

Obtención de la temperatura del aire en Asturias a partir de la temperatura de superficie calculada con imágenes NOAA-AVHRR

C. Recondo* ** y C. S. Pérez-Morandeira**

Correo electrónico: crecondo@relay.etsimo.uniovi.es

* Dpto. de Explotación y Prospección de Minas. Área de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Oviedo. Tlf: 98-5458034. Fax: 98-5458000.

** Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio (INDUROT). Universidad de Oviedo. C/ Independencia, 13. 33004 Oviedo.

RESUMEN

Este trabajo pretende establecer una metodología para la obtención de la temperatura del aire a partir de la temperatura del suelo calculada con imágenes NOAA-AVHRR. El trabajo se ciñe al Principado de Asturias, donde las estaciones meteorológicas con datos de temperatura del aire son pocas y distribuidas de forma no homogénea. En el cálculo de la temperatura de superficie se han empleado diversos algoritmos "split-window", siendo el de Ulivieri/Sobrino el que da mejores resultados. La correlación entre la temperatura media diaria del aire tomada en los observatorios y la temperatura de superficie de las imágenes NOAA es alta ($r=0.91$) y nos permite obtener la temperatura media del aire con un error de ± 2.2 °C.

PALABRAS CLAVE: temperatura del aire, temperatura de superficie, estaciones meteorológicas, NOAA-AVHRR, Asturias.

ABSTRACT

This paper tries to establish a methodology for the obtainment of air temperature from surface temperature calculated from NOAA-AVHRR images. The work is restricted to Principedom of Asturias, where the meteorological observatories with air temperature data are few and inhomogeneous distributed. The surface temperature is calculated using several split-window techniques, obtaining the best results with the Ulivieri/Sobrino's algorithm. The correlation between the daily mean air temperature taken in the observatories and the surface temperature from NOAA images is high ($r=0.91$) and allows to obtain the mean air temperature with an error of ± 2.2 °C.

KEY WORDS: air temperature, surface temperature, meteorological observatories, NOAA-AVHRR, Asturias.

INTRODUCCIÓN

La temperatura del aire y la precipitación son los parámetros meteorológicos más solicitados a los observatorios, ya que son variables básicas en multitud de estudios medioambientales. Tal es así que algunas comunidades autónomas cuentan con su propia red de estaciones meteorológicas, que complementa a la red nacional del Instituto Nacional de Meteorología (I.N.M.). El Principado de Asturias carece de esta infraestructura propia, siendo la única red la nacional. La densidad de esta red es baja y está distribuida de forma poco homogénea, existiendo grandes zonas que carecen de datos (Figura 1). La alternativa en estos casos suele ser la obtención de las variables meteorológicas por

extrapolación de las estaciones más cercanas, pero esta extrapolación no es sencilla, al menos en Asturias, ya que son muchos los parámetros locales que pueden influir en estas variables: altitud, exposición solar, concavidad del suelo, distancia a la costa, etc. (Marquín et al., 2001).

Una alternativa radicalmente diferente consiste en obtener los datos meteorológicos mediante técnicas de teledetección. En nuestro caso pretendemos obtener la temperatura del aire a partir de la temperatura de superficie calculada utilizando imágenes NOAA-AVHRR, encontrando previamente una correlación entre ambas temperaturas. El trabajo se ciñe a Asturias y al periodo comprendido entre el 17 de julio de 1997 y el 20 de diciembre de 1999.

