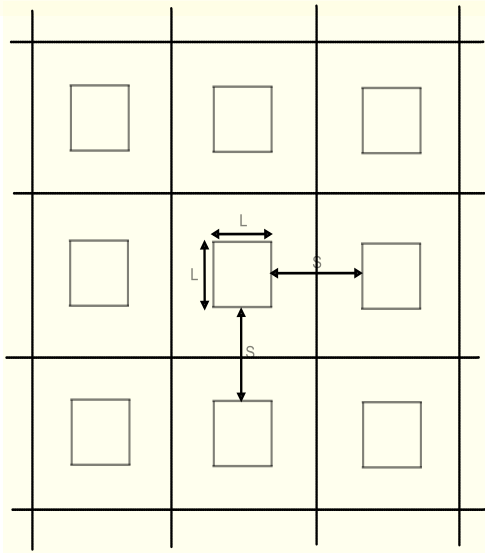
$$\epsilon = \epsilon_0 + d\epsilon$$

$$\epsilon_0 = \epsilon_v P_v + \epsilon_s (1 - P_v)$$


$$d\epsilon = (1 - \epsilon_s) \epsilon_v F' (1 - P_v) + [(1 - \epsilon_v) \epsilon_s G' + (1 - \epsilon_v) \epsilon_v F''] P_s$$

Se requiere:

- Valores de emisividad de **suelo y vegetación**
- **Cálculo de P_v** (con datos del dominio óptico; índices de vegetación)
- Conocimiento acerca de la **geometría de la superficie**



E. Valor y V. Caselles, 1996: Mapping Land Surface Emissivity from NDVI: Application to European, African and South American Areas. Remote Sensing of Environment, 57: 167-184.



Métodos de corrección monocanales

Resolución de la ecuación de transferencia radiativa a partir del conocimiento de los **perfiles verticales de la atmósfera** (p, T, concentración de gases), que se usan como datos de entrada de un **modelo de cálculo de transmisividad y radiancia** de la atmósfera

Ecuación de transferencia radiativa
$$L_{\text{sat}} = [\varepsilon B(T) + (1-\varepsilon) L_{\text{atm}}^{\downarrow}] \tau + L_{\text{atm}}^{\uparrow}$$

Ecuación monocanal de corrección
(T_a^{\uparrow} : temperatura efectiva de la atmósfera)
$$T = T_i + \frac{1-\tau_i}{\tau_i} (T_i - T_a^{\uparrow}) + \frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i} b_i$$

- **Modelos de transferencia radiativa** del Air Force Geophysical Laboratory (AFGL).

Cálculo de la transmisividad y radiancia atmosféricas en todo el espectro

HITRAN: Alta resolución espectral. Atlas de datos de absorción moleculares

LOWTRAN 1-7 (1972-1989): Baja resolución espectral (20 cm^{-1})

MODTRAN 1-4 (1989-actualidad): Moderada resolución espectral (1 cm^{-1})

- **Perfiles atmosféricos estándar** (p, T, H₂O, CO₂, O₃, ...) o datos de **radiosondeo** introducidos por el usuario. Modelos de aerosoles.

Versión simple y libre del MODTRAN: <http://geosci.uchicago.edu/~archer/cgimodels/radiation.html>

Perfiles atmosféricos: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>



Métodos de absorción diferencial

- Varias medidas simultáneas de radiancia para un mismo píxel: distinto canal ó distinto ángulo de observación: $L - L_i = \gamma (L_i - L_j)$

- En general, N medidas simultáneas en distintas condiciones:

$$T = a_0 + a_1 T_1 + a_2 T_2 + \dots + a_N T_N$$

- Tipos de algoritmos

a) Métodos bicanales: dos medidas en canales distintos

- a.1) Método *split-window*: dos canales dentro de la ventana atmosférica 10-12,5 μm .
- a.2) Método *dual-window*: dos canales en distintas ventanas: 3,5-4,1 μm ; 8-9,5 μm ; 10-12,5 μm .

b) Métodos tricanales: 3 medidas en canales distintos

- c) **Métodos biangulares**: Utilizando un mismo canal pero dos ángulos de observación distintos (sensor ERS-ATSR y ENVISAT-AATSR: *nadir scan* (0° - $21,6^\circ$) y *forward scan* ($52,4^\circ$ - 55°)).



