

MEJORAS EN LA MODELIZACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL AIRE MEDIANTE EL USO DE LA TELEDETECCIÓN Y DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

CRISTÓBAL ROSSELLÓ, J.¹; NINYEROLA CASALS, M.²;
PONS FERNÁNDEZ, X.^{1,3}; PLA MONTFERRER, M.⁴

¹Dep. Geografía. Universitat Autònoma de Barcelona. Cerdanyola del Vallès, 08193.
Jordi.Cristobal@uab.es.

²Dep. Biología Animal, Vegetal y Ecología. Unidad de Botánica. Universitat Autònoma de Barcelona. Cerdanyola del Vallès, 08193. Miquel.Ninyerola@uab.es.

³Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales (CREAF). Universitat Autònoma de Barcelona. Cerdanyola del Vallès, 08193. Xavier.Pons@uab.es.

⁴Centro Tecnológico y Forestal de Cataluña (CTFC). Pujada del Seminari s/n. Solsona (Lleida). magda.pla@ctfc.es

RESUMEN

La temperatura del aire es un descriptor primario de las condiciones medioambientales terrestres y está implicada en muchos procesos ambientales tales como la evapotranspiración real y potencial, la radiación neta o la distribución de especies. Aunque las estaciones meteorológicas proporcionan datos puntuales de temperatura del aire, en muchos casos (especialmente para áreas extensas y heterogéneas) es necesario disponer de una superficie continua.

En este artículo se presenta una metodología híbrida entre la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica para la obtención de superficies continuas de temperatura (mínima, media y máxima) con una resolución temporal diaria, mensual y anual para el periodo 2000-2005. Las superficies se han desarrollado para el ámbito geográfico de Cataluña utilizando un análisis de regresión múltiple combinado con técnicas de interpolación espacial. Para realizar el análisis de regresión múltiple se han utilizado como predictores un conjunto de variables multiresolución obtenidas mediante técnicas de Teledetección (albedo, temperatura de la superficie terrestre, temperatura aparente de brillo y NDVI) a partir de los satélites Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+, NOAA AVHRR y TERRA MODIS. Estos predictores se han combinado con un conjunto de variables geográficas (altitud, latitud, continentalidad y radiación solar global). La selección de los mejores modelos (*best subsets*) se ha llevado a cabo mediante la CP de Mallow que permite escoger el conjunto de predictores que mejor modelizan la temperatura del aire minimizando los efectos provocados por el hecho de que existen modelos con distinto número de muestras y predictores. Los resultados indican que los mejores modelos de temperatura del aire se obtienen cuando se combinan variables de Teledetección con variables geográficas. La validación con datos independientes y promediando todos los casos revela valores de $R^2=0.62$ y de $RMSE=1.22$ °C para las temperaturas diarias y de $R^2=0.90$ y de $RMSE=0.84$ °C para las temperaturas mensuales y anuales.

Palabras clave

Modelización de la temperatura del aire, CP de Mallow, Teledetección, Landsat, MODIS, NOAA.

ABSTRACT

Air temperature is a primary descriptor of terrestrial environment conditions across the earth and is involved in many environmental processes such as the actual and potential

evapotranspiration, net radiation or species distribution. Ground meteorological stations provide important local data of air temperature, but a continuous surface for large and heterogeneous areas is also needed.

In this article we present a hybrid methodology between Remote Sensing and Geographical Information Systems to retrieve instantaneous, mean, maximum and minimum air temperatures for daily, monthly and annual periods during 2000-2005 at a regional scale (Catalonia, North-West of Spain) by means of multiple regression analysis and spatial interpolation techniques. To perform multiple regression analysis we have used geographical and multi resolution remotely sensed variables as predictors. As geographical variables we have included altitude, latitude, continentality and global solar radiation which have been useful when obtaining monthly temperature and precipitation maps. As Remote Sensing predictors, we have selected those variables that could be related with air temperature such as albedo, land surface temperature, apparent brightness temperature and NDVI. These variables have been obtained from Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+, NOAA AVHRR and TERRA MODIS satellites.

Model selection has been carried out by means of Mallows' Cp best subsets to select which multiple regression model best describes the data so which variables are introduced in the analysis.

In order to detect map accuracy we have averaged the R^2 and the RMS error of the evaluation set (40% of the meteorological stations corresponding to the different days and months). Best air temperature models are obtained when remote sensing variables are combined with geographical variables: averaged test $R^2=0.67$ and averaged RMS error=1.22 °C for daily temperatures and averaged test $R^2=0.90$ and averaged RMS error =0.84 °C for monthly and annual temperatures.

