

# Comparación de la temperatura de la superficie del mar calculada a partir de datos AVHRR y MODIS

C. Robles-González\*, N. López Gordillo, A. Fernández-Renau,  
A. García-Sevilla y J. Santana-Suárez

*Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Ctra. de Ajalvir, km 4. 28850 Torrejón de Ardoz*

---

## Resumen

Desde 1997, el programa CREPAD (Centro de Recepción, Proceso, Archivo y Distribución de datos de Observación de la Tierra) del INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) facilita gratuitamente el acceso a algunos de los productos de observación remota de la Tierra de baja resolución más demandados.

En el marco de este programa se ha realizado una comparación entre la temperatura superficial del mar (TSM) calculada con el software MATIAS (Mar Tierra Atmósfera Software) a partir de datos AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) y la calculada con el software SeaDAS (SeaWiFS Data Analysis System) a partir de datos MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) sobre la zona de cobertura de la antena del Centro Espacial de Canarias (CEC). Para ello se han usado todas las imágenes AVHRR y MODIS de 2008 tomadas con menos de 4 horas de diferencia y en el rango de temperatura entre 10°C y 30°C. La comparación de TSM de AVHRR y de MODIS se ha realizado píxel a píxel, de esta comparación obtenemos una imagen diferencia de la que sacamos los datos estadísticos.

Se observó que los resultados menos favorables correspondían a comparaciones con pocos datos ya fuera por estar las imágenes muy escoradas, es decir, con ángulos de observación elevados o con muchas nubes. Los resultados por tanto se muestran en función del porcentaje de píxeles comparados respecto del total. Para aquellas imágenes en las que el porcentaje de píxeles comparados es mayor al 30% la diferencia media entre la TSM de AVHRR y de MODIS es de 0,1°C, la desviación típica es de 0,5 y la correlación entre las imágenes es de 0.90. En el 61% de los píxeles comparados la diferencia entre las TSM de ambas imágenes es menor a 0,5°C y en el 82% la diferencia es menor a 0,8°C.

Como en el área de cobertura de la antena hay zonas con muy distintas características en este estudio los datos se presentan detallados en unas zonas preestablecidas en CREPAD, estas son denominadas: África, Alborán, Atlántico, Azores, Canarias, Cantábrico y Mediterráneo.

**Palabras clave:** TSM, AVHRR, MODIS, CREPAD, ángulo cenital de observación.

## Abstract

### Inter-comparison of AVHRR and MODIS sea surface temperature

Since 1997, the INTA (National Institute for Aerospace Technology)-CREPAD (Centre for REception, Processing, Archiving and Dissemination of Earth Observation Data) program distributes freely some of the most demanded low-resolution remote sensing products.

In the frame of the CREPAD program a comparison between the SST (Sea Surface Temperature) computed with the MATIAS software from AVHRR data and the SST computed with SeaDAS from MODIS data has been done and is presented in this paper. Images over the finger print of the Canary Space Centre (Centro Espacial de Canarias, CEC) acquired in 2008 have been used in this study. Time acquisition difference between the images to be compared should be lower than 4 hours and the temperature range should be in between 10°C and 30°C.

In this study less favourable results are observed in images with few pixels compared. These images are usually cloudy images or images with the compared area falling in the edge of the image with high

---

\* Autor para la correspondencia: crepadpa@inta.es

Recibido: 17-02-10; Aceptado: 04-04-11.

satellite zenith angle values. Therefore results have been studied related to the percentage of compared pixels in each image. Images with more than 30% pixels compared showed a mean SST difference of about 0.1°C, the standard deviation was 0.5 and the correlation between AVHRR and MODIS SST images was 0.90. The mean SST difference is lower than 0.5°C in 61% of the pixels and lower than 0.8% in 82% of the pixels.

The finger print of the CEC covers areas with different behaviour therefore results are shown over preselected CREPAD areas. Those areas are: Africa, Alborán Sea, Atlantic Ocean, Azores, Canaries, Cantábrico and Mediterranean Sea.

**Key words:** SST, AVHRR, MODIS, CREPAD, satellite zenith angle.

---

## Introducción

La temperatura de la superficie del mar (TSM) es un parámetro que juega un papel fundamental en la comprensión de procesos tanto oceánicos como atmosféricos (Houghton *et al.*, 1990). El conocimiento de la temperatura de la superficie del mar es también una fuente importante de información en los estudios sobre cambio climático (Hutchison *et al.*, 1999; Donlon *et al.*, 2002). Para estudiar los flujos de energía entre el océano y la atmósfera y por supuesto también para conocer el balance radiativo global, entre la Tierra y el exterior es imprescindible conocer la temperatura de la superficie del mar. La TSM es también una importante herramienta para el estudio, conservación y explotación de recursos naturales.

La radiación que llega al sensor proveniente de la superficie del mar es atenuada por la atmósfera. Por tanto a la hora de calcular la TSM por medio de radiómetros a bordo de satélites hay que tener en cuenta este efecto. Vapor de agua, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> o aerosoles son algunos de los componentes atmosféricos que pueden influir en la radiación infrarroja que llega a los satélites. Para corregir dicho efecto se han desarrollado varios algoritmos a lo largo de las últimas décadas. Anding y Kauth (1970) observaron que la diferencia entre las temperaturas de brillo en dos bandas del infrarrojo era proporcional a la cantidad de corrección atmosférica necesaria. Diferentes algoritmos como los de Walton (1988), McClain *et al.* (1985), Barton *et al.* (1989) o Sobrino *et al.* (1993) entre otros, se han desarrollado desde entonces para calcular la TSM basándose en esta dependencia lineal. Posteriormente se desarrollaron algoritmos no lineales (Walton *et al.*,

1998) para zonas con altas concentraciones de vapor de agua o ángulos cenitales grandes.

A partir de medidas obtenidas por radiómetros a bordo de satélites se puede conocer este parámetro de forma global y regional. Sensores como el AVHRR a bordo de los satélites NOAA y MetOp o el MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua han demostrado su gran utilidad en este campo.

El proyecto CREPAD lleva desde 1997 calculando y proporcionando gratuitamente productos de observación de la Tierra obtenidos a partir de datos de AVHRR y más tarde de SeaWiFS y MODIS a usuarios científicos para aplicaciones medioambientales. En el caso de la TSM se obtiene a partir de datos AVHRR con un software propio de CREPAD denominado MATIAS (Mar, Tierra y Atmósfera Software) y que está basado en el algoritmo de McClain *et al.* (1985).