Algoritmos de split-window

- Al utilizar dos canales en de la misma ventana, los **procesos de absorción y emisión atmosférica son similares** \Rightarrow **buena correlación** entre la **corrección atmosférica** en un canal y la **absorción diferencial** entre las dos bandas
- **Dos canales** de split-window correctamente seleccionados son **suficientes** \Rightarrow no es necesario 3 o más canales
- Los algoritmos de split-window **son superiores** en cuanto a precisión a los de tipo dual-window

- Ecuación de split-window

$$T = T_1 + A(T_1 - T_2) + \Delta + B(\varepsilon)$$

A, Δ : *coeficientes atmosféricos*; se obtienen por *regresión sobre una base de datos empírica* (T, T_1, T_2)

$B(\varepsilon)$: efecto de la emisividad;

$$B(\varepsilon) = \alpha(1-\varepsilon) - \beta \Delta\varepsilon$$

α, β : coeficientes que dependen del contenido en vapor de agua de la atmósfera

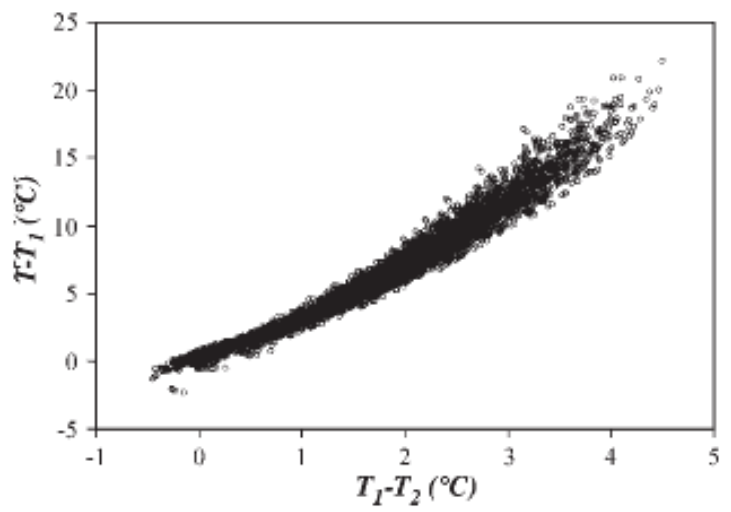
$$\varepsilon = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)/2 \quad \text{emisividad media}$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad \text{diferencia espectral de emisividad}$$

C. Coll y V. Caselles, 1997. A split-window algorithm for land surface temperature from Advanced Very High Resolution Radiometer data: Validation and algorithm comparison. Journal of Geophysical Research, 102 (D14): 16697-16713.



$$T - T_1 = f(T_1 - T_2)$$



- Obtención de A y Δ con medidas “in situ” de temperatura del mar y coincidentes de satélite

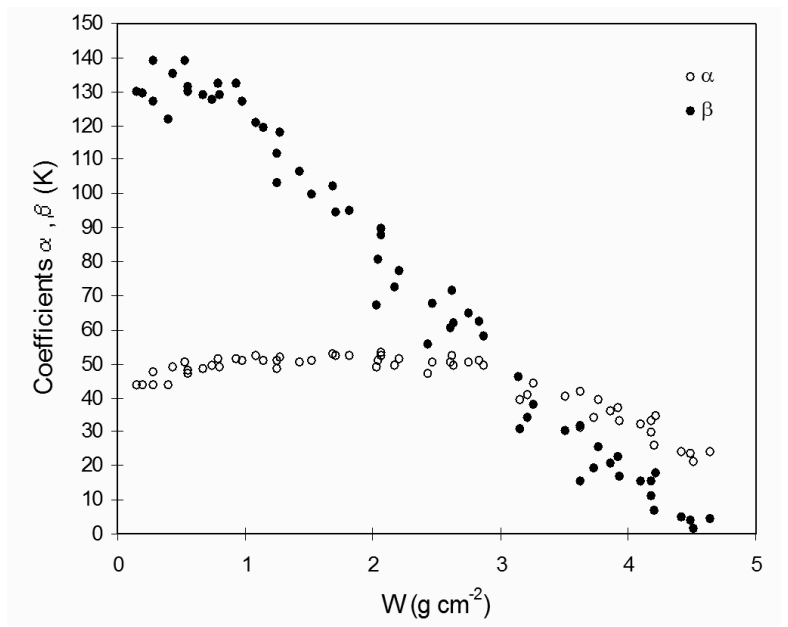
$$A = 1,34 + 0,39(T_1 - T_2)$$

$$\Delta = 0,56 \text{ K}$$

Dependencia cuadrática

(sensor AVHRR; satélite NOAA-11)

- Coeficientes α y β en función del contenido en humedad de la atmósfera ⇒



- Ecuación de cuadrática de split-window

$$T = T_1 + [1,34 + 0,39(T_1 - T_2)] (T_1 - T_2) + 0,56 + \alpha(1 - \epsilon) - \beta \Delta \epsilon$$