Keywords

Air temperature modelling, Mallows' Cp, Landsat, MODIS, NOAA.

1. INTRODUCCIÓN

La temperatura del aire es un descriptor esencial de las condiciones ambientales de la Tierra ya que regula procesos de alto interés como la evapotranspiración real y potencial, la radiación neta o la distribución de las especies (Kustas, 1996; Prihodko y Goward, 1997; Cristóbal *et al.*, 2005). Así mismo, también es usada como uno de los parámetros básicos de entrada en algoritmos de corrección atmosférica en el espectro del infrarrojo térmico (Qin y Karnieli, 2001).

En este sentido, las estaciones meteorológicas proporcionan datos puntuales de la temperatura del aire aunque para analizar esta información en áreas extensas y heterogéneas es necesario el uso de una superficie continua (Ninyerola *et al.* 2000).

Una aproximación típica en la modelización de la temperatura del aire es mediante el análisis de regresión múltiple utilizando variables geográficas como son la latitud, la longitud y la continentalidad como predictores. Así mismo, el archivo actual de algunos datos de satélite (más de 30 años en el caso de NOAA-AVHRR) ofrece la posibilidad de unir el enfoque geográfico con el enfoque de Teledetección que utiliza variables como la temperatura de superficie terrestre, el NDVI o el albedo.

En este sentido, hay estudios que introducen variables de Teledetección en la modelización de la temperatura del aire para correlacionar la temperatura diaria del aire, media y máxima con temperatura de la superficie terrestre (Prihodko y Goward, 1997;

Vogt et al., 1997; Recondo y Pérez-Morandeira, 2002; Sun, 2005). Sin embargo, no es habitual encontrar en la bibliografía actual el uso conjunto de la Teledetección con variables geográficas y usando una serie meteorológica extensa.

El objetivo de este artículo es combinar la Teledetección con variables geográficas para mejorar la modelización de temperatura del aire instantánea, diaria, mensual y anual usando imágenes multi-resolución de diferentes satélites durante el periodo 2000-2005.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El ámbito geográfico del área de estudio corresponde a la comunidad autónoma de Cataluña comprendida entre las coordenadas UTM-31N: 260000 (X mínima), 528000 (X máxima), 4489000 (Y mínima) y 4749000 (Y máxima) con una superficie aproximada de 32000 km².

3. MATERIAL

3.1 Datos de Teledetección

En este trabajo se han seleccionado un conjunto de 16 imágenes de Landsat-5 TM y 36 imágenes Landsat-7 ETM+ (imágenes de la órbita 198 y filas 31 y 32), 30 imágenes NOAA-AVHRR y 49 imágenes TERRA-MODIS durante el periodo 2002 y 2004 para realizar el análisis de regresión múltiple de la temperatura del aire instantánea y diaria. Además, para el análisis de regresión múltiple mensual y anual se han utilizado los compuestos cada 8 y 16 días de TERRA-MODIS durante el periodo 2000 y 2005. Los compuestos TERRA-MODIS para este periodo se han obtenido a través del portal de Internet del EOS (<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>). Para realizar la modelización de la temperatura del aire se han seleccionado tres tipos diferentes de productos que contienen las variables de Teledetección: MOD11A1 y MOD11A2 (que contiene la temperatura de la superficie terrestre para periodos diarios y cada ocho días), MOD09GHK y MOD09A1 (que contienen las reflectancias calibradas para periodos diarios y cada ocho días) y MOD43B3 (que contiene el albedo para periodos de 16 días).

Las imágenes y los productos NOAA-AVHRR (temperatura de la superficie terrestre, albedo y NDVI) se han obtenido a través del Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid (LATUV).

Para comparar los resultados diarios, se han elegido imágenes que son coincidentes en fecha. En el caso de NOAA-AVHRR sólo hay 30 imágenes coincidentes. Aunque la hora de adquisición de las imágenes es diferente para cada satélite, los satélites Landsat y MODIS pasan por Cataluña aproximadamente a la misma hora, entre las 9:30 y las 11:30 hora solar local. Por otra parte, NOAA pasa sobre la misma área, entre las 12:30 y las 14:30 hora solar local.