En un continuo esfuerzo por mantener y asegurar una buena calidad de sus productos, en CREPAD se ha validado la TSM calculada a partir de datos AVHRR comparándola tanto con medidas in situ de boyas como realizando una inter-comparación de las TSM calculadas a partir de datos AVHRR con la TSM derivada de datos MODIS obtenida con el software de libre distribución de la NASA SeaDAS (<http://seadas.gsfc.nasa.gov/>). Validaciones previas con datos in situ medidos por boyas de Puertos del Estado y por boyas de la NOAA han sido realizadas por Robles-González y Fernández-Renau (2006). Hay que tener en cuenta que en esta validación se compararon datos «bulk» medidos por la boya con datos «skin» que son los que se obtienen a partir de datos de sensores remotos. Tanto este estudio como otros estudios previos, por ejemplo Donlon *et al.* (2002), han demostrado que las diferencias

entre  $TSM_{skin}$  y  $TSM_{bulk}$  durante el día son significativas. Por tanto para complementar esta validación una comparación entre las TSM de los sensores remotos AVHRR y MODIS se ha llevado a cabo y se presenta en este artículo.

En la primera parte del artículo se dará una breve descripción de los dos sensores y de los algoritmos empleados para calcular la TSM a partir de datos del sensor AVHRR y del sensor MODIS. Posteriormente presentaremos la metodología de comparación, los resultados y las conclusiones de este trabajo.

## Procesado de datos AVHRR

### Características del sensor

El sensor AVHRR/3 a bordo de los satélites NOAA-17 y 18 es un espectro-radiómetro de banda ancha capaz de medir radiación en 3 canales en el visible e infrarrojo cercano (NIR, Near Infra Red) (0,63, 0,86, 1,6  $\mu m$ ) y otros 3 en el infrarrojo térmico (3,74, 11 y 12  $\mu m$ ). Solo 5 de ellos son adquiridos al mismo tiempo, los canales 3A (1,58-1,64  $\mu m$ ) y 3B (3,55-3,93  $\mu m$ ) se alternan de forma que el 3A mide durante el día y el 3B durante la noche.

El AVHRR tiene un campo de visión de  $1,3 \times 1,3$  miliradianes que dan en la superficie una resolución espacial en el nadir de  $1,09 \times 1,09$  km<sup>2</sup> y genera una imagen de 2.048 píxeles por línea. El ángulo de visión de cada línea abarca de  $-55,4^\circ$  hasta  $+55,4^\circ$  desde el nadir. Cuando este ángulo se mide con respecto a la normal a la superficie, que incluye la curvatura de la Tierra puede variar entre  $\pm 65^\circ$ .

### Imágenes adquiridas

Hay tres tipos de transmisión de datos AVHRR desde el satélite a Tierra, HRPT (High Resolution Picture Transmission), LAC (Local Area Coverage) y GAC (Global Area Coverage). La transmisión de datos HRPT se realiza de forma continua, estos son los datos que se reciben en la Estación Espacial de Canarias y son los que proporciona el programa CREPAD. Los datos LAC se almacenan a bordo y se envían a tierra posteriormente. Los datos GAC se

obtienen a partir de los LAC promediando valores muestreados.

Actualmente CREPAD genera datos de valor añadido derivados del sensor AVHRR a bordo de los satélites NOAA-17 y NOAA-18 a partir del formato L1B ESA-Sharp y dispone de un archivo de datos procesados de los satélites NOAA-14, 15 y 16. El nivel L1B ESA-Sharp contiene datos auxiliares y parámetros radiométricos.

### Algoritmos

Uno de los pasos previos a la obtención de productos es la georreferenciación de las imágenes. Esta se lleva a cabo siguiendo los protocolos de georreferenciación de CREPAD. Para ello se utilizan, en primera instancia, datos orbitales y un conjunto de tie points, dando como resultado una sub-escena de la imagen que corresponde con la zona considerada. Posteriormente, los datos pasan por dos funciones propias de IDL, la primera, llamada «Triangulate», que genera una triangulación del tipo Delaunay y la segunda denominada «Trigid» que devuelve una rejilla regular de valores interpolados.

Es necesario también reconocer y eliminar los píxeles que contengan nubes ya que las nubes pueden falsear los resultados. Para eliminar los píxeles nubosos, en el marco del programa CREPAD se ha desarrollado un algoritmo de detección basado en Saunders and Kriebel (1998). Este algoritmo se basa en cuatro tests. En este procedimiento el píxel es considerado como nuboso si cualquiera de los 4 test da positivo. En este proceso se eliminan los píxeles más brillantes o más fríos que un valor límite prefijado, si el cociente entre los canales 1 y 2 está entre 0,9 y 1,3 o si la homogeneidad espacial sobre el océano es mayor que un valor límite. En el caso de la temperatura el valor límite es seleccionado automáticamente y varía dependiendo de la zona y fecha de adquisición de la imagen.

Una vez enmascarados los píxeles contaminados con nubes, MATIAS proporciona datos de TSM basándose en el algoritmo de McClain et al (1985) que usa la siguiente ecuación:

$$TSM = B_{11}(T_{11}) + B_2(T_{11} - T_{12}) + B_3(T_{11} - T_{12})(\sec\theta - 1)B_4 \quad [1]$$

**Tabla 1.** Coeficientes de la ecuación para el cálculo de la TSM

	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$
NOAA-17	0,992818	2,49916	0,915103	271,206
NOAA-18	1,008410	2,23459	0,736946	276,075

donde  $T_{11}$  y  $T_{12}$  son las temperaturas de brillo de los canales 11 y 12  $\mu\text{m}$  en Kelvin;  $TSM$  es la temperatura de la superficie del mar en grados centígrados;  $\theta$  es el ángulo cenital del satélite y  $B_1$ - $B_4$  son coeficientes globales proporcionados por la NOAA/NESDIS (National Environmental Satellite, Data and Information Service) que se pueden encontrar en <http://noaa-aasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/sst.html> y que se muestran en la Tabla 1.

## Procesado de datos MODIS

### Características del sensor

MODIS es un instrumento que viaja a bordo de los satélites TERRA y AQUA de la NASA (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>). TERRA viaja en órbita descendente, cruzando el Ecuador por la mañana mientras que AQUA lleva una órbita ascendente y cruza el Ecuador por la tarde.

MODIS es un radiómetro con 36 bandas situadas entre 0,4  $\mu\text{m}$  y 14,4  $\mu\text{m}$ . La resolución espacial varía dependiendo de las bandas, dos de ellas tienen una resolución espacial de 250 m en el nadir, cinco de 500 m y las 29 restantes tienen una resolución de 1 km. MODIS tiene un espejo que rota  $\pm 55^\circ$  generando imágenes de 2.330 km de ancho y proporciona una cobertura total de La Tierra cada uno o dos días. El ángulo cenital de observación medido con respecto a la normal a la superficie en el punto de observación varía entre  $\pm 65^\circ$ , al igual que en el caso de AVHRR.

