

Corrección radiométrica automática de imágenes Landsat TM mediante áreas pseudoinvariantes y modelización MODTRAN

G. Moré¹, X. Pons², J. Cristóbal³, L. Pesquer¹ y O. Gonzalez²

¹ CREAF, Cerdanyola del Vallès 08193, Spain.

² Departament de Geografia. Universitat Autònoma de Barcelona. Campus de Bellaterra (UAB). Cerdanyola del Vallès 08193, Spain.

³ Geophysical Institute. University of Alaska Fairbanks. 903 Koyukuk Dr. 99775 Alaska, USA.

Resumen

Este trabajo describe una metodología para la estimación automática de los parámetros atmosféricos necesarios para la aplicación del modelo simplificado de corrección radiométrica (atmosférica y topográfica) de las bandas solares de imágenes de Teledetección. La metodología utiliza una estimación de la radiancia recibida por el sensor desde aquellas regiones donde sólo existe contribución atmosférica (L_a), así como la profundidad óptica atmosférica en áreas pseudoinvariantes (API) obtenidas con imágenes TERRA MODIS y revisadas con imágenes Landsat. Los resultados sobre 18 imágenes Landsat 5 TM muestran que las diferencias entre la reflectividad estimada y la reflectividad de referencia para 3000 API independientes son muy bajas y consistentes, variando entre -2% y $+2\%$ en reflectividad.

Palabras clave: teledetección, corrección radiométrica, áreas pseudoinvariantes, series temporales, MODIS, Landsat.

Abstract

Automatic radiometric correction of Landsat TM imagery through pseudoinvariant areas and modtran modelling

This paper describes a novel methodology to automatically estimate the atmospheric parameters needed in simplified radiometric correction model (atmospheric and topographic) of remotely sensed solar bands. The method uses the estimated radiance received by the sensor from an area where only atmospheric contribution exists (L_a), as the atmospheric optical depth (\hat{U}_0) in pseudoinvariant areas (PIA) with known reflectance values. PIA were obtained using TERRA MODIS images and were verified with Landsat imagery. Results for 18 Landsat 5 TM images show that differences between estimated reflectance and the reference value for 3000 test PIA are very low and consistent, varying from -2% to $+2\%$ in reflectance.

Keywords: remote sensing, radiometric correction, pseudoinvariant areas, time series, MODIS, Landsat.

Introducción

La liberación del archivo de imágenes Landsat del USGS (United States Geological Sur-

vey) supone, para la comunidad científica, la oportunidad de usar una gran base de imágenes de los diferentes sensores del archivo histórico de Landsat (MSS, TM y ETM+). En es-

* Autor para la correspondencia: g.more@creaf.uab.cat
Recibido: 16-03-12; Aceptado: 29-05-12

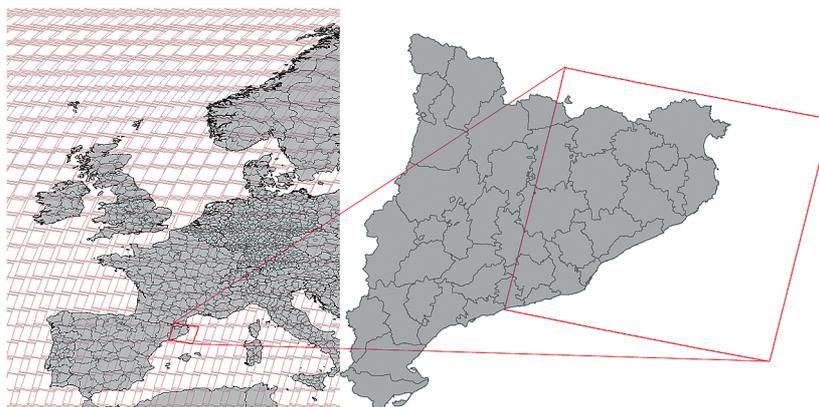


Figura 1. Localización de la zona de estudio. En la imagen de la derecha se puede apreciar el ámbito de la escena 197-031

te nuevo contexto es necesario encontrar una metodología de procesamiento que ofrezca unos resultados realistas y consistentes entre diferentes imágenes, fechas y sensores (Gutman y Justice, 2010; Gutman y Masek, 2012).