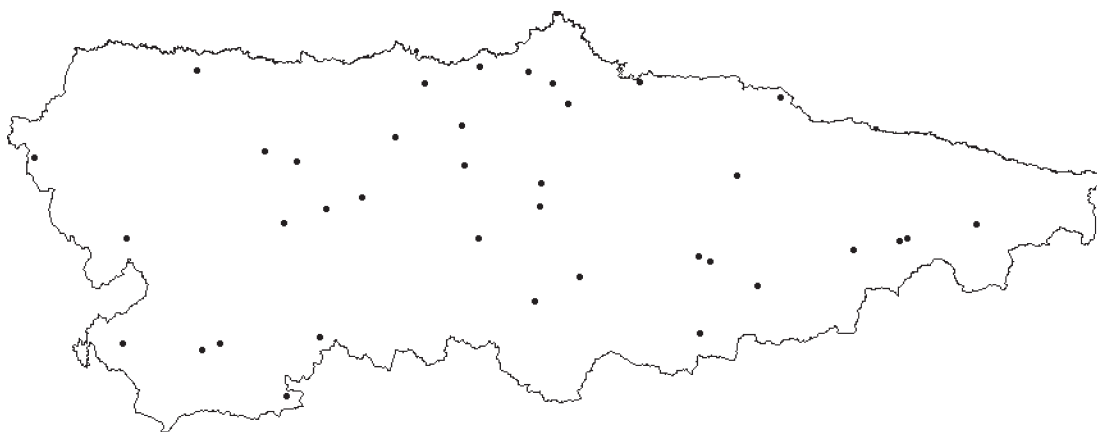


Figura 1. Estaciones termométricas del I.N.M. en el Principado de Asturias entre el 17-7-97 y 20-12-99.

TEMPERATURA DEL AIRE DE LA RED NACIONAL DEL I.N.M.

Para el periodo considerado se solicitaron al I.N.M. los datos diarios de temperatura máxima y mínima (que vienen dadas en décimas de grados centígrados) para las fechas en las que disponíamos de alguna imagen NOAA (109 días). El número de estaciones con datos en este periodo es de 38, siendo su distribución la indicada en la Figura 1. Para algunas estaciones la serie temporal no está completa, faltando en ocasiones hasta meses completos. Además, a lo largo de estos dos años y medio existen estaciones que se han dado de baja y otras que se han dado de alta.

TEMPERATURA DE SUPERFICIE CALCULADA A PARTIR DE LAS IMÁGENES NOAA-AVHRR

Las imágenes NOAA-AVHRR de las que disponemos están distribuidas de forma irregular en el tiempo en el periodo analizado, ya que han sido elegidas sólo las que tuviesen poca o nula nubosidad sobre Asturias. En total son 109 imágenes, tomadas todas entre las 13 y las 16 horas. Estas imágenes nos fueron suministradas gratuitamente por el CREPAD, ya corregidas atmosférica y geoméricamente. Se encontraban en coordenadas geodésicas en el datum NAD-27 (elipsoide de Clarke-1866, punto fundamental Meade's Ranch). Los canales suministrados fueron el 1 (rojo), 2 (IR cercano), 4 (IR térmico) y 5 (IR térmico), los dos primeros en valores de albedo (en %) y los dos últimos como temperaturas de brillo (en °K). Las imágenes han perdido su resolución

original, ya que se nos han dado remuestreadas a un tamaño de píxel de 2x2 km².

Las imágenes fueron referidas a la proyección UTM, datum europeo (ED50), para poder superponerlas a la cartografía utilizada como base: contorno de la Península Ibérica, contorno del Principado de Asturias y mapa de localización de las estaciones termométricas. La superposición del contorno peninsular ha dejado ver que aproximadamente la mitad de las imágenes necesitaban una pequeña corrección. La nueva georreferenciación se hizo con doce puntos de control repartidos por las costas cantábrica y atlántica, buscando el acuerdo óptimo en Asturias.

Para la elaboración de la temperatura de superficie es imprescindible la temperatura de brillo de los canales térmicos, el 4 y el 5, y a veces, dependiendo del algoritmo utilizado y de las fórmulas para el cálculo de las emisividades (ver Tabla 1 y 2) el NDVI calculado a partir de los canales 1 y 2. Para la eliminación de las nubes fue suficiente poner un umbral en la temperatura del canal 5, que es el que presenta menor dispersión en las nubes, de forma que los píxeles con T_5 menor que este umbral fueron eliminados; el umbral depende de la latitud y de la época del año, de forma que para Asturias se eligieron cuatro valores, según fuese primavera, verano, otoño e invierno (278, 281, 278 y 270°K, respectivamente). Asimismo, se eliminaron los píxeles con NDVI menor o igual a cero, correspondientes también a nubes o a agua. La Figura 2 muestra un ejemplo de la aplicación del NDVI y del filtro de nubes.