### Imágenes adquiridas

Los datos MODIS se procesan a partir del formato L0 utilizando el software SEADAS de libre distribución de la NASA. Este nivel 0 contiene datos en bruto recibidos en formato NA-

SA, mientras que el nivel 2 son productos de valor añadido que contienen calibración radiométrica y corrección geométrica.

## Algoritmos

La descripción del algoritmo usado por SEADAS para calcular la TSM viene dada en [http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/DOCS/modis\\_sst/](http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/DOCS/modis_sst/). Las ecuaciones usadas son:

Si  $(T_{11} - T_{12}) \leq 0.5$

$$TSM = A_{00} + A_{01}(T_{11}) + A_{02}(T_{11} - T_{12})BTSM + A_{03}(T_{11} - T_{12})(1.0/\cos\theta - 1.0)$$

Si  $(T_{11} - T_{12}) \geq 0.9$

$$TSM = A_{10} + A_{11}(T_{11}) + A_{12}(T_{11} - T_{12})BTSM + A_{13}(T_{11} - T_{12})(1.0/\cos\theta - 1.0)$$

Si  $0.5 < (T_{11} - T_{12}) < 0.9$

$$TSMLO = A_{00} + A_{01}(T_{11}) + A_{02}(T_{11} - T_{12})BTSM + A_{03}(T_{11} - T_{12})(1.0/\cos\theta - 1.0)$$

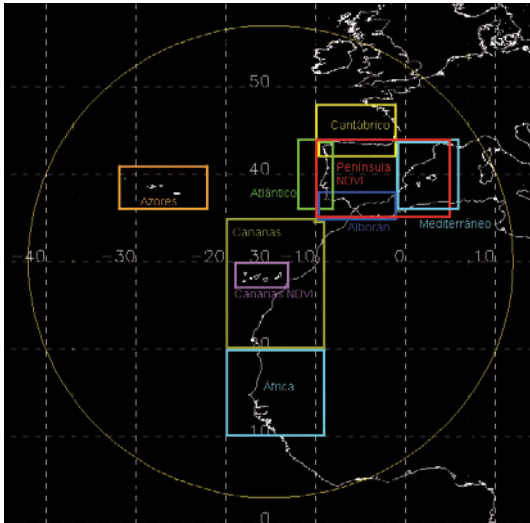
$$TSMHI = A_{10} + A_{11}(T_{11}) + A_{12}(T_{11} - T_{12})BTSM + A_{13}(T_{11} - T_{12})(1.0/\cos\theta - 1.0)$$

$$TSM = TSMLO + ((T_{11} - T_{12}) - 0.5) / (0.9 - 0.5) (TSMHI - TSMLO)$$

En este caso las  $T_{11}$  y  $T_{12}$  son en grados centígrados y  $BTSM$  es una temperatura base y los coeficientes  $A_{ij}$  son empíricos y pueden variar según la fecha y otros parámetros.

## Comparación

Se ha realizado la comparación píxel a píxel de productos TSM de AVHRR y de MODIS. Para esta comparación se han usado archivos de imágenes AVHRR (NOAA17 y NOAA18) y MODIS (AQUA). El periodo de estudio comprende de 01/01/2008 a 31/12/2008. Se dispone de una o dos imágenes diarias MODIS frente a seis u ocho de AVHRR, por lo que se seleccionan aquellas imágenes de AVHRR que coincidan en fecha y área con la de MODIS, eligiendo aquella cuya diferencia horaria con el pase de MODIS sea el mínimo de entre todas las imágenes encontradas y nunca superior a 4 horas (IOCCG, 2000). Los pases cotejados estarán en la franja horaria de 12:00-16:00 horas. Además se eliminan los píxeles fuera del rango de temperatura entre 10°C-30°C.



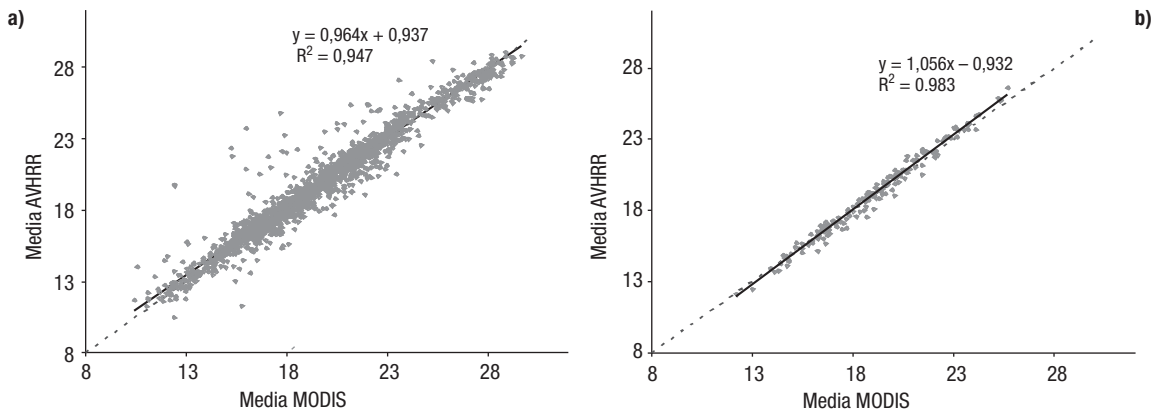
**Figura 1.** Zonas preseleccionadas sobre las que CREPAD proporciona imágenes.

Los productos TSM se generan sistemáticamente sobre unas zonas estándar preestablecidas en CREPAD. Éstas son: África, Alborán, Atlántico, Azores, Canarias, Cantábrico y Mediterráneo, ver Figura 1. En la Figura 1 se muestra con un círculo amarillo la cobertura de la antena del Centro Espacial de Canarias y con rectángulos de colores las zonas preseleccionadas por CREPAD. Debido a las diferentes características de cada una de estas zonas la comparación se ha hecho independientemente en cada una de ellas y por tanto los resultados se muestran por zonas. A pesar de esto también se incluyen los resultados totales de la comparación.

## Resultados

Esta comparativa se ha llevado a cabo de dos formas distintas, primero un estudio general incluyendo todas las imágenes de 2008 que cumplieran los requisitos mencionados en el apartado anterior y el segundo más pormenorizado en el que se han seleccionado automáticamente imágenes que además de cumplir los requisitos tuvieran un porcentaje de píxeles comparados mayor al 30%. Los dos procesos se explican a continuación.