3.2 Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos semi-horarios para el periodo 2000-2005 se han obtenido a través de la página *web* del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC). De un total de 154 estaciones se han seleccionado un conjunto de 134 estaciones en función de la cantidad de años que la estación meteorológica lleva en servicio. Para establecer este filtro, se han seleccionado aquellas estaciones con 5 o más años en servicio, considerando suficiente este filtro para el cálculo de las temperaturas diarias, mensuales y anuales para el periodo estudiado.

La red de estaciones meteorológicas del SMC comprende en total un conjunto de tres redes. La primera red es la correspondiente a la Red Agroclimática que incluye principalmente las estaciones meteorológicas que cubren zonas agrarias. La segunda red es la Red Automática formada por estaciones meteorológicas automáticas y que cubren tanto zonas agrarias como zonas forestales. La tercera red es Red Meteorológica Nival formada por las estaciones meteorológicas automáticas situadas en cotas elevadas, en nuestro caso, la región de los Pirineos.

4. METODOLOGÍA

Para realizar la modelización de la temperatura instantánea, diaria, mensual y anual del aire se ha usado una variante de la metodología propuesta por Ninyerola *et al.* (2000) incorporando datos de Teledetección (Cristóbal *et al.*, 2005; Ninyerola *et al.*, 2005). Esta metodología está basada en técnicas de regresión múltiple y de interpolación espacial de los datos provenientes de las estaciones meteorológicas. Un aspecto a destacar del modelo es el refinamiento posterior que se realiza sobre estos mapas, utilizando precisamente los residuos del mismo análisis de regresión múltiple. De esta manera se obtiene por interpolación estrictamente matemática (inverso de la distancia y *splines*) unos mapas de residuos o anomalías que nos sirven para corregir los mapas iniciales obtenidos por el modelo de la regresión múltiple. Así pues, estamos ante un método de interpolación espacial que integra aspectos estadísticos, matemáticos y herramientas típicamente SIG. En la elaboración de los modelos de regresión múltiple se utiliza el 60% de las estaciones, y el restante 40% para su validación.

En nuestro caso hemos utilizado como predictores variables geográficas y variables multi-resolución provenientes de la Teledetección para realizar el análisis de regresión múltiple (de ahora en adelante se llamarán modelos combinados). Para cuantificar la mejora incluyendo variables de Teledetección en el modelado de temperatura del aire se ha realizado también el análisis de regresión múltiple usando variables geográficas exclusivamente.

La selección de los modelos se ha realizado mediante el análisis Mallows' C_p best subsets para seleccionar qué modelo de regresión múltiple describe mejor los datos y qué variables se introducen en el análisis (Draper y Smith, 1981; Harrell, 2001).

4.1 Selección de los predictores de la regresión múltiple

La selección de variables geográficas usadas en la regresión múltiple se ha hecho en función de trabajos previos (Ninyerola *et al.*, 2000) en los cuales se ha escogido la altitud, la latitud, la continentalidad y la radiación solar potencial. En estos trabajos la metodología desarrollada con estas variables ha dado buenos resultados.

Los predictores provenientes de la Teledetección se han seleccionado en función de su posible relación con la temperatura del aire, como son el albedo, el NDVI, la temperatura aparente de brillo (sólo en el caso de las modelización con Landsat) y la temperatura de la superficie terrestre.

4.2 Validación del modelo

Para la elaboración de los modelos de regresión múltiple para cada una de las fechas se han usado el 60% de los datos disponibles. El 40% restante se ha usado para verificar el modelo. Como indicador de la bondad del ajuste se ha usado el coeficiente de determinación (R^2) y como medida de error el *Root Mean Square Error* (RMSE).

4.3 Definición de las variables geográficas

Como se ha comentado anteriormente, se han seleccionado cuatro variables de tipo geográfico como predictores en los modelos de regresión múltiple.

La latitud se ha definido como el coseno de la latitud nominal de las estaciones meteorológicas. La altitud se ha extraído de un modelo digital de elevaciones del terreno. La continentalidad se ha definido como la distancia al mar. Finalmente, la radiación solar global ha sido extraída de un modelo de radiación potencial siguiendo la metodología propuesta por (Pons y Ninyerola, 2006) donde se calcula la radiación solar incidente en cada punto a lo largo de un día determinado del año. El modelo tiene en cuenta la posición del Sol en intervalos de una hora, los ángulos de incidencia, las sombras proyectadas y la distancia de la Tierra al Sol.