Se han propuesto diversos métodos para la corrección de imágenes de satélite para obtener valores de reflectividad (correcciones atmosférica y del relieve). Algunos de estos métodos requieren de la introducción de datos externos para modelizar algunos parámetros, como la composición atmosférica, que pueden ser difíciles de obtener, cuando no imposibles de conocer, a la hora de paso del satélite por la zona de estudio. La dificultad de aplicar estos métodos crece con el número de imágenes a procesar, y más aún en series históricas.

El uso de modelos simplificados de corrección puede ser una solución válida para obtener imágenes radiométricamente corregidas (Pons y Solé, 1994). Este modelo sólo requiere dos parámetros externos: la radiancia recibida por el sensor en un área donde solamente exista contribución atmosférica (L_a) y la profundidad óptica de la atmósfera (\hat{U}_0). Habitualmente estos parámetros los obtiene un operador humano de forma interactiva, pero la presente propuesta describe un protocolo para estimarlos automáticamente a partir del uso de áreas pseudoinvariantes (API).

A diferencia de otros trabajos donde las API se determinan de forma manual (Hadjimitsis *et al.*, 2009; Chander *et al.*, 2010), en el presente trabajo las API se detectan a partir del análisis de las series temporales de MODIS y

Landsat. La finalidad de este protocolo es doble: determinar las zonas de menor cambio radiométrico a lo largo del tiempo y establecer un valor de reflectividad de referencia para cada API.

Los objetivos de este trabajo son los siguientes: a/ Proponer una actualización del método descrito en Pons y Solé (1994) para corregir de forma automática la radiometría (atmósfera y relieve) de imágenes Landsat. b/ Describir un protocolo para obtener API a través de las series MODIS y Landsat. c/ Aplicar el protocolo automático a las series temporales de imágenes Landsat para validar su bien funcionamiento.

Zona de estudio y materiales

La zona de estudio corresponde a la escena 197-031 de Landsat según WRS-2 (Worldwide Reference System - 2) que cubre la parte oriental de Cataluña (ver figura 1).

Un total de 60 imágenes MODIS se usaron para la detección de las API. Dichas imágenes se obtuvieron a partir del servidor WIST (*Warehouse Inventory Search Tool*) y corresponde al producto MOD09 «Surface Reflectance Daily L2G Global 1 km and 500 m SIN Grid» (NASA, 2008a). Las imágenes seleccionadas se distribuyen a lo largo de los 12 meses del año, entre 2002 y 2008. Solamente se seleccionaron las imágenes sin efecto *bow-tie* (Yang y Di, 2004) y con una baja cobertura de nubes.

Adicionalmente, se seleccionaron 50 imágenes Landsat 5 TM corregidas manualmente para revisar en las API su coherencia con MODIS. En este caso, también se ha usado el criterio de la cobertura de nubes para la selección de imágenes. En ambos casos, se ha aplicado una máscara sobre las zonas cubiertas por nubes o nieves. La máscara de nubes (Cea *et al.*, 2005) se ha realizado por fotointerpretación y digitalización manual. La máscara de nieves (Cea *et al.*, 2007) se ha realizado a partir de la selección de las categorías interesantes a partir de una clasificación no supervisada utilizando todas las bandas (el resultado ha sido expandido con un *buffer* de 1000 m).

La corrección radiométrica se ha aplicado sobre una serie de 18 imágenes Landsat 5 TM adquiridas a Eurimage (Eurimage, 2008) entre el 2003 y 2009. Estas 18 imágenes cubren todos los meses del año incluyendo fechas en condiciones extremas muy cercanas al solsticio de invierno.

Metodología

A continuación se describe el modelo de corrección radiométrica simplificado así como el proceso para obtener API con imágenes MODIS y Landsat y la aplicación del algoritmo de corrección automática.

Actualización del modelo de corrección radiométrica

La metodología para corregir automáticamente (atmosférica y topográficamente) las bandas del espectro solar de Landsat se basa en la siguiente ecuación propuesta en Pons y Solé (1994):

$$\rho = \frac{\pi \cdot [L - L_a] \cdot d^2}{\cos \theta \cdot E_0 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2} \quad [1]$$

ρ : Reflectividad a nivel del suelo.

