

ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN NETA DIARIA A ESCALA REGIONAL MEDIANTE IMÁGENES DE TELEDETECCIÓN Y MODELIZACIÓN SIG

J. Cristóbal (*), M. Ninyerola (**), X. Pons (*) (***) , P. Llorens (****) y R. Poyatos (*****).

(*) *Departament de Geografia, Universitat Autònoma de Barcelona, Edifici B Lletres, 08193 Cerdanyola del Vallès (Barcelona)* Jordi.Cristobal@uab.cat

(**) *Unitat de Botànica, Departament de Biologia Animal, Biologia Vegetal i Ecologia, Universitat Autònoma de Barcelona, Edifici C Biociències, 08193 Cerdanyola del Vallès (Barcelona)*

(***) *Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, Universitat Autònoma de Barcelona, Edifici C Biociències, 08193 Cerdanyola del Vallès (Barcelona).*

(****) *Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA). CSIC. Barcelona.*

(*****) *School of Biological and Biomedical Sciences, Durham University, DH1 3LE, Durham, UK.*

RESUMEN

La radiación neta (R_n) es imprescindible para el cálculo de la evapotranspiración tanto real como potencial; variables de alta importancia en el seguimiento y conocimiento de las propiedades de los ecosistemas terrestres y para el soporte a la agricultura. En el presente trabajo se ha llevado a cabo el cálculo del R_n diario en días claros a escala regional, Cataluña, mediante un conjunto de 22 imágenes Landsat (17 escenas Landsat-5 TM y 5 escenas Landsat-7 ETM+) y 171 imágenes TERRA/AQUA MODIS durante el período 2000-2007. La R_n a nivel diario se ha estimado mediante el balance entre la R_n entrante de onda larga y el balance de la R_n emitida de onda larga a partir de la estimación diaria de todas las variables que intervienen en su cálculo. Los resultados se han validado mediante un conjunto de 13 estaciones meteorológicas estándar y una área experimental ubicada en una cubierta de *Pinus sylvestris*, obteniéndose un RMSE en el mejor de los casos de $21 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ para el caso de Landsat y de $22 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ para el caso de TERRA/AQUA MODIS.

ABSTRACT

Net radiation (R_n) is an essential input variable for potential as well as actual evapotranspiration modeling. In this study we present a regional scale estimation of the daily R_n on clear days, (Catalonia, NE of the Iberian Peninsula), using a set of 22 Landsat images (17 Landsat-5 TM and 5 Landsat-7 ETM+) and 171 TERRA/AQUA images MODIS from 2000 to 2007 period. Daily R_n has been estimated through the balance among the net shortwave radiation R_n and the net longwave radiation through the daily estimation of all variables implied in its computation. Finally, models have been validated through a set of 13 ground meteorological standard stations and an experimental station placed in a Mediterranean mountain area over a *Pinus sylvestris* stand. Obtained results show a mean RMSE of $21 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ in the case of Landsat and a mean RMSE of $22 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ in the case of TERRA/AQUA MODIS, being these results in agreement with other published results, but also offering better RMSE in some cases.

Palabras clave: radiación neta, Landsat, MODIS, flujos de energía, modelización climática.

INTRODUCCIÓN

La R_n es imprescindible para el cálculo de la evapotranspiración tanto real como potencial, variables de alta importancia en el seguimiento y conocimiento de las propiedades del ecosistemas terrestres y para el apoyo a la agricultura. Se define como radiación neta (R_n), el intercambio neto entre el total de radiación de onda corta y de onda larga que se recibe y que se emite o refleja en una superficie. Este, es el balance entre la energía absorbida, reflejada y emitida por la superficie terrestre, o bien, el balance entre la radiación neta entrante de onda corta y la radiación neta emitida de onda larga. Normalmente, R_n es positiva durante el día y negativa durante la noche. Considerando todas

las componentes radiativas de onda corta y onda larga, se puede definir R_n como:

$$R_n = R_{s\downarrow} - R_{s\uparrow} + R_{l\downarrow} - R_{l\uparrow}$$

donde $R_{s\downarrow} - R_{s\uparrow}$ es la radiación neta de onda corta, $R_{l\downarrow} - R_{l\uparrow}$ es la radiación neta, o absorbida, de onda larga, $R_{s\downarrow}$ es la radiación descendente de onda corta, $R_{s\uparrow}$ es la radiación ascendente de onda corta, $R_{l\downarrow}$ es la radiación descendente de onda larga y $R_{l\uparrow}$ es la radiación ascendente de onda larga.

Hay varias aproximaciones para estimar la R_n en días nublados y en días claros, sobre todo en referencia a la radiación solar. Aún así, la mayoría de métodos para la obtención de esta variable, mediante imágenes de Teledetección están

optimizados para días claros, limitando las fechas en qué se puede llevar a término su cálculo. Además, debe tenerse en cuenta que la presencia de nubes en las imágenes de satélite imposibilita el cálculo de la R_n en los píxeles cubiertos por nubes.

Finalmente, los objetivos de este estudio serán el cálculo la radiación neta diaria (R_{nd}) a escala regional mediante imágenes Landsat TM y ETM+ y TIERRA MODIS en días claros para un periodo extenso (2000-2007) y con imágenes bien repartidas durante el año; y su validación mediante medidas de R_n de 13 estaciones meteorológicas estándar y una área experimental.