4.4 Procesamiento de las imágenes Landsat-5 TM y Landsat-7 ETM+

La metodología empleada en el procesado de las imágenes Landsat-5 TM y Landsat-7 ETM+ ha sido la siguiente:

4.4.1. Corrección geométrica de las imágenes

Las imágenes se han corregido geoméricamente mediante técnicas avanzadas basadas en polinomios de primer grado con un ajuste polinómico con zetas y considerando el relieve a través de un MDE (Palà y Pons, 1995). Las imágenes se han corregido con una resolución espacial de 120 metros correspondiente al canal térmico del Landsat-5 TM.

4.4.2 Corrección radiométrica de las imágenes (canales no térmicos)

La corrección radiométrica se ha llevado a cabo mediante el método propuesto por Pons y Solé (1994). El objetivo de este método es reducir la presencia de artefactos no deseados provocados por los efectos de la atmósfera o de la iluminación diferencial provocada por la hora del día, el día del año, la posición de la Tierra y el relieve (zonas más o menos iluminadas, ocultas, sombras proyectadas, etc). La conversión de DN a radiancias se ha realizado mediante la lectura de los datos incluidos en la cabecera de cada imagen, aunque en el caso del formato original de las imágenes (formato CEOS) se ha de tener en cuenta en la lectura de estos parámetros (Cristóbal *et al.*, 2004).

4.4.3 Filtrado de la cubierta nubosa

La cubierta nubosa de las imágenes se ha filtrado mediante la metodología propuesta por (Cea *et al.* 2005).

4.4.4 Temperatura de la superficie terrestre (TST)

Dada la ausencia de perfiles atmosféricos a la hora de paso del satélite para llevar a cabo la corrección atmosférica mediante el modelo MODTRAN (Kneisys *et al.*, 1995), se ha llevado a cabo la corrección sólo por emisividades de la banda térmica del Landsat-5 TM y Landsat-7 ETM+ por el método propuesto por Valor *et al.* (2000).

4.4.5 Temperatura aparente de brillo

Se ha calculado siguiendo la metodología propuesta por Markham y Barker (1986) y por Irish (2003) usando los parámetros de conversión de DN a temperaturas almacenados en la cabecera de las imágenes.

4.4.6 Albedo

Se ha calculado en base al método propuesto por Dubayah (1992) mediante la suma ponderada de los canales del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio (canales 1, 2, 3, 4, 5, y 7 del ETM+ y TM).

4.5 Procesado de las imágenes de TERRA-MODIS

Para calcular la TST, el albedo y del NDVI mensual y anual se han utilizado los compuestos cada ocho días de la TST, los compuestos cada 16 días del albedo y los compuestos cada 8 días de las reflectancias calibradas, respectivamente. Para la modelización de temperatura mínima mensual del aire se ha incluido la TST nocturna. El albedo diario se ha calculado mediante la metodología propuesta por Liang *et al.* (1999) usando las imágenes diarias de reflectancias calibradas. El NDVI se ha calculado también mediante las imágenes diarias de reflectancias calibradas.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados muestran que los modelos seleccionados estadísticamente que combinan las predictores de Teledetección con predictores geográficos aparecen en una frecuencia más alta que los modelos sólo geográficos o los modelos de Teledetección (87%, 11% y 2% respectivamente para todo el conjunto de modelos). En este sentido, las variables provenientes de la Teledetección han demostrado mejorar la modelización de la temperatura del aire, siendo significativos en el 89% de los modelos.

Para detectar la precisión de la cartografía resultante se ha promediado el R^2 y el RMSE del conjunto de evaluación correspondiente a los modelos combinados y a los modelos de Teledetección para analizar la importancia de las variables de la Teledetección en la modelización de la temperatura del aire.

La tabla 1 muestra el promedio del RMSE calculado para los modelos diarios y mensuales de la temperatura del aire. Los mejores modelos se obtienen combinando las variables de Teledetección con las variables geográficas: promedio del conjunto de test $R^2=0.67$ y promedio del RMSE= 1.22°C para temperaturas diarias y promedio del conjunto de test $R^2=0.90$ y promedio del RMSE= 0.84°C para temperaturas mensuales y anuales. Sin embargo, la temperatura mínima y máxima del aire presenta valores más bajos que la temperatura media del aire debido a que los valores mínimos y máximos corresponden a valores extremos que son usualmente más difíciles de predecir que los valores medios.