Validación - resultados

Error en temperatura: $\delta T = T_{\text{exp}} - T_{\text{alg}}$ (K)

mar
 $\varepsilon = 1; \Delta\varepsilon = 0$

$0,0 \pm 0,6$
[-1,5 , 1,8]

tierra-barbecho
 $\varepsilon = 0,98; \Delta\varepsilon = -0,005$

$-0,1 \pm 1,1$
[-3,4 , 1,9]

tierra-pasto
 $\varepsilon = 0,97; \Delta\varepsilon = -0,01$

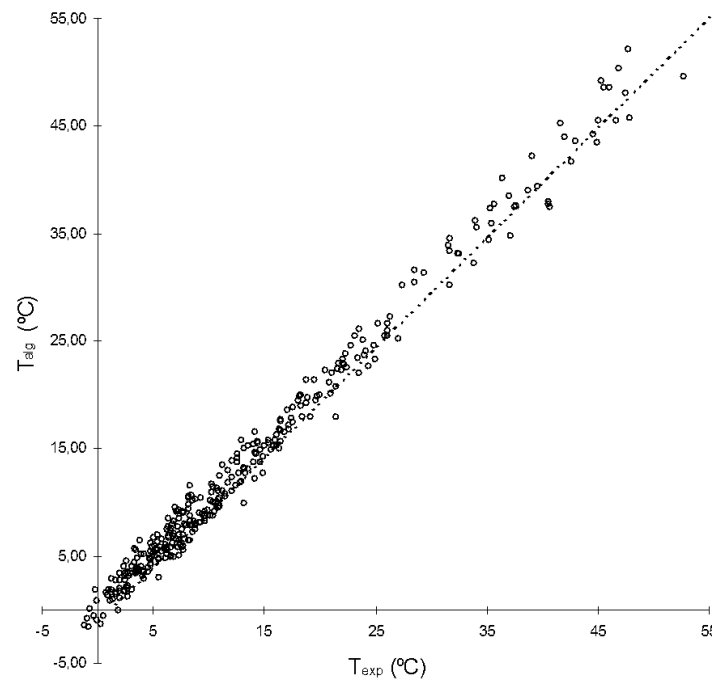
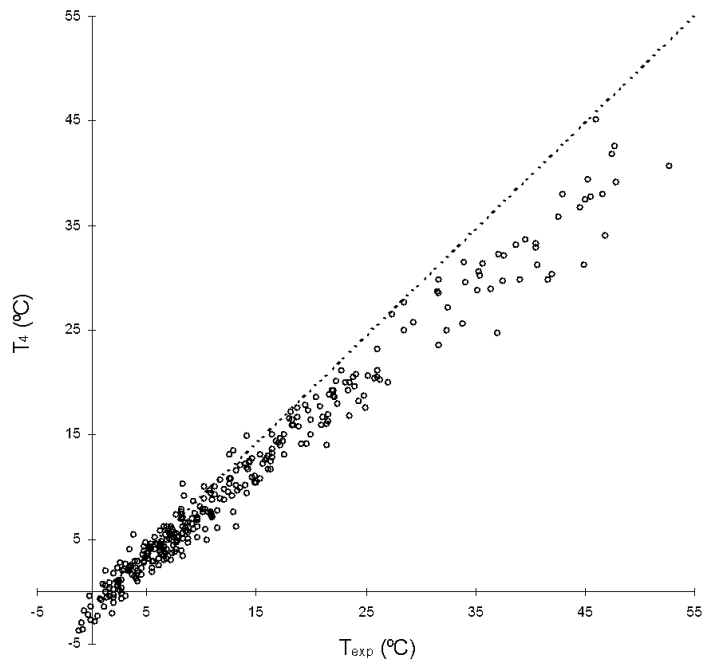
$-0,1 \pm 1,2$
[-3,6 , 2,2]

tierra-suelo desnudo
 $\varepsilon = 0,96; \Delta\varepsilon = -0,01$

$-1,3 \pm 1,9$
[-6,2 , 1,6]

tierra-trigo
 $\varepsilon = 0,98; \Delta\varepsilon = 0$

$0,1 \pm 1,7$
[-4,3 , 3,7]



Total (tierra): $0,0 \pm 1,3$ K



Ecuación de Split-window para el sensor MODIS

Adaptación de la técnica split-window anterior al Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

$$T = T_1 + [2,41 + 0,432(T_1 - T_2)](T_1 - T_2) + 0,359 + \alpha(w)(1 - \varepsilon) + \beta(w)\Delta\varepsilon$$

$$\alpha = 44,1 + 5,4 \frac{w_0}{\cos(\theta)} - 1,77 \left(\frac{w_0}{\cos(\theta)} \right)^2$$