En la Figura 2a se presenta la temperatura media de las imágenes MODIS en el Eje X frente a la de las imágenes AVHRR (Eje Y). La línea continua negra representa la línea de ajuste de los puntos y su ecuación, en este caso el coeficiente de determinación  $R^2$  del ajuste es de 0,947, la línea discontinua es la línea que seguiría el ajuste si este fuera perfecto y se muestra solo como referencia. En este gráfico se observa que en algunas de las zonas preseleccionadas la diferencia de temperaturas entre los datos de los sensores AVHRR y MODIS es mayor de  $1^{\circ}\text{C}$  y en algunos casos puede llegar a casi  $8^{\circ}\text{C}$ . Estudiando estas zonas una a una se vio que casi todos los casos eran imágenes en las que el área comparable cae en los extremos de la imagen, o imágenes con muchas nubes, siendo el número de píxeles usados en la comparación es muy bajo respecto del total de píxeles de la zona. Para eliminar estos resultados de baja calidad se ha estudiado la TSM, la diferencia de TSM, la desviación tí-



**Figura 2.** Gráfico de dispersión de puntos en el que se representa la temperatura media de las imágenes MODIS (Eje X) frente a la de las imágenes AVHRR (Eje Y). En la figura a) se presentan todos los puntos mientras que en la figura b) se presentan solo aquellos cuyo porcentaje de píxeles usados en la comparación es mayor al 30%. La línea continua es el ajuste y la línea discontinua es la que daría si el ajuste fuera perfecto.

pica y la correlación en función del porcentaje de píxeles usados en la comparación respecto del total. En la Figura 2b se muestra el mismo gráfico que el de la Figura 2a pero en este caso sólo se han representado las imágenes en las que el porcentaje de píxeles comparados es superior al 30% para eliminar automáticamente las imágenes de baja calidad. Además, este porcentaje permite un estudio estadístico robusto de los resultados al quedar un número suficientes de imágenes sin eliminar. En este caso vemos que la dispersión de los puntos es menor y que el  $R^2$  del ajuste aumenta a 0,983. Este porcentaje ha sido seleccionado porque nos parece una cantidad de datos significativa y razonable a la vista de los resultados que se muestran en la Figura 3. En ella se muestran 8 gráficas en las que dicho porcentaje se representa en el eje X y en el eje Y se representa la media de las diferencias de la TSM (rombo azul), la desviación típica (cuadrado rosa) y la correlación (triángulo amarillo) para cada una de las 7 zonas preestablecidas (Fig. 3a-g) y otra para el total (Fig. 3h). En ellas se ve que cuanto mayor es el porcentaje de datos comparados menor es la diferencia de la TSM, menor también es la desviación típica mientras que la correlación aumenta, acercándose a 1. Es decir mejoran los resultados cuando seleccionamos imágenes con menor número de píxeles problemáticos, tales como píxeles nubosos o píxeles en los bordes de las nubes. En cambio, en las imágenes con porcentajes de píxeles comparados menor a 30% vemos que hay

mucha dispersión, variando los valores de casi cero hasta 4 para la desviación típica. Vemos también que en estos casos la correlación es muy variable pudiendo llegar a tomar valores negativos en algunos casos.

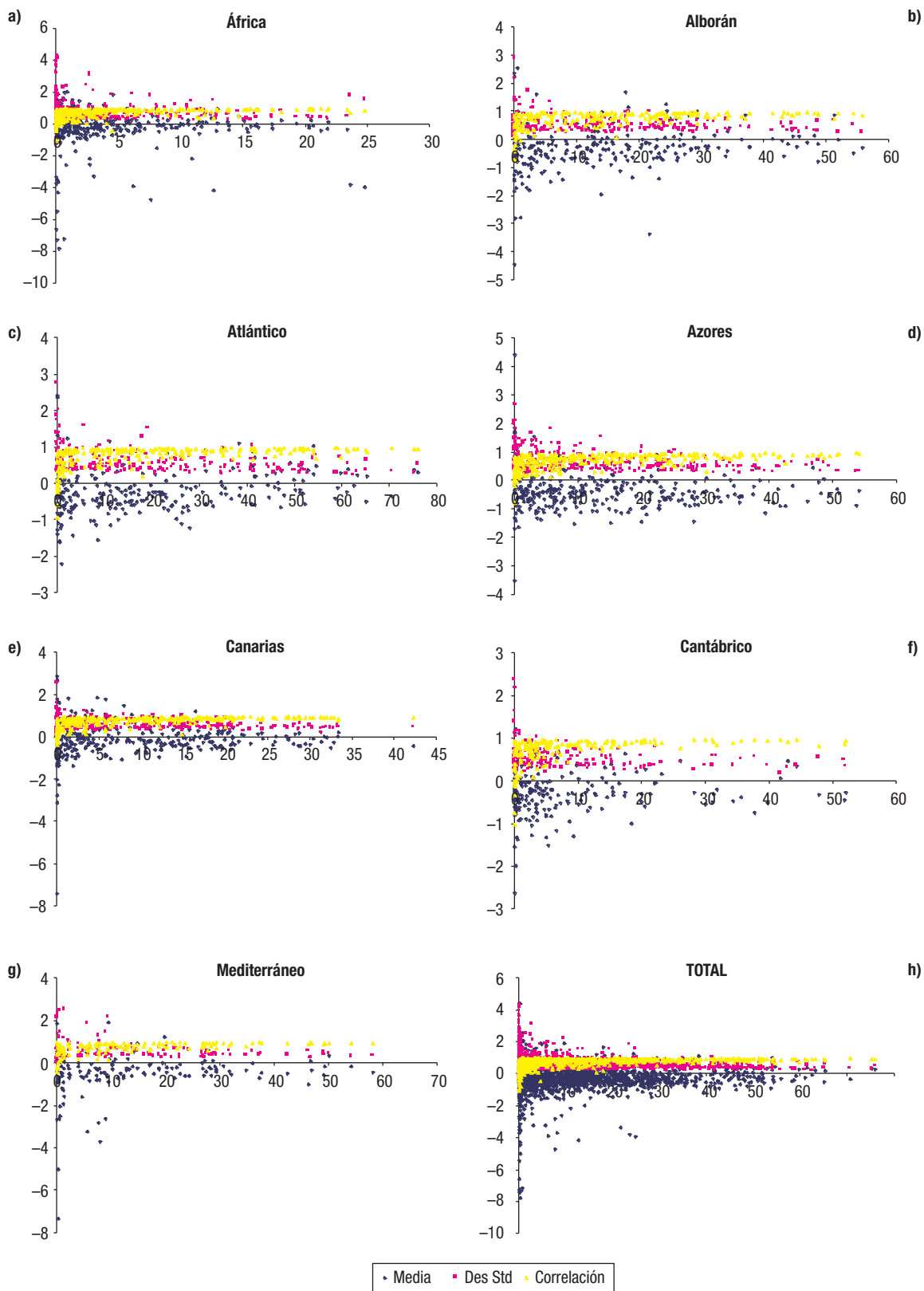
En la Tabla 2 se presentan los resultados de la comparación del año 2008 por zonas en las que el porcentaje de píxeles comparados es mayor a 30%. La columna «Media» presenta los datos de la diferencia media de TSM al restar las imágenes. La columna «Desv típica» presenta la desviación típica resultante y la columna «Correlación» muestra la relación entre las imágenes comparadas. Las dos últimas columnas presentan los porcentajes de datos dentro de un margen de error de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  y  $\pm 0,8^\circ\text{C}$  respecto al total de píxeles comparados. La columna N° Img muestra el número de imágenes usadas en la comparación.