E_0 : Irradiancia solar exoatmosférica ($W \cdot m^{-2}$).

τ_1 / τ_2 : Coeficiente de transmitancia atmosférica del trayecto Sol-Tierra / Tierra-Sensor.

L_a : Radiancia recibida por el sensor de un área donde sólo existe contribución atmosférica

(por ejemplo, sombras o agua, dependiendo de la región espectral).

L : Radiancia a nivel del sensor.

θ : Ángulo de incidencia entre el zenit solar y el vector normal del terreno.

d : Distancia Sol-Tierra, en Unidades Astronómicas.

τ_1 y τ_2 eran originalmente estimadas usando estas expresiones:

$$\tau_1 = e^{\left(\frac{-\tau_0}{\cos(s)}\right)} \quad [2]$$

$$\tau_2 = e^{\left(\frac{-\tau_0}{\cos(v)}\right)} \quad [3]$$

τ_0 : Profundidad óptica atmosférica.

s : Ángulo solar zenital.

v : Ángulo entre el vector normal a un terreno llano y el vector de visión del sensor.

Todos los parámetros de las ecuaciones utilizadas se pueden conocer a partir de la imagen y sus metadatos a excepción de L_a y τ_0 . En la metodología previa al presente trabajo, los valores de τ_0 usados en la corrección eran fijos para cada banda y habían sido establecidos a partir de los datos de otros trabajos basados en parámetros de atmósferas estándar. L_a habitualmente se obtenía a partir del mínimo valor del histograma a analizar (Chavez, 1996) (véase tabla 1).

Tabla 1. Valores de τ_0 usados para Landsat 5 TM

Banda	1	2	3	4	5	7
τ_0	0.5	0.3	0.25	0.2	0.125	0.075

Búsqueda automática de valores L_a y τ_0

La asunción de que los valores τ_0 son constantes para toda la escena es muy simplificada ya que en realidad depende de múltiples factores, algunos difíciles de estimar como las condiciones atmosféricas (tipo y cantidad de aerosoles, etc.) y otras, como la altitud del terreno, que en ciertos casos pueden ser modelizadas de forma razonable.

En este trabajo los valores de L_a y τ_0 se estiman usando un método iterativo no lineal con el apoyo de los valores de referencia de las API

(el método calcula los valores de L_a y τ_0 para que la ecuación 1 tenga solución en una API a partir de su valor de reflectividad).

Para modelizar τ_0 se usó MODTRAN (Kneisys *et al.*, 1995) en distintas atmósferas estándar (US Standard 1976, MidLatitude Summer, MidLatitude Winter, SubArctic Summer, SubArctic Winter y Tropical), condiciones de altitud (de 0 a 9000 m con intervalos de 250 m) y de ángulo zenital solar (de 0 a 90° con intervalos de 1°). Para llevar a cabo las modelizaciones se usaron valores promedio de O_3 y CO_2 iguales a 0.342 y 289 atm-cm, respectivamente. Esta aproximación determina un rango de posibles valores para τ_0 para cada banda solar, evitando de este modo encontrar soluciones matemáticamente válidas para la ecuación pero demasiado alejadas de las condiciones atmosféricas posibles.

Obtención de áreas pseudoinvariantes (API)

Para la identificación de las API se usó una serie de 60 imágenes MODIS sobre la escena completa 197-031, distribuidas a lo largo de los doce meses del año y entre los años 2002 y 2008. Solamente se usaron las bandas de 1, 2, 3, 4, 6 y 7, con una resolución espacial de 500 m, descartando la banda 5 debido a que no tiene correspondencia con ninguna de las bandas de Landsat 5 TM (véase tabla 2).

Para cada píxel y cada banda se calculó la desviación estándar de todas las imágenes MODIS seleccionadas. Se calculó el valor medio

Tabla 2. Comparación del rango espectral de las bandas solares de TERRA MODIS y Landsat 5 TM. (Chander *et al.*, 2010; NASA, 2010)

Landsat 5 TM		Terra MODIS	
Banda	Rango espectral (μm)	Banda	Rango espectral (μm)
1	0.45-0.52	3	0.459-0.479
2	0.52-0.60	4	0.545-0.565
3	0.63-0.69	1	0.620-0.670
4	0.76-0.90	2	0.841-0.876
5	1.55-1.75	6	1.628-1.652
7	2.08-2.35	7	2.105-2.155

de estas seis nuevas imágenes. Este resultado corresponde al valor medio de la desviación estándar para cada píxel a lo largo de la serie temporal.