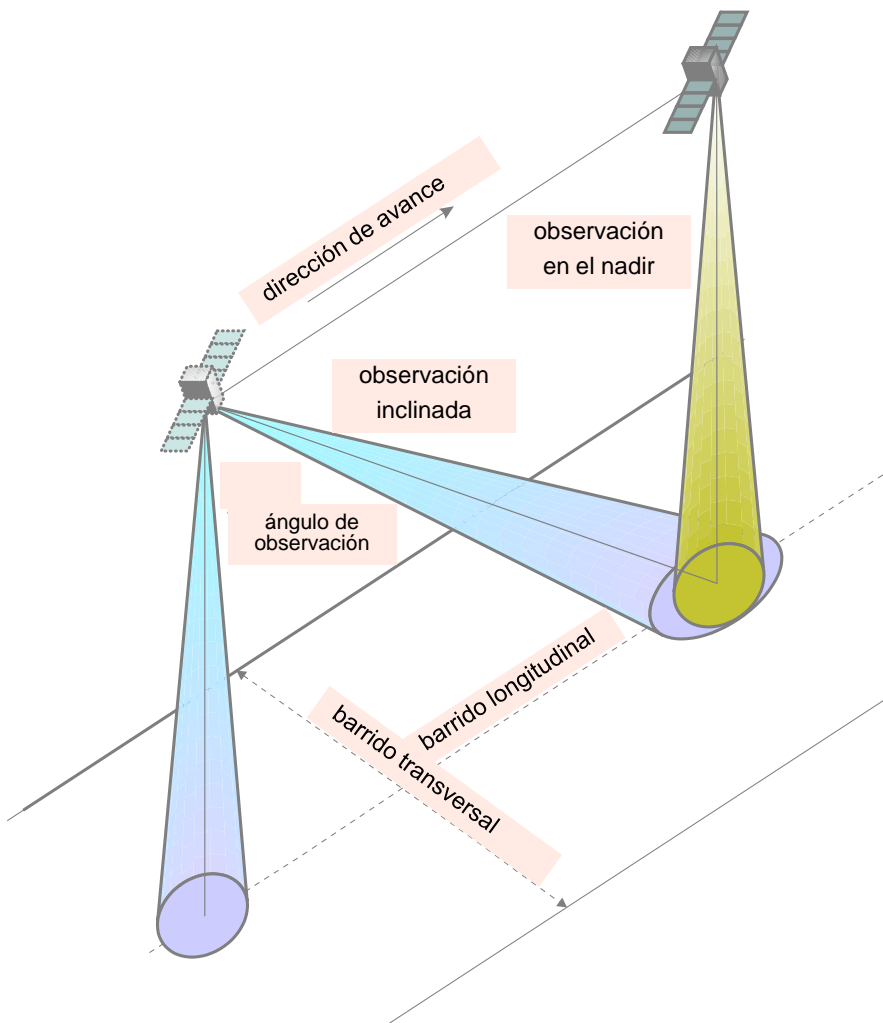
$$\beta = 165,5 - 28,1 \frac{w_0}{\cos(\theta)}$$

T_1 y T_2 son las medidas de temperatura proporcionadas por los dos canales del sensor (31 y 32), w_0 es el contenido de agua precipitable vertical en cm (MOD_05 Modis).

Obtención de imágenes MODIS: www.wist.echo.nasa.gov <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/ims/welcome/>

C. Coll, V. Caselles, J.M. Galve, E. Valor, R. Niclòs, J.M. Sánchez y R. Rivas, 2005: Ground measurements for the validation of land surface temperatures derived from AATSR and MODIS data. Remote Sensing of Environment, 97: 288 – 300.

Algoritmos biangulares



- Utilizan **una única longitud de onda** pero diferentes caminos ópticos a través de la atmósfera (**diferentes ángulos**) para observar la superficie

- **Misma base teórica** que las técnicas de “split-window”. Ahora, la absorción diferencial resulta del **incremento del camino óptico** en la observación inclinada.