Tabla 1. Promedio del RMSE y del R^2 de la temperatura del aire de los modelos diarios, mensuales y anual

	T ins		T media		T mín		T máx	
	RMSE (°C)	R^2	RMSE (°C)	R^2	RMSE (°C)	R^2	RMSE (°C)	R^2
Landsat diarios	1.82	0.61	1.32	0.65	2.42	0.44	1.70	0.63
NOAA diarios	1.48	0.59	1.11	0.66	2.20	0.46	1.64	0.60
MODIS diarios	1.93	0.55	1.22	0.71	2.25	0.54	1.91	0.60
Promedio modelos diarios	1.74	0.58	1.22	0.67	2.29	0.48	1.75	0.61
MODIS mensual y anual			0.84	0.90	1.27	0.79	1.13	0.78

*. ins: instantánea, mín: mínima y máx: máxima.

La tabla 2 muestra la diferencia entre el promedio del RMSE para los modelos combinados (incluyendo los modelos que incorporan al mismo tiempo variables geográficas y variables de Teledetección) y el promedio del RMSE para los modelos sólo geográficos. Un valor negativo indica que ha habido una mejora en la modelización de la temperatura del aire usando los modelos combinados. En el 70% de la comparación entre modelos (modelos geográficos *versus* modelos combinados), los mejores modelos de la temperatura del aire se han obtenido cuando los modelos combinados estaban presentes.

Todos los valores obtenidos en la tabla 2 son negativos pero la diferencia con los modelos geográficos está alrededor de 0.1 °C. En este sentido, los modelos geográficos ya dan por sí mismos valores bajos de RMSE. Sin embargo, el uso de las variables de Teledetección en los modelos combinados es útil para disminuir el RMSE.

Por otra parte, se tiene que tener en cuenta, que la mejora en de los modelos mensuales y anual es mayor que en los modelos diarios debido a la longitud de la serie climatológica analizada.

La modelización de la temperatura diaria instantánea presenta los valores más altos de mejora seguida por la temperatura media, máxima y mínima. En este sentido, los valores de temperatura diarios instantáneos son los que están mejor correlacionados con los datos de Teledetección y, por esta razón, presentan mejores resultados. Las mejoras entre las temperaturas medias y máximas son más elevadas respecto a las temperaturas mínimas. Esto se puede explicar por el hecho que las temperaturas mínimas suelen darse durante la noche periodo en el cual no se ha seleccionado imágenes de Teledetección. Por otra parte, en el caso de la modelización de la temperatura mínima mensual se ha usado la TST nocturna la cual si ha ofrecido una mejora en la modelización de la temperatura.

Tabla 2. Diferencias de los promedios del RMSE entre modelos combinados y modelos geográficos

°C*	T ins	T media	Tmín	Tmáx
Landsat diario	-0.11	-0.07	-0.01	-0.07
NOAA diario	-0.16	-0.11	-0.01	-0.10
MODIS diario	-0.18	-0.11	-0.04	-0.10
Promedio modelos diarios	-0.15	-0.10	-0.02	-0.09
MODIS mensual y anual		-0.10	-0.08	-0.13

*. ins: instantánea, mín: mínima y máx: máxima.

En referencia al porcentaje de variables estadísticamente significativas que aparecen en los modelos combinados, estos se comportan de diferente manera dependiendo de la resolución temporal (diaria, mensual o anual). En el caso de las variables geográficas, la altitud y la continentalidad son las variables más importantes (presentes en el 85% y el 68% de los modelos, respectivamente) seguidas por la latitud y la radiación solar global (incluidas en el 56% y el 34% de los modelos, respectivamente). En el caso de los modelos mensuales la continentalidad y la altitud son las variables más importantes (presentes en el 85% y el 67% de los modelos, respectivamente) seguidas por

la radiación solar global y la latitud (incluidas en el 46% y el 31% de los modelos, respectivamente). A pesar de que en otros trabajos (Ninyerola *et al.*, 2000) la altitud parece usualmente en una mayor frecuencia que la continentalidad un incremento en la serie meteorológica podría cambiar este comportamiento.

En el caso de las variables de Teledetección para los modelos diarios, la TST es la variable más importante seguida por el albedo y el NDVI (presentes en el 77%, 43% y 42% de los modelos, respectivamente).