En la tabla vemos como los valores medios varían entre  $0,1^\circ\text{C}$  en la zona de Alborán, Atlántico y Canarias hasta  $0,3^\circ\text{C}$  en la zona del Mediterráneo. La desviación típica varía entre 0,4 y 0,5 y la correlación va desde 0,86 en la zona de Azores hasta 0,93 en el Mediterráneo.

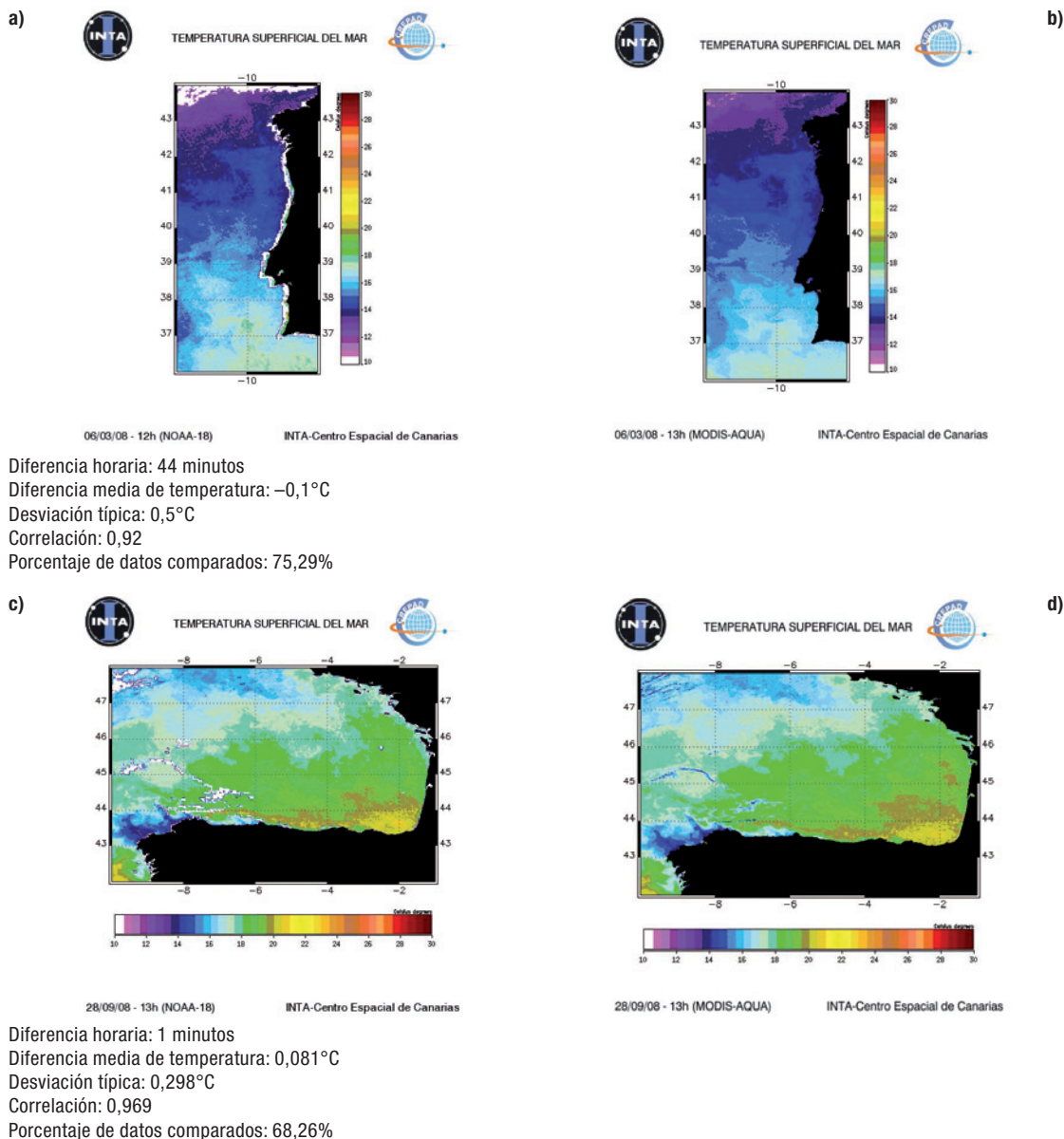
Dos ejemplos de imágenes con alto porcentaje de datos comparados que han dado excelentes resultados se muestran en la Figura 4. En ella se muestra la TSM en la zona del mar Atlántico el 6 de marzo de 2008, en la Figura 4a se presenta la imagen de AVHRR y en la Figura 4b la de MODIS. La diferencia horaria entre los pases de NOAA y AQUA es de 44 minutos, la diferencia de TSM entre los dos sensores es de

**Tabla 2.** Estadísticas básicas para la comparación entre TSM obtenida a partir de datos AVHRR y la obtenida para datos MODIS para las distintas zonas preestablecidas en el Proyecto CREPAD. Sólo se han usado las zonas en las que el porcentaje de píxeles comparables es mayor a 30%. En la tabla se muestra la Media, Desviación Típica y la Correlación. Las dos últimas columnas presentan los porcentajes de datos en los que la diferencia de TSM está dentro de un margen de error de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  y  $\pm 0,8^\circ\text{C}$  respecto al total de píxeles comparados. La columna N° Img muestra el número de imágenes usadas en la comparación

	Media	Desv típica	Correlación	0,50%	0,80%	N° Img
África	—	—	—	—	—	—
Alborán	-0,1	0,5	0,89	69,0	85,4	29
Atlántico	-0,1	0,5	0,91	60,8	81,3	61
Azores	-0,4	0,5	0,86	49,7	74,9	35
Canarias	-0,1	0,4	0,91	72,2	90,3	10
Cantábrico	-0,2	0,4	0,92	62,2	83,6	14
Mediterráneo	-0,3	0,4	0,93	63,9	83,0	16
Total	-0,1	0,5	0,90	61,0	81,5	165



**Figura 3.** Gráficos de la diferencia media de las temperaturas, la desviación típica y la correlación en función del porcentaje de píxeles usados en la comparación para cada zona: a) África, b) Alborán, c) Atlántico, d) Azores, e) Canarias, f) Cantábrico, g) Mediterráneo y h) total.