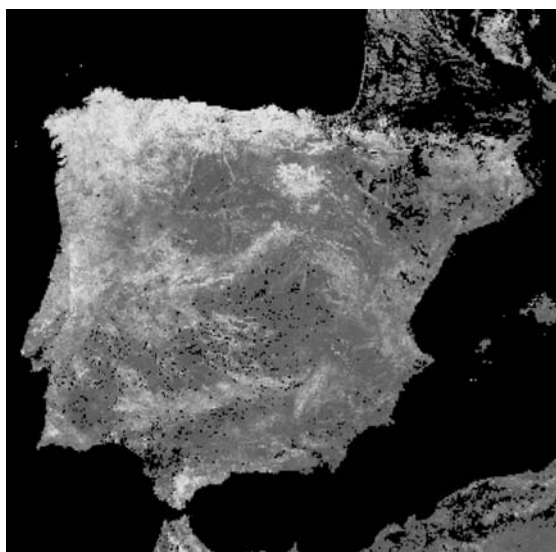


Figura 2. NDVI de la Península Ibérica y filtro de nubes para Asturias para la imagen NOAA del 16 de octubre de 1997.

El método bicanal o “split-window” obtiene la temperatura superficial (tanto del mar, TSM, como la terrestre, TST) a partir de las medidas de dos canales dentro de la ventana atmosférica del IR térmico, ya que de esta forma es posible estimar la contribución atmosférica por la diferente absorción que se produce en ambos canales. Para el sensor AVHRR del NOAA los canales empleados son el 4 (10.30-11.30 mm) y el 5 (11.50-12.50 mm). Son muchos los algoritmos de este tipo existentes en la literatura, ya que cada uno ha sido elaborado para unas condiciones atmosféricas particulares y para determinadas emisividades superficiales. Una exce-

lente recopilación puede ser encontrada en el trabajo “World Land Surface Temperature Atlas” (ESA, 1998), donde se realiza un test, a nivel global, a veinte algoritmos.

Al no disponer en nuestro caso de datos sobre el contenido de vapor de agua (W) de la atmósfera ni de datos precisos sobre emisividades (ϵ), hemos de recurrir a algoritmos que sean independientes de W y que, o bien sean independientes de ϵ , o que permitan la inclusión de valores promedio de emisividad para la vegetación y el suelo desnudo en los canales 4 y 5. Los algoritmos escogidos han sido tres: el de Sobrino *et al.* (1992), el de Sobrino *et al.* (1993) y el de Ulivieri *et al.* (1992) según Sobrino *et al.* (1994). El primero es independiente de W y de ϵ . Los dos últimos son independientes de W y emplean valores promedio de ϵ ; además ambos dan buenos resultados en el test de la ESA, siendo el último el mejor del test. Los tres algoritmos se muestran en la Tabla 1.

En la aplicación de los algoritmos citados a nuestras imágenes hemos eliminado, además de los píxeles de nubes o agua, los afectados por ruido radiométrico, el cual provoca valores de T extremadamente altos cuando $T_4 - T_5 > 20^\circ\text{K}$ y T extremadamente bajas cuando $T_5 > T_4$. Tanto en la aplicación del algoritmo de Sobrino *et al.* (1993) como en el de Ulivieri/Sobrino hemos seguido las indicaciones de la ESA con respecto a las emisividades: la formulación de Valor y Caselles (1996) (Tabla 2), los valores promedio para la vegetación y el suelo desnudo siguientes: en el canal 4, $\epsilon_v = 0.985$ y