La TST está presente en casi cada uno de los modelos diarios y en todos los modelos mensuales y, por lo tanto, ha demostrado ser el predictor estadísticamente más robusto para ser incluido en la modelización de la temperatura del aire. Por otro lado, hay que tener en cuenta que la TAB (sólo en el caso de los modelos obtenidos con variables de Landsat) es también significativa en el 36% de los modelos diarios. A pesar de la ausencia de perfiles atmosféricos a la hora de paso del satélite para llevar a cabo la corrección atmosférica mediante ecuaciones mono-canal del canal térmico del Landsat, la TAB puede ser también una buena elección para sustituir la TST como predictor en la modelización de la temperatura del aire.

En este sentido, el NDVI también es fácil de calcular y aunque las bandas usadas en su cálculo han sido corregidas radiométricamente, el NDVI podría ser usado también sin ningún tipo de corrección, dado que en su cálculo se corrigen parcialmente los efectos atmosféricos.

La comparación entre las diferentes resoluciones espaciales de los diferentes sensores muestra que a una menor resolución espacial los modelos de la temperatura del aire dan mejores resultados que los de mayor resolución espacial. Esto se puede explicar por el hecho de que las medidas de la temperatura del aire de las estaciones meteorológicas son más representativas para un píxel de 1000 m que para un píxel de 120 m debido a la homogeneización del aire.

Comparando entre los modelos de igual resolución espacial se ha encontrado que existen diferencias entre los modelos de la temperatura del aire para el caso de MODIS y para el caso de NOAA, dándose mejores resultados en el caso de NOAA.

6. CONCLUSIONES

La combinación de variables de Teledetección con variables geográficas ha reducido el RMSE de los modelos de la temperatura del aire. Los modelos mensuales de la temperatura del aire han sido los que han presentado una mayor mejora con la introducción de variables de Teledetección.

La TST se ha demostrado ser el predictor de Teledetección más robusto seguido por NDVI y albedo para ser introducidos en la modelización de la temperatura del aire. La TAB ha dado también buenos resultados.

Los modelos de baja resolución espacial han dado mejores resultados que los modelos de alta resolución espacial ya que las medidas de las estaciones meteorológicas son más representativas de las condiciones de la temperatura del aire que la alta resolución espacial debido a la homogeneización del aire.

7. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA

Las líneas de investigación futura estarán concentradas en el análisis de los pesos de las variables geográficas y de las variables de Teledetección en los modelos de regresión múltiple de la temperatura del aire.

Para analizar la significación de los predictores provenientes de la Teledetección en la modelización de la temperatura mensual del aire se aumentará la longitud de la serie meteorológica.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo no hubiera sido posible sin la financiación aportada por el Ministerio de Ciencia y Tecnología y fondos FEDER mediante el proyecto de investigación: “Compresión wavelet de imágenes para aplicaciones de Teledetección y SIG. 4 implicaciones en el proceso digital de imágenes” (TIC2003-08604-C04-03). También deseamos expresar nuestro agradecimiento a la Agència Catalana de l’Aigua y al Departament de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Catalunya por su política de inversión y disponibilidad de datos de Teledetección, la cual ha permitido abordar este estudio con plenas garantías. Asimismo, deseamos expresar nuestro agradecimiento a los compañeros del Departament de Geografia, del CREAM y del CCD de la UAB que han colaborado de una manera u otra en el tratamiento de las imágenes y al INTA por su atento servicio de suscripción de imágenes.

Los autores quieren también agradecer al Dr. Casanova y al Dr. Romo del LATUV de Valladolid por la cesión de las imágenes NOAA-AVHRR usadas en este artículo y al Dr. Caselles de la Universidad de Valencia por su ayuda en la corrección atmosférica de las imágenes térmicas del satélite Landsat.