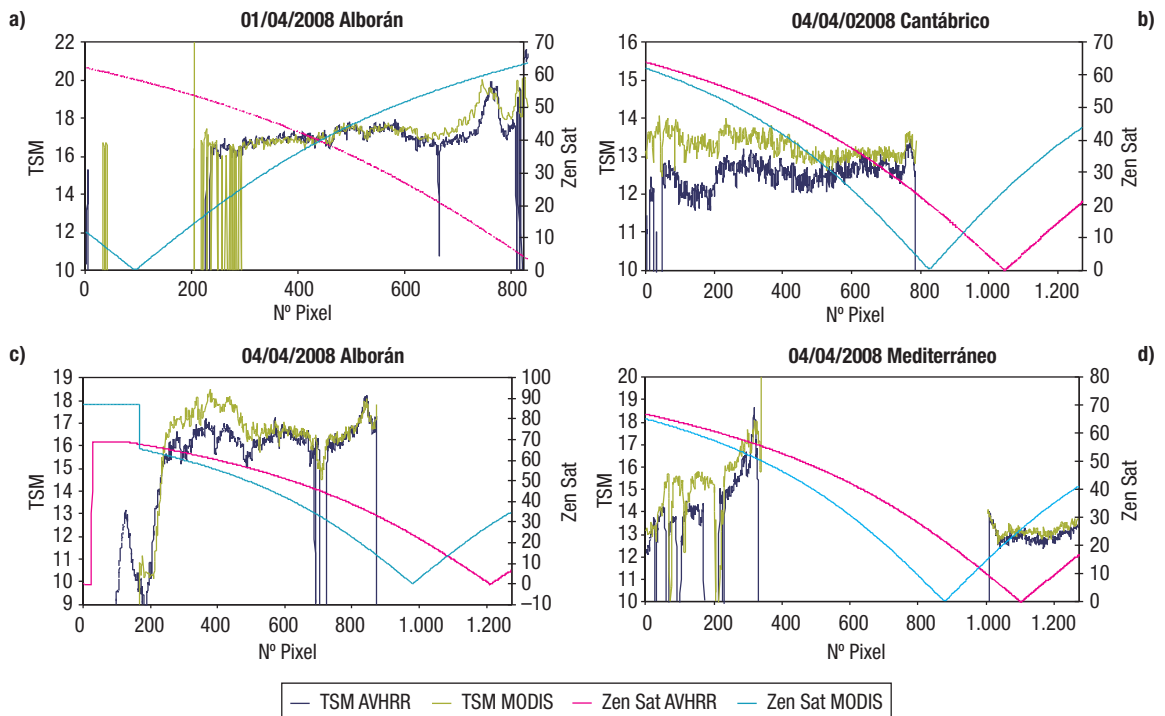
**Figura 4.** Comparación de imágenes con alto porcentaje de píxeles y por tanto pocas nubes. Las figuras a) y b) son imágenes de la zona del Atlántico del 6 de marzo de 2008 de AVHRR y MODIS respectivamente, las c) y d) son de la zona del Cantábrico del 28 de septiembre de 2008 de AVHRR y MODIS respectivamente.

$0,1^{\circ}\text{C}$ , la desviación típica de 0,5, la correlación es de 0,92 y el porcentaje de datos comparados es el 75,3%. Mientras que en la Figura 4c y d se ven datos del Mar Cantábrico del 28 de septiembre de 2008 también para AVHRR y MODIS respectivamente. En esta comparación la diferencia temporal es de 1 minuto, la diferencia media de temperaturas es de  $0,1^{\circ}\text{C}$ , con una desviación típica de 0,3 y la correlación entre ambas imágenes de 0,97, en ella el porcentaje de datos comparados es de 68,3%.

### Variación de la TSM con el ángulo cenital de observación

Una posible fuente de incertidumbre en los datos es el ángulo cenital de observación (a partir de ahora lo llamaremos «zensat»). Por ello se ha estudiado la dependencia de la TSM con dicho ángulo. Se han elegido diez imágenes de abril y junio de 2008, se han procesado los pases completos y se han generado imágenes de TSM y del zensat. Después estas imá-