- Con un único canal se asegura que la absorción sea debida a los **mismos elementos absorbentes**.

$$T = T_{\theta_1} + A(T_{\theta_1} - T_{\theta_2}) + \Delta' + B'(\varepsilon)$$

$$B(\varepsilon) = \alpha' (1 - \varepsilon) - \beta' \Delta\varepsilon$$

$$\varepsilon = (\varepsilon_{\theta_1} + \varepsilon_{\theta_2}) / 2 \quad \text{emisividad media}$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\theta_1} - \varepsilon_{\theta_2} \quad \text{diferencia angular de emisividad}$$

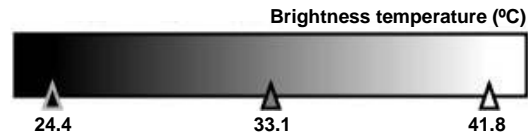
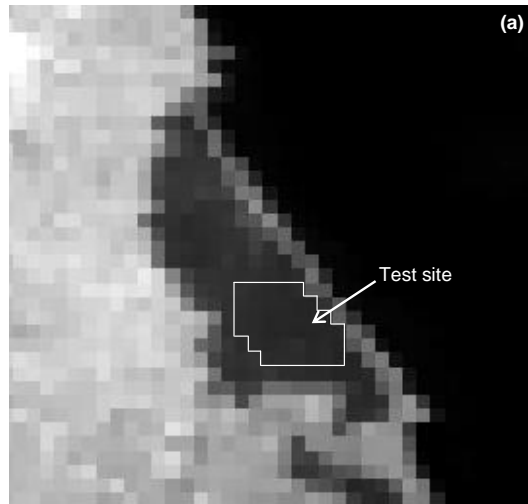


Comparación de algoritmos

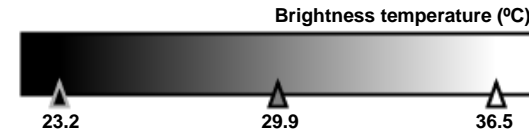
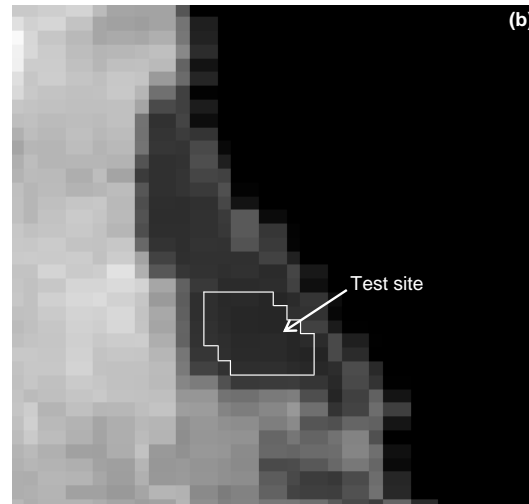
Algoritmo	Error aleatorio	Información auxiliar	Limitaciones
Monocanal	$\pm 0,5-1,2$ K	Radiosondeo	Radiosondeo coincidente
Split-window	$\pm 0,5-1,2$ K	-	-
Biangular	$\pm 0,6-1,1$ K	Variación angular emisividad	Superficies homogéneas



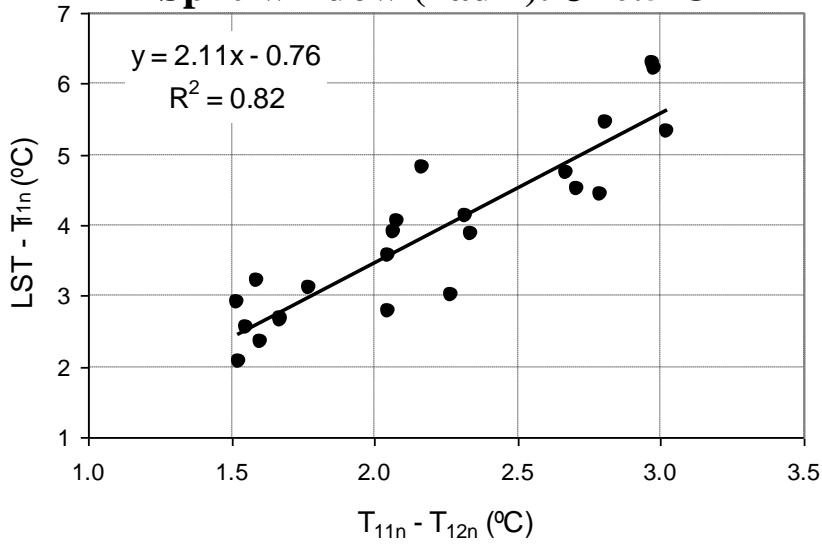
NADIR



FORWARD



Split-window (nadir). $\sigma=0.5^{\circ}\text{C}$



Dual-angle (11 μm). $\sigma=1.0^{\circ}\text{C}$