Autores	Algoritmos
Sobrino, Coll y Caselles (1992)	$T = T_4 + [0.63 + 0.65 (T_4 - T_5)] (T_4 - T_5) + 1.68$
Sobrino, Caselles y Coll (1993)	$T = T_4 + 1.06 (T_4 - T_5) + 0.46 (T_4 - T_5)^2 + 53(1 - \epsilon_4) - 53\Delta\epsilon$ donde ϵ_i = emisividad en el canal i y $\Delta\epsilon = \epsilon_4 - \epsilon_5$
Ulivieri, Castronuovo, Francioni y Cardillo (1992) mejorado por Sobrino, Li, Stoll y Becker (1994).	$T = T_4 + 2.76 (T_4 - T_5) + 38.6 (1 - \epsilon) - 96.0 \Delta\epsilon$ donde $\epsilon = (\epsilon_4 + \epsilon_5)/2$ y $\Delta\epsilon = \epsilon_4 - \epsilon_5$

Tabla 1. Algoritmos “split-window” usados en este trabajo.

Autores	Algoritmos
Valor y Caselles (1996)	ϵ_i = emisividad en el canal i = $\epsilon_{vi} P_v + \epsilon_{si} (1 - P_v) + d\epsilon$; $P_v = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{MIN}}) / (\text{NDVI}_{\text{MAX}} - \text{NDVI}_{\text{MIN}})$; $d\epsilon = 4 \Delta(d\epsilon) P_v (1 - P_v)$

Tabla 2. Fórmulas para el cálculo de la emisividad usadas en este trabajo.

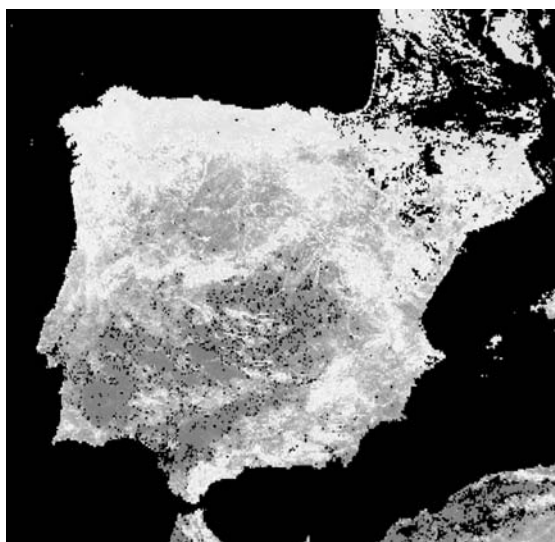


Figura 3. Temperatura de la superficie terrestre (TST) para el 16-10-97 calculada con el algoritmo de Ulivieri/Sobrino: **a)** Para la Península Ibérica. **b)** Para Asturias.

$\epsilon_s=0.95$; en el canal 5, $\epsilon_v=0.985$ y $\epsilon_s=0.97$; y el valor de $\Delta(\text{de})=0.01$. Un ejemplo de las imágenes TST obtenidas se muestra en la Figura 3. Finalmente, se extrae de estas imágenes la TST en los píxeles donde se encuentran localizadas las estaciones meteorológicas de Asturias.

CORRELACIÓN ENTRE LA TEMPERATURA DEL AIRE Y LA DE SUPERFICIE

Contamos con 3332 datos en los que existen ambos valores de temperatura. En un principio pensamos que la temperatura de superficie estaría más correlacionada con la temperatura máxima del aire, ya que las imágenes NOAA estaban tomadas a horas cercanas al mediodía (entre las 13 y 16

horas), así que empezamos viendo esta correlación. Para los tres algoritmos estudiados el mejor resultado se obtiene con una regresión lineal del tipo $t_A = m t_s + b$ (ambas temperaturas en $^{\circ}\text{C}$), obteniéndose la mejor correlación con el algoritmo de Ulivieri/Sobrino (Tabla 3a y Figura 4a). Si además se prescinde de los datos cuyos residuos son superiores a 2σ (el 5% de los datos totales), la correlación mejora sensiblemente (Tabla 3b). También es de destacar que con los algoritmos de Sobrino del 92 y 93 las TST más altas toman valores muy altos ya que, al contener en su formulación el término $(T_4 - T_5)^2$, acusan más el efecto del ruido radiométrico.