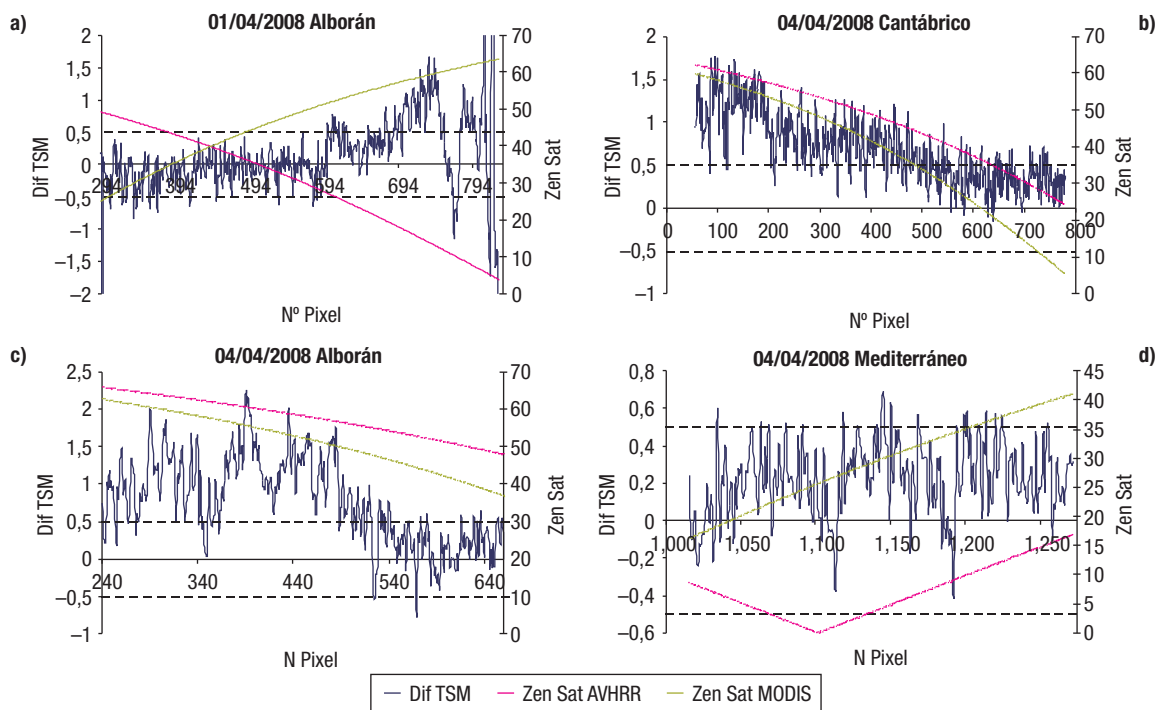


**Figura 5.** Temperatura superficial del mar (TSM) derivada a partir de datos AVHRR (línea azul oscura) y MODIS (línea verde). Las líneas rosa y cian representan los ángulos cenitales de observación (zensat) de los sensores AVHRR y MODIS respectivamente que están referidos al eje secundario. Las zonas sin datos de temperatura se encuentran sobre la superficie terrestre o están enmascaradas por tener nubes. En la gráfica (a) se presenta un perfil de temperaturas y zensat del 1 de abril de 2008 a  $35^{\circ} 58' 29''$  N en una línea que va desde el Atlántico hasta el Mediterráneo, pasando por el Estrecho de Gibraltar. Las demás gráficas son del 4 de abril de 2008, la (b) desde el Atlántico hasta el Mediterráneo a  $35^{\circ} 57' 29''$  N, la (c) sobre el Mar Cantábrico a  $44^{\circ} 1' 30''$  N y la (d) en el Mediterráneo Norte a  $41^{\circ} 27' 30''$  N.

genes se han recortado a la zona de coincidencia entre MODIS y AVHRR. En la Figura 5 presentamos resultados del 1 y 4 de abril de 2008 ya que son las imágenes con menos nubes en las que mejor se puede trazar un perfil longitudinal con los resultados y estudiar su dependencia con zensat. La línea azul oscura presenta la TSM de AVHRR, la verde la TSM de MODIS y las líneas rosa y cian presentan el zensat de AVHRR y MODIS, respectivamente, referidos al eje secundario. Las zonas sin datos de temperatura se encuentran sobre la superficie terrestre o están enmascaradas por tener nubes. En el caso de la Figura 5 (a) son datos del 1 de abril de 2008, y se presenta un perfil de temperaturas y zensat a  $35^{\circ} 58' 29''$  N en una línea que va desde el Atlántico hasta el Mediterráneo, pasando por el Estrecho de Gibraltar. Las demás gráficas son del 4 de abril de 2008, la (b) desde el Atlántico hasta el Mediterráneo a  $35^{\circ} 57' 29''$  N, la (c) sobre el Mar Cantábrico a  $44^{\circ} 1' 30''$  N y la (d) en el Medi-

terráneo Norte a  $41^{\circ} 27' 30''$  N. En todas ellas vemos que para ángulos menores de alrededor de  $50^{\circ}$ , las TSMs son similares, dentro de los márgenes aceptables de error y tienen comportamientos similares. En cambio, cuando alguno de los ángulos es mayor de alrededor de  $50^{\circ}$  las líneas de temperatura empiezan a separarse (notar que las escalas de temperaturas no son iguales en todos los gráficos). Es decir, las diferencias de temperaturas aumentan pero también se ve un ligero desplazamiento de forma que los máximos y mínimos no coinciden como se puede observar claramente en las gráficas de la Figura 5. Este último efecto se puede explicar por que la georreferenciación en los márgenes de las imágenes es complicada y los píxeles son cada vez más grandes (hasta 4 km para AVHRR). Estos datos deben ser tratados con cuidado.

En la Figura 6 se presentan las diferencias de temperaturas de los perfiles mostrados en la Figura 5. En este caso las escalas de tempe-



**Figura 6.** Representa las diferencias de temperaturas de los perfiles mostrados en la Figura 5. Se representa solo la parte de estos perfiles que no contienen nubes ni píxeles sobre tierra. La línea azul representa la diferencia de temperatura en el eje Y principal, la rosa el ángulo cenital de observación de AVHRR, la verde el de MODIS ambos referidos al eje Y secundario. Las dos líneas discontinuas negras se presentan como referencia donde la diferencia entre las imágenes esta entre  $\pm 0,5^\circ$ . En la Figura (a) se muestra la diferencia de TSM para el 1 de abril de 2008, a  $35^\circ 58' 29''$  N y entre  $-11^\circ 47'$  y  $-2^\circ 58'$  E. La (b) presenta los resultados del 4 de abril de 2008 sobre una zona del Mar de Alboran a  $35^\circ 57' 29''$  y entre  $-10^\circ 29'$  y  $-2^\circ 59'$  E. La (c) muestra las diferencias de temperatura del día 4 de abril a una latitud de  $44^\circ 1' 30''$  N sobre el Mar Cantábrico, entre  $-13^\circ 40'$  y  $-1^\circ 35'$  E. Y la (d) es también del día 4 de abril de 2008 y muestra el perfil situado en  $41^\circ 27' 30''$  N y entre  $2^\circ 14'$  y  $6^\circ 41'$  E.

raturas también son distintas entre los gráficos y se representa solo una parte de estos perfiles, los más limpios de nubes. La línea azul representa la diferencia de temperatura en el eje Y principal, la rosa el ángulo cenital de observación de AVHRR, la verde el de MODIS ambos referidos al eje Y secundario, y la dos líneas discontinuas negras se presentan como referencia donde la diferencia entre las imágenes esta entre  $\pm 0,5^\circ$ . En la Figura 6a se muestra la diferencia de TSM para el 1 de abril de 2008, a  $35^\circ 58' 29''$  N y entre  $-11^\circ 47'$  y  $-2^\circ 58'$  E. En este caso vemos que para ángulos cenitales de observación de MODIS mayores que  $51^\circ$  la diferencia de temperatura empieza a aumentar paulatinamente. En cambio para AVHRR, estos ángulos se encuentran entre  $0^\circ$  y  $50^\circ$  aproximadamente y posiblemente no influyen en el aumento de la diferencia. La Figura 6b presenta los resultados del 4 de abril de 2008 sobre una zona del Mar de Alboran a