DESARROLLO TEÓRICO DEL MODELO

Actualmente, para el cálculo de la R_{nd} hay principalmente dos metodologías: la primera hace referencia al cálculo de la R_{nd} en base a la R_n instantánea, R_{ni} , (Bisht *et. al.*, 2005); mientras que, menos mencionada en la bibliografía es la estimación de la R_{nd} a partir de la estimación diaria de todas la variables que intervienen en su cálculo (Hurtado y Sobrino, 2001). La elección de una de las metodologías depende de las necesidades de los modelos dónde se introduzca como variable de entrada. Es interesante destacar que ambas metodologías ofrecen *a priori* unos resultados similares, aun así, el principal inconveniente del primer método es la necesidad de un conjunto de estaciones meteorológicas bien ubicadas espacialmente y representativas del territorio para poder hacer la conversión de la R_{ni} a la R_{nd} con unos resultados fiables, o bien para obtener un valor promedio representativo de todo el territorio. Por lo que cuando no se dispone de esta red de estaciones, el segundo método es el más operativo.

Radiación neta de onda corta diaria ($R_{S\downarrow} - R_{S\uparrow}$)

La radiación neta de onda corta se puede aproximar de la siguiente manera:

$$R_{S\downarrow} - R_{S\uparrow} = R_{Sd\downarrow} (1 - \alpha)$$

donde $R_{Sd\downarrow}$ es la radiación de onda corta incidente ($W\ m^{-2}$ o $MJ\ m^{-2}$) para un periodo diario que se puede aproximar a partir de la radiación solar y α el albedo. Ambas variables están situadas entre el rango espectral de 0.3 a 3 μm .

Radiación descendente de onda larga diaria ($R_{L\downarrow}$)

El cálculo de la $R_{L\downarrow}$ se ha llevado a cabo mediante la metodología propuesta por Dillely y O'Brien (1998) que según los autores presenta un RMSE de 5 $W\ m^{-2}$ y un R^2 de 0.99.

$$R_{L\downarrow} = \alpha + \beta \left(\frac{T_a}{T^*} \right)^6 + \gamma \sqrt{\frac{w}{w^*}}$$

donde α , β y γ son iguales a 59.38, 113.7 y 96.96, respectivamente; w es el vapor de agua expresado en $kg\ m^{-2}$, T^* es igual a 273.16 K, w^* es igual a 25 $kg\ m^{-2}$ y T_a es la temperatura media del aire diaria.

Radiación ascendente de onda larga diaria ($R_{L\uparrow}$)

Para calcular $R_{L\uparrow}$ se ha usado una de las metodologías más ampliamente usadas su cálculo propuesta por Lagouarde y Brunet (1993) según la cual:

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon R$$

donde ε es la emisividad terrestre y R se define como:

$$R = \sigma \int_0^\tau \left[T_{amin} + \alpha \Delta T \sin\left(\frac{\pi t}{D}\right) \right]^4 dt$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8}\ W\ K^{-4}\ m^{-2}\ dia^{-1}$), ΔT es la diferencia entre la temperatura de la superficie terrestre (TST) y la T_a a la hora de paso del satélite, t , (ambas en K) $T_{a\ min}$ es la temperatura mínima del aire (K), $\alpha = 1.13$, D es la diferencia horaria entre la puesta del Sol y el alba; y $\tau = 24$.

MATERIAL Y ÁREA DE ESTUDIO

Para llevar a término la modelización de la R_{nd} se usarán 17 imágenes Landsat-5 TM para el periodo 2003-2007, 5 imágenes Landsat-7 ETM+ para el periodo 2002-2003, 171 imágenes TIERRA MODIS para el periodo 2000-2007 y 107 imágenes AQUA MODIS para el periodo 2003-2007. Todas las imágenes han sido seleccionadas en días claros intentando cubrir todos los meses del año para modelizar la mayoría de situaciones posibles.

Los datos meteorológicos para llevar a cabo la modelización de la temperatura del aire y parte de la validación de la R_{nd} se han descargado de la web de *Servei Meteorològic de Catalunya SMC*.

Las imágenes TERRA/AQUA MODIS se han descargado del EOS Gateway (<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>). Se han seleccionado tres productos que contienen las variables necesarias para llevar a cabo este trabajo: el producto diario de reflectancias (MOD09), el producto diario de vapor de agua (MOD05_L2) y el producto diario de TST y emisividades (MOD11A1).

El ámbito geográfico del área de estudio corresponde a la comunidad autónoma de Cataluña con una superficie aproximada de 32 000 km².

CÁLCULO DE LAS VARIABLES IMPLICADAS EN EL MODELO

Procesamiento general de las imágenes

Las imágenes Landsat-5 TM y Landsat-7 ETM+ han sido corregidas geométricamente, a una resolución espacial de 100 m, mediante el uso de un MDE obteniéndose un RMSE inferior a un píxel de 30m (Palà y Pons, 1995) y radiométricamente (Pons y Solé-Sugrañes, 1994). Las imágenes TERRA/AQUA MODIS se han reproyectado al sistema de coordenadas UTM-31N a una resolución espacial de 1 km.

Albedo (α)

Se ha calculado mediante el método de Liang (2001), que implica la suma ponderada de los canales del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio, al ofrecer este la posibilidad de calcular el albedo tanto para Landsat-5 TM como para Landsat-7 ETM+; y en el caso de las imágenes de TIERRA/AQUA MODIS mediante la metodología de Liang *et al.* (1999).

Radiación solar diaria (R_{sd1}):

Para obtener la R_{sd1} se ha usado la metodología propuesta por Pons y Ninyerola (2008). Esta metodología se basa en el cálculo de la R_{sd1} potencial (calculada en condiciones atmosféricas constantes) obtenida mediante un modelo computacional que utiliza un MDE e información astronómica en un entorno SIG.

Emisividad terrestre (ϵ)