La segunda correlación estudiada fue entre la TST y la temperatura media del aire, calculada como la media de la temperatura máxima y mínima

Algoritmo	m	b ($^{\circ}\text{C}$)	r	r^2	σ ($^{\circ}\text{C}$)
Ulivieri/Sobrino	0.7829	2.6733	0.86	0.74	± 3.1
Sobrino <i>et al.</i> (93)	0.6394	5.5165	0.84	0.71	± 3.3
Sobrino <i>et al.</i> (92)	0.5787	6.1057	0.84	0.71	± 3.3

Algoritmo	m	b ($^{\circ}\text{C}$)	r	r^2	σ ($^{\circ}\text{C}$)
Ulivieri/Sobrino	0.7875	2.6132	0.89	0.80	± 2.6
Sobrino <i>et al.</i> (93)	0.6485	5.3614	0.88	0.78	± 2.8
Sobrino <i>et al.</i> (92)	0.5866	5.9267	0.88	0.77	± 2.8

Tabla 3. Resultados de la regresión lineal de la temperatura *máxima* del aire en función de la temperatura de superficie. **a) Arriba:** Con todos los datos. **b) Abajo:** Prescindiendo de los datos cuyos residuos $> 2\sigma$.

Algoritmo	m	b (°C)	r	r ²	σ (°C)
Ulivieri/Sobrino	0.7062	-1.7991	0.87	0.76	± 2.6
Sobrino <i>et al.</i> (93)	0.5815	0.6507	0.87	0.75	± 2.7
Sobrino <i>et al.</i> (92)	0.525	1.2287	0.86	0.74	± 2.8

Algoritmo	m	b (°C)	r	r ²	σ (°C)
Ulivieri/Sobrino	0.7213	-2.1339	0.91	0.82	± 2.2
Sobrino <i>et al.</i> (93)	0.5969	0.2947	0.90	0.81	± 2.3
Sobrino <i>et al.</i> (92)	0.5422	0.8132	0.89	0.80	± 2.3

Tabla 4. Resultados de la regresión lineal de la temperatura *media* del aire en función de la temperatura de superficie.

a) Arriba: Con todos los datos. **b) Abajo:** Prescindiendo de los datos cuyos residuos > 2σ.

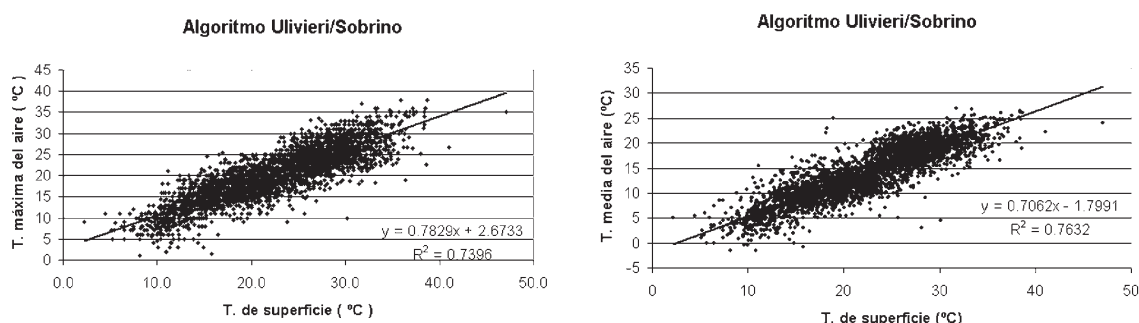


Figura 4. Regresión lineal de la temperatura del aire frente a la temperatura de superficie calculada con el algoritmo de Ulivieri/Sobrino con todos los datos. **a)** Usando la T *máxima* del aire. **b)** Usando la T *media*.

suministradas por el I.N.M. De nuevo el mejor ajuste es una regresión lineal y el mejor algoritmo el de Ulivieri/Sobrino (Tabla 4 y Figura 4b). La correlación es mejor cuando usamos la temperatura media en vez de la máxima (se reduce entre 0.4-0.6 °C), resultado que nos sorprendió al principio, pero que

el número de imágenes, ya que hay meses en los que sólo tenemos una. Para los datos meteorológicos se ha hecho la media mensual de todos los datos diarios disponibles. El número de datos de ambas temperaturas es de 1077. Los resultados de las diferentes regresiones lineales con el algoritmo de Uli-