$35^\circ 57' 29''$  N y entre  $-10^\circ 29'$  y  $-2^\circ 59'$  E. En esta gráfica se observa que las diferencias aumentan cuando el ángulo de observación de AVHRR es mayor que  $54^\circ$ , que corresponde con alrededor de  $46^\circ$  de MODIS. Además a partir de unos  $57^\circ$  de AVHRR (unos  $50^\circ$  de MODIS) la diferencia es mayor a  $0,5^\circ$  en prácticamente todos los casos. La Figura 6c muestra las diferencias de temperatura del día 4 de abril a una latitud de  $44^\circ 1' 30''$  N sobre el Mar Cantábrico, entre  $-13^\circ 40'$  y  $-1^\circ 35'$  E. Este caso es un poco distinto de los anteriores ya que la diferencia de temperatura aumenta con los ángulos de observación a partir de los  $42^\circ$  o  $44^\circ$  para AVHRR y para los  $32^\circ$ - $35^\circ$  de MODIS. Aún así se ve una clara dependencia de los resultados con los ángulos de observación. En cambio en la Figura 6d, que muestra el perfil situado en  $41^\circ 27' 30''$  N y entre  $2^\circ 14'$  y  $6^\circ 41'$  E, esta dependencia no se observa debido a que los ángulos de observación en ambos ca-

Los valores son menores de  $45^\circ$ . En esta gráfica vemos que los valores de diferencia de temperatura permanecen dentro de los márgenes aceptables de incertidumbre en prácticamente toda la gráfica, solo unos píxeles sueltos lo superan.

Este estudio preliminar de una pequeña muestra de imágenes parece indicar que las TSM para zensat elevados es crítica y esos datos deben ser tratados con sumo cuidado. Un estudio más a fondo sería necesario para poder confirmar este resultado. Las principales causas que explicarían el aumento de incertidumbre en los resultados con el ángulo cenital de observación son la atmósfera, la emisividad de la superficie y la georreferenciación de los datos. Cuanto más grandes son los zensat más camino atmosférico y por tanto cualquier error en la estimación de parámetros atmosféricos tales como el vapor de agua,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  o aerosoles puede provocar una mayor incertidumbre en la estimación de la TSM. En el caso de la dependencia de la emisividad con los zensat, algunos autores como Niclós *et al.* (2004) observaron que diferencias en la estimación de la emisividad del agua para ángulos de observación de  $55^\circ$  podían provocar errores en la estimación de la TSM del orden de  $\pm 0,5$  K. Por último, un error en la georreferenciación produciría que los píxeles comparados no fueran los mismos.

## Conclusiones

Este trabajo muestra los resultados de validar datos de TSM obtenidos por medio del software MATIAS a partir del sensor satelital AVHRR con respecto a los obtenidos aplicando el software SeaDAS a datos MODIS. Para ello se ha calculado la diferencia media de temperatura, la desviación típica y el coeficiente de correlación. La comparación ha mostrado que para imágenes con más del 30% de los píxeles comparados el promedio de la diferencia de temperatura es de  $-0,1^\circ\text{C}$ , la desviación es 0,5 y el coeficiente de correlación 0.90.

La TSM obtenida a partir de datos AVHRR revela un ajuste favorable con respecto a la de MODIS. También observamos que en general las medidas de TSM en el primer sensor son mayores.

En esta validación la diferencia promedio entre pases de ambos satélites es de 32 minutos, lo cual lleva a mencionar que la no correlación temporal de los datos prácticamente no influye en los resultados obtenidos. El 88% de los datos han sido comparados con una diferencia entre pases inferior a una hora.

El análisis comparativo de las temperaturas medidas por ambos sensores muestra que los productos TSM generados con el software MATIAS de CREPAD son buenos, teniendo en cuenta que la diferencia media de temperatura con respecto a MODIS es inferior a  $0,1^\circ\text{C}$ . Este valor como promedio de las diferencias es favorable, ya que la precisión en la determinación absoluta de la temperatura de AVHRR está estimada en  $0,5^\circ\text{C}$ . (IOCCG Report Number 5, 2006). Estos resultados posiblemente mejorarían si se eliminaran de la estadística aquellas áreas en las que los ángulos cenitales de observación sean superiores a unos  $55^\circ$ .

## Referencias

- ANDING, D. & KAUTH, R. 1970. Estimation of sea surface temperature from space. *Remote Sensing of the Environment*, 1: 217-220.
- BARTON, I. J., ZAVODY, D. M., O'BRIEN, D. M., CUTTEN, D. R., SAUNDERS, R. W. & LLEWELLYN-JONES, D. T. 1989. Theoretical algorithms for satellite derived sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, 94: 365-3375.
- DONLON, C. J., MINNETT, P. J., GENTEMANN, C., NIGHTINGALE, T. J., BARTON, I. J., WARD, B. & MURRAY, M. J. 2002. Toward Improved Validation of Satellite Sea Surface Skin Temperature Measurements for Climate Research. *J. Climate*, 15: 353-369.
- HOUGHTON, J. T., JENKINS, G. J. & EPHRAUMS, J. J. 1990. *Climate Change – The IPCC Scientific Assessment*. University of Cambridge, 364 pp.
- HUTCHISON, K. D., MARUSA, S., HENDERSON, J. R., KENLEY, R. C., TOPPING, P. C., UPLINGER, W. G. & TWOMEY, J. A. 1999. System Design Considerations for the Retrieval of Sea Surface Temperatures in the NPOESS Era. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16, 107-116.
- IOCCG, International Ocean-Colour Coordinating Group. 2000. Report number 3. 145.
- McCLAIN, E. P., PICHEL, W. G. & WALTON, C. C. 1985. Comparative performance of AVHRR-based Multichannel Sea Surface Temperatures. *J. Geophys. Res.*, 90, No. C6, 11587-11601.

- NICLÓS R., VALOR, E., CASELLES, V., COLL, C., & SANCHEZ, J. M. 2005. In situ angular measurements of thermal infrared sea surface emissivity – Validation of models. *Remote Sensing of Environment*, 94: 83-93.
- ROBLES-GONZALEZ, C. & FERNANDEZ-RENAU, A. 2006. «Review and validation of CREPAD productos». *Second Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*. Ed. José A. Sobrino. Servicio de Publicaciones. Universitat de Valencia. Valencia.
- SAUNDERS R. W., & KRIEBEL, K. T. 1998. An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 9, No. 1, 123-150.
- SOBRINO J. A., LI, Z. L. & STOLL, M. P. 1993. Impact of the atmospheric transmittance and total water vapor content in the algorithms for estimating satellite sea surface temperatures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31: 946-952.
- WALTON, C.C. 1988. Nonlinear multichannel algorithm for estimating sea surface temperature with AVHRR satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, 27: 115-124.
- WALTON, C. C., PICHEL, W. G., SAPPER, F. J. & MAY, D. A. 1998. The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperatures with NOAA polar-orbiting environmental satellites. *Journal of Geophysical Research*, 103: 27999-28012.