BIBLIOGRAFÍA

- Cea, C., Cristóbal, J., Serra, P. y Pons, X. (2005): “Mejoras en la detección semiautomática de nubes y sombras en imágenes Landsat”, en Arbelo, M, González, A y Pérez, J. C. (Ed.) *XI Congreso Nacional de Teledetección*. Tenerife, pp. 359-362.
- Cristóbal, J., Pons, X., Serra, P. (2004): “Sobre el uso operativo de Landsat-7 ETM+ en Europa”, *Revista de Teledetección*, 21, pp. 55-59.
- Cristóbal, J., Pons, X., Ninyerola, M. (2005): “Modelling Actual Evapotranspiration in Catalonia (Spain) by means of Remote Sensing and Geographical Information Systems”, *Göttinger Geographische Abhandlungen*, 113, pp. 144-150,.
- Cristóbal, J., Ninyerola, N. y Pons, X. (2005): “Aportación de variables obtenidas mediante Teledetección a la modelización de la temperatura del aire”, en Arbelo, M, González, A y Pérez, J. C. (Ed.) *XI Congreso Nacional de Teledetección*. Tenerife, pp 295-298.
- Draper, N. y Smith, H. (1981): *Applied regression analysis, 2nd ed.* Wiley series in probability and mathematical statistics. John Wiley & Sons.
- Dubayah, R. (1992): “Estimating net solar radiation using Landsat Thematic Mapper and digital elevation data,” *Water resources research*, 28, pp. 2469-2484.

- Harrell, F. E. (2001): *Regression modeling strategies*. Springer series in Statistics. Springer
- Kneisys, F. X., Abreu, L. W., Anderson, G. P., Chetwynd, J. H., Shettle, E. P., Berk, A., Bernstein, L. S., Robertson, D. C., Acharya, P., Rothman, L. S., Selby, J. E. A., Gallery, W. O., Clough, S. A. (1995): *The MODTRAN 2/3 and LOWTRAN 7 model*. Ontar Corporation. North Andover. USA.241.60.
- Kustas, W. P. (1996): “Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces”, *Hydrological Sciences – Journal – des Sciences Hydrologiques*, 41, pp. 495-516.
- Liang, S., Strahler, A. H., Walthall, C. (1999): “Retrieval of land surface albedo from satellite observations: a simulation study”, *Journal of Applied Meteorology*, 38, pp. 712-725.
- Markham, B. L. y Barker, J. L. (1986): “Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectance and at-satellite temperatures”. *EOSAT Landsat Technical Notes*, 1, pp. 3-8.
- Ninyerola, M., Pons, X., Roure, J. M. (2000): “A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques”, *International Journal of Climatology*, 20, pp. 1823-1841.
- Ninyerola, N., Cristóbal, J., Pons, X., Pla, M., Torres, M. (2005): “Aportaciones a la modelización cartográfica del clima: influencia marítima e información de sensores remotos. Resultados preliminares”, en Arbelo, M, González, A y Pérez, J. C. (Ed.) *XI Congreso Nacional de Teledetección*. Tenerife, pp 311-314.
- Irish, R. (2003): *Landsat 7 Science Data Users Handbook*. NASA, http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html. [página visitada el día 13-10-2004].
- Palà, V. y Pons, X. (1995): “Incorporation of relief into geometric corrections based on polynomials”, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61, pp. 935-944.
- Pons, X. y Solé-Sugrañes, L. (1994): “A Simple Radiometric Correction Model to Improve Automatic Mapping of Vegetation from Multispectral Satellite Data”, *Remote Sensing of Environment*, 47, pp. 1-14.
- Pons, X. y Ninyerola, M. “Mapping a topographic global solar radiation model implemented in a GIS,” (en revisión).
- Prihodko, L. y Goward, S. N. (1997): “Estimation of air temperature from remotely sensed surface observations”, *Remote Sensing of Environment*, 60, pp. 335-346.
- Qin, Z. y Karnieli, A. (2001): “A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region”, *International Journal of Remote Sensing*, 22, 18, pp. 3719-3746.
- Recondo, C. y Pérez-Morandeira, C. S. (2002): “Obtención de la temperatura del aire en Asturias a partir de la temperatura de la superficie terrestre calculada con imágenes NOAA-AVHRR”, *Revista de Teldetección*, 17, pp. 5-12.
- Sun, Y.-J., Wang, J.-F., Zhang, R.-H., Gillies, R. R., Xule, Y., Bo, Y.-C. (2005): “Air temperature retrieval from remote sensing data based on thermodynamics”, *Theoretical and applied climatology*, 80, pp. 37-48.

- Valor, E., Caselles, V., Coll, C., Sánchez, F., Rubio, E., Sospedra, F. (2000):
“Simulation of a medium-scale-surface-temperature instrument from Thematic
Mapper data”, *International Journal of Remote Sensing*, 21, pp. 3153-3159.
- Vogt, J. V., Viau, A. A., Paquet, F. (1997) “Mapping regional air temperature fields
using satellite-derived surface skin temperatures”, *International Journal of
Climatology*, 17, pp. 1559-1579.