Algoritmo	m	b (°C)	r	r ²	σ (°C)
Ulivieri/Sobrino	0,6511	3.6848	0.85	0.72	± 2.5

Algoritmo	m	b (°C)	r	r ²	σ (°C)
Ulivieri/Sobrino	0.7863	3.7561	0.89	0.80	± 1.8

Tabla 5. Resultados de la regresión lineal de la temperatura *media mensual de las máximas* en función de la temperatura de superficie. **a) Arriba:** Con todos los datos. **b) Abajo:** Prescindiendo de los datos cuyos residuos > 2σ.

parece lógico si pensamos que la media fluctúa menos que la máxima.

Otra posibilidad que hemos estudiado es la de obtener la temperatura media mensual, en lugar de la diaria, tanto de las máximas como de las medias. Evidentemente en este caso estamos limitados por

Ulivieri/Sobrino se muestran en la Tabla 5 para las máximas (Figura 5a) y en la Tabla 6 (Figura 5b) para las medias.

En este análisis hemos tratado los datos conjuntamente, es decir, no hemos hecho distinción entre las estaciones, cuyas características locales son muy

Algoritmo	m	b (°C)	r	r ²	σ (°C)
Ulivieri/Sobrino	0.6123	-0.0738	0.86	0.73	± 2.3

Algoritmo	m	b (°C)	r	r ²	σ (°C)
Ulivieri/Sobrino	0.6267	-0.2034	0.90	0.80	± 2.0

Tabla 6. Resultados de la regresión lineal de la temperatura *media mensual de las medias* en función de la temperatura de superficie. **a) Arriba:** Con todos los datos. **b) Abajo:** Prescindiendo de los datos cuyos residuos > 2σ.

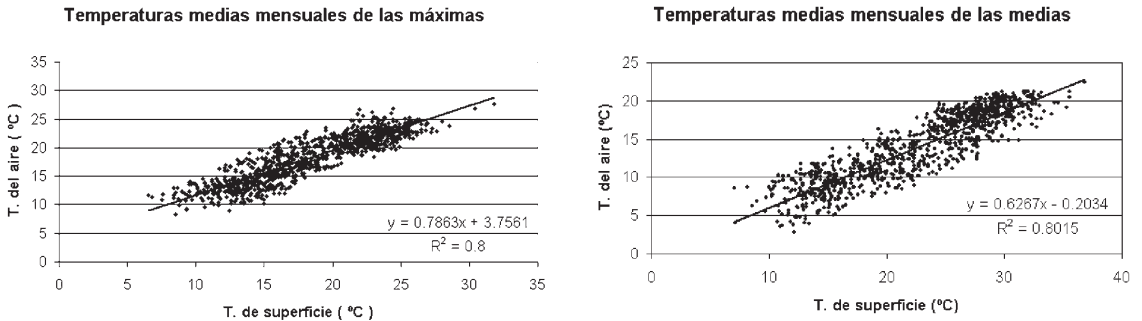


Figura 5. Regresión lineal de la temperatura *media mensual* del aire frente a la temperatura de superficie calculada con el algoritmo de Ulivieri/Sobrino con sólo los datos cuyo residuo es menor de 2σ. **a)** Usando las T *máximas* del aire. **b)** Usando las T *medias*.

diferentes. Cuando consideramos una estación en particular, correlacionando sus temperaturas a lo largo de las 109 fechas, la correlación mejora (con todos los datos de las temperaturas máximas diarias, 28 de las estaciones tienen el parámetro r entre 0.86 y 0.95). Esto nos hace pensar que la correlación entre la temperatura del aire y la de la superficie puede ser mejorada introduciendo de alguna forma los parámetros locales de cada estación (altitud, orientación de la ladera al sol, orientación respecto al viento, concavidad, tipo de cubierta, etc.), pero esto no es sencillo y, de cualquier forma, queda para un trabajo futuro.