Los píxeles con una media en la desviación estándar por debajo de 1.75% se seleccionaron obteniendo así una máscara preliminar de zonas con una variación radiométrica baja a lo largo del período 2002-2008 para MODIS (véase figura 2).

La resolución espacial de la máscara obtenida es de 500 m, un valor insuficiente para trabajar con imágenes Landsat. Se verificó su coherencia con la selección de 50 imágenes Landsat corregidas manualmente y se calculó la desviación estándar de la serie temporal para cada píxel (de la escena Landsat), y también el valor medio de las desviaciones estándar de las seis bandas Landsat. Los píxeles con un promedio en la desviación estándar inferior a

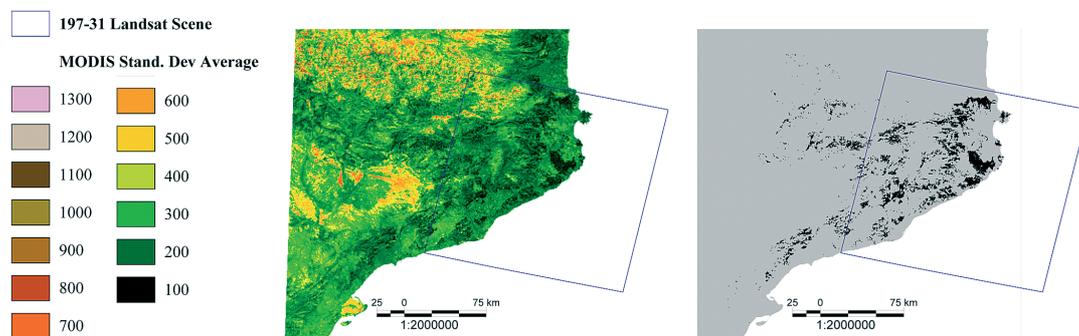


Figura 2. A la izquierda, promedio de las 6 desviaciones estándar (una para cada banda usada de MODIS). Los colores claros corresponden a zonas de alta variabilidad temporal (cultivos, zonas innivadas temporalmente, etc.) A la derecha, selección de píxeles con desviación estándar media inferior a 1.75%. Nota: las unidades de la leyenda corresponden a reflectividad, en %, multiplicada por un factor 100.

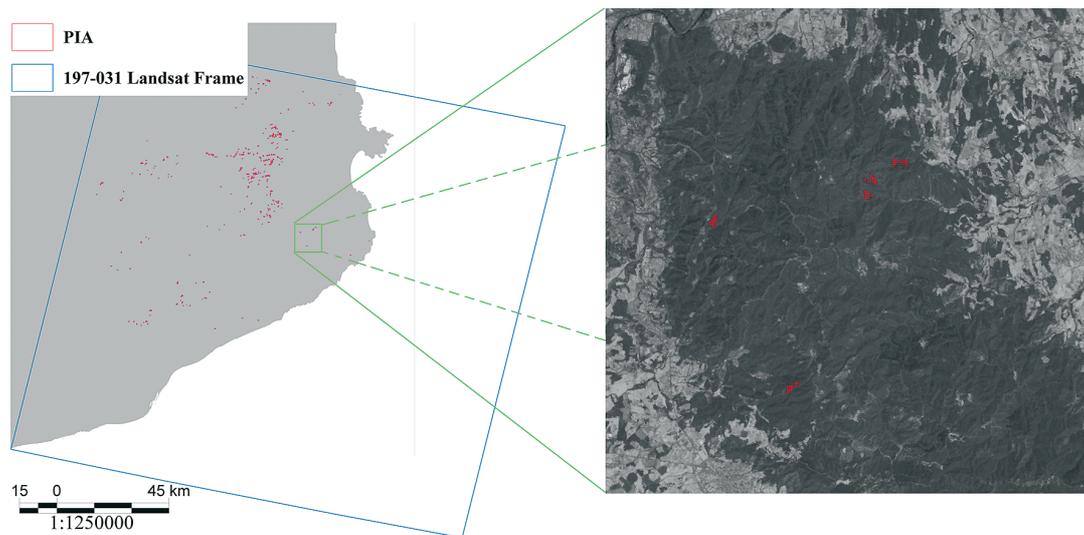


Figura 3. En rojo las API finalmente seleccionadas. La imagen de la derecha muestra una ampliación de algunas API sobre una imagen Landsat.

2% se seleccionaron como API. Estos píxeles seleccionados coincidían mayormente con bosques perennifolios y matorrales (véase figura 3). La selección de píxeles resultante se agregó para crear una matriz de polígonos con tamaño igual a 3×3 píxeles y descartando todas las API con un tamaño inferior a éste.

Dado que el número de API obtenidas fue razonablemente elevado, 4423 API se usaron para ajustar el modelo y 3000 API se reservaron para hacer un test independiente de los resultados.

Establecimiento de un valor de reflectividad en la API y aplicación del modelo

Finalmente a cada API detectada se le asignó un valor de referencia igual al valor medio de reflectividad calculado a partir de la selección de 12 imágenes Landsat 5 TM previamente corregidas de forma manual (atmosférica y topográficamente).

Las API se crean solamente una vez por escena. Un filtro heurístico se aplica a cada imagen para detectar API afectadas por nubes o cambios en las cubiertas del suelo.

El proceso automático propuesto se ha aplicado a un conjunto de 18 imágenes Landsat 5

TM de la escena 197-031. Para testear el algoritmo en distintas situaciones se han seleccionado imágenes cubriendo todos los meses del año (incluso en condiciones extremas cercanas al solsticio de invierno) del período entre 2003 y 2009.

Resultados

La Figura 4 muestra la diferencia entre la reflectividad estimada con el modelo y la reflectividad de referencia para los 3000 polígonos de test. El rango de dichas diferencias varía entre el $\pm 2\%$ en reflectividad y sin detectarse patrones temporales en las diferencias. Estos valores de variabilidad son cercanos a los valores de ruido del propio sensor (NASA, 2008b).

La mínima diferencia es 0% y aparece en la banda dos de la imagen adquirida el 07/02/2006. La diferencia máxima es de 2.11% y aparece en la banda 4 del 08/02/2006. La media de las diferencias es de -0.06% y el RMS es de 0.75%.

Para este conjunto de 18 imágenes Landsat, los valores de L_a y τ_0 se estimaron tanto de forma automática como de forma interactiva (en el caso de L_a) o con los valores fijos (por τ_0). Las diferencias en la estimación de L_a entre los dos modos son muy pequeñas, siendo la media

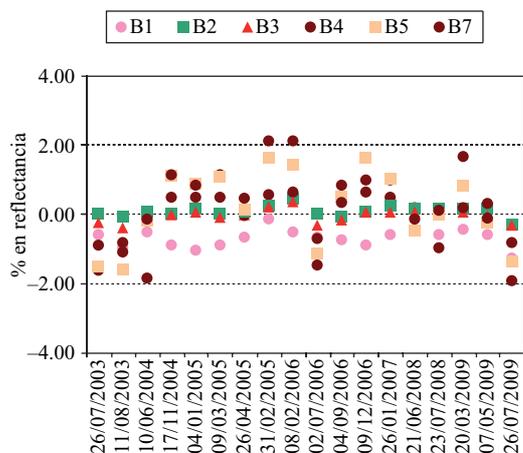


Figura 4. Diferencia absoluta por banda y fecha entre reflectividad estimada y reflectividad de referencia promedio de 3000 API de test.

de las diferencias de 0.56 DN y con una desviación estándar de 3.92 DN. Las diferencias en el caso de τ_0 son igualmente muy pequeñas y próximas a 0 (0.008) y la desviación estándar es de 0.032 en todas las bandas solares de las 18 imágenes. En este caso, la máxima diferencia es de 0.08 para la banda 1 de la imagen de 21/06/2008.

Conclusiones

El uso de modelos de corrección radiométrica (atmosférica y topográfica) simplificados puede considerarse como una útil y práctica opción para el procesamiento preliminar de las imágenes de Teledetección.