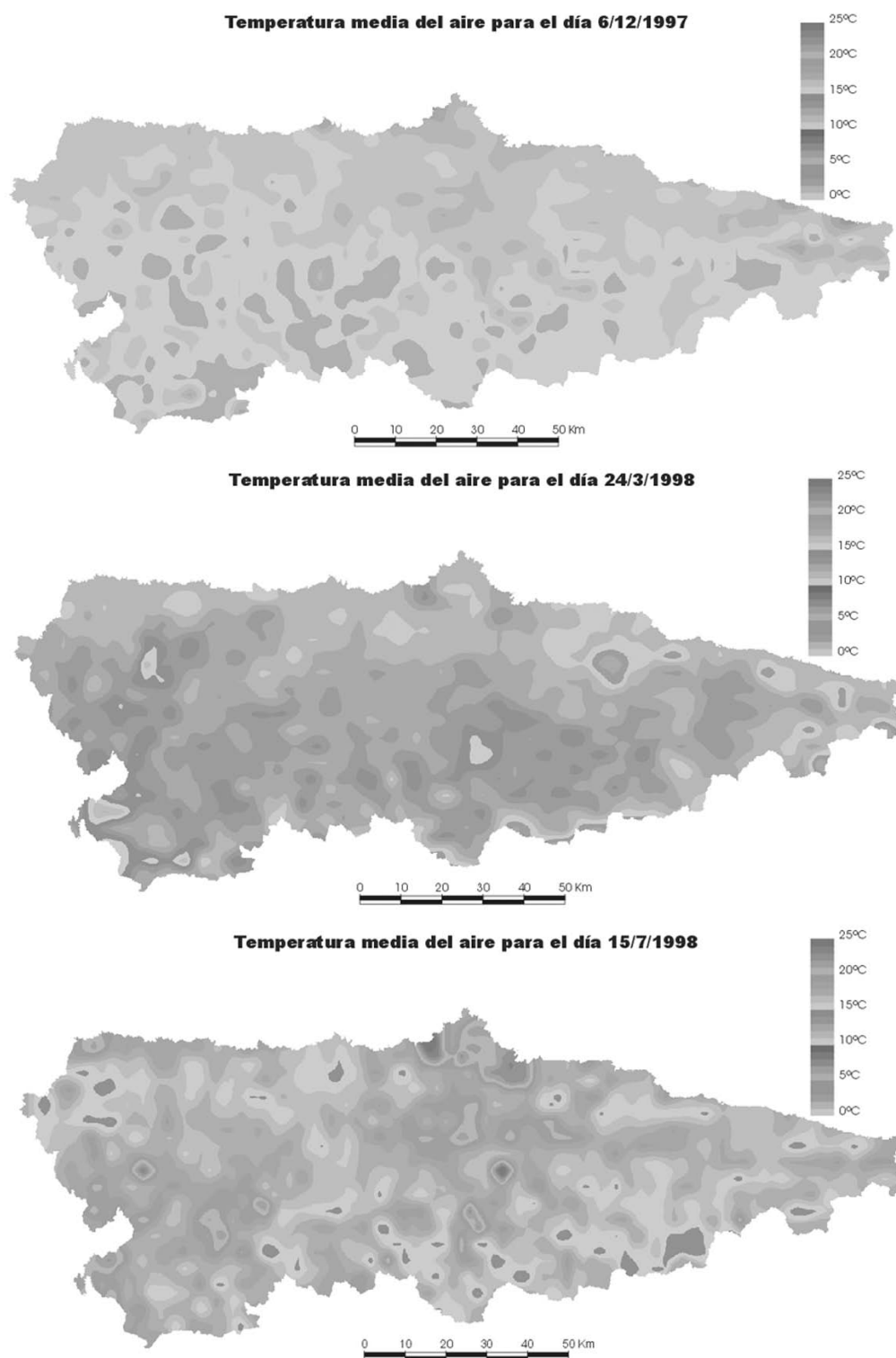
Por otra parte, los errores con los que se pueden obtener las diferentes temperaturas del aire con el análisis general realizado (2.6 °C para la máxima diaria, 2.2 °C para la media diaria, 1.8 °C para la media mensual de las máximas y 2.0 °C para la media mensual de las medias) están dentro del margen de error obtenido por la ESA al aplicar el algoritmo de Ulivieri/Sobrino (entre 1.5 y 3 °K), así que es posible que la mejora de la correlación pase por la aplicación de algoritmos más apropiados para Asturias.

Una de las utilidades más inmediatas del trabajo es la realización de mapas de temperaturas del aire para Asturias (Figura 6).

CONCLUSIONES

Analizando imágenes NOAA-AVHRR y datos de temperatura del aire de 38 estaciones meteorológicas asturianas a lo largo de dos años y medio, hemos llegado a los siguientes resultados:

- El algoritmo que mejor se comporta de los tres usados para el cálculo de la TST es el de Ulivieri/Sobrino, que calcula la temperatura superficial mediante la fórmula general de Ulivieri *et al.* (1992), pero mejorados sus coeficientes por Sobrino *et al.* (1994). Además, éste es el algoritmo “split-window” que da mejores resultados a nivel global en un test realizado por la ESA. No han sido probados algoritmos que necesitan medidas específicas (de vapor de agua, emisividades, etc.), ya que carecemos de ellas.
- La correlación entre las diversas temperaturas del aire (máximas o medias, diarias o mensuales) y la TST calculada es alta, y nos permite obtener las temperaturas del aire cada 2x2 km² en toda Asturias con errores de entre 1.8 y 2.6 °C. Estos errores están dentro del margen de error obtenido por la ESA al aplicar el mismo algoritmo.
- Podemos tratar de mejorar la correlación por tres vías distintas: aumentando la resolución, al menos



* **Figura 6.** Mapas de temperatura media del aire (calculada a partir de la TST de imágenes NOAA-AVHRR) para distintas fechas.

Todas las figuras precedidas de asterisco se incluyen en el cuadernillo anexo de color

a los 1.1x1.1 km² originales de las imágenes AVHRR; introduciendo los parámetros locales de cada estación; e investigando otros algoritmos, así como introducir valores de emisividades y de vapor de agua más adecuados para Asturias.

AGRADECIMIENTOS

Los autores queremos expresar nuestro agradecimiento al CREPAD por el suministro gratuito de las imágenes NOAA y, en particular, a María de los Ángeles Domínguez Durán por su ayuda. A los distribuidores de ERMapper 6.0 por la licencia de estudiante que nos facilitaron. Y a la ESA por enviarnos tan diligentemente la documentación que le solicitamos.

BIBLIOGRAFIA

- CENTRO DE RECEPCIÓN, PROCESO, ARCHIVO Y DISTRIBUCIÓN DE IMÁGENES DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA (CREPAD). www.crepad.rcanaria.es.
- EUROPEAN SPATIAL AGENCY (ESA) 1998. World Land Surface Temperature Atlas 1992-93. <http://shark1.esrin.esa.it/ionia/EARTH/LST/AVHRR/welcome.html>.
- MARQUINEZ, J., LASTRA, J. and GARCIA, P. 2001. Prediction models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis. *Journal of Hydrology*, enviado.
- SOBRINO, J. A., COLL, C. y CASELLES, V. 1992. Medida de la temperatura desde satélite. *La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Climatología y desertificación*. Universitat de València. Departament de termodinámica.
- SOBRINO, J. A., CASELLES, V. and COLL, C. 1993. Theoretical split window algorithms for determining the actual surface temperature. *II Nuevo Cimento*. 16: 219-236.
- SOBRINO, J. A., LI, Z.-L., STOLL, M. P. and BECKER, F. 1994. Improvements in the split-window technique for land surface temperature determination. *IEEE Transactions and Geoscience and Remote Sensing*. 32: 243-253.
- ULIVIERI, C., CASTRONUOVO, M. M., FRANCIONI, R. and CARDILLO, A. 1992. A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellites. *COSPAR*. 27 August-5 September. Washington, DC, USA.
- VALOR, E. and CASELLES, V. 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African and South American areas. *Remote Sensing of Environment*. 57: 167-184.