La independencia respecto a datos externos de estos modelos, permite la automatización del proceso de corrección, gracias al apoyo de API con valores de reflectividad conocidos. De este modo el método se convierte en una solución estable para corregir largas series temporales de imágenes de satélite tomadas en distintas condiciones atmosféricas y de iluminación. Actualmente se está ampliando el estudio para los sensores ETM+ y MSS y se espera confirmar su viabilidad, dada la similitud entre las diferentes configuraciones espectrales de los sensores Landsat.

La obtención de las API mediante imágenes MODIS se ha convertido en un objetivo de tra-

bajo y ha permitido encontrar suficientes polígonos para poder ajustar el modelo y reservar una parte para validar con una muestra independiente. Además, los valores de reflectividad de referencia se pueden obtener de distintas fuentes, dando flexibilidad al usuario para que se ajuste a su disponibilidad de datos a lo largo del tiempo o de otros sensores.

Los resultados demuestran que el algoritmo es aplicable a cualquier imagen de la serie Landsat TM, independientemente de la fecha y de la presencia de nubes ya que el método es capaz de detectar presencia de nubes o nieves, y cambios en el uso del suelo.

En futuros trabajos se investigará cuántas imágenes Landsat corregidas radiométricamente con el procesamiento manual son necesarias para obtener un valor de reflectividad de referencia coherente, así como la posibilidad de obtener este mismo valor a partir de imágenes MODIS.

Agradecimientos

Las sesiones de definición del Plan Nacional de Teledetección (PNT) impulsado por el IGN, y en que la Universidad de Alcalá tuvo un destacado papel, contribuyeron a generar un ambiente propicio para impulsar este trabajo, Xavier Pons es beneficiario de un ICREA Acadèmia Excellence in Research grant (2011-2015).

Referencias

- CEA, C., CRISTÓBAL, J., SERRA, P. & PONS, X. 2005. Mejora en la detección semiautomática de nubes y sombras en imágenes Landsat. En Arbelo Pérez, Manuel Imeldo [Eds] *Avances en la Observación de la Tierra. XI Congreso de Teledetección*. pp 359-362.
- CEA, C., CRISTÓBAL, J. & PONS, X. 2007. An improved methodology to map snow cover by means of Landsat and MODIS imagery. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007*. IEEE Internacional, 4217 - 4220. DOI: 10.1109/IGARSS.2007.4423984, p2037.pdf 4423781 Barcelona.
- CHANDER, G., XIONG, X., CHOI, T. & ANGAL, C. 2010. Monitoring on-orbit calibration stability of Terra MODIS and Landsat 7 ETM+ sensors using pseudo-invariant test sites. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 114, 925-939.

- CHAVEZ, P. S. 1996. Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62.9, 1025-1036.
- EURIMAGE. 2010. *Eurimage*. En internet: www.eurimage.com (accedido el 24/03/2011).
- GUTMAN, G. & JUSTICE, C. 2010. Land Cover and Land-Cover Change Products from Optical Coarse and Moderate Spatial Resolution Global Datasets. En Lacoste-Francis (eds.) [Eds] *Proc. 2010 ESA Living Planet Symposium*.
- GUTMAN, G. & MASEK, J.G. 2012. Long-term time series of the Earth's land-surface observations from space. *International Journal of Remote Sensing*, 33:15, 4700-4719.
- HADJIMITSSIS, D.G, CLAYTON, C.R.I. & RETALIS, A. 2009. The use of selected pseudo-invariant targets for the application of atmospheric correction in multi-temporal studies using satellite remotely sensed imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 11, 192-200.
- 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.
- NATIONAL AERONAUTICS & SPACE ADMINISTRATION. 2008a. *MOD09 (Surface Reflectance) User's guide*. En internet: http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_MOD09GA5.html (accedido el 24/03/2011).
- NATIONAL AERONAUTICS & SPACE ADMINISTRATION. 2008b. *Landsat hand book*. En Internet: <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov> (accedido el 24/03/2011).
- NATIONAL AERONAUTICS & SPACE ADMINISTRATION. 2010. *Landsat Missions*. En Internet: <http://landsat.usgs.gov> (accedido el 24/03/2011).
- PONS, X. & SOLÉ-SUGRAÑES, L. 1994. A Simple Radiometric Correction Model to Improve Automatic Mapping of Vegetation from Multispectral Satellite Data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 48, 191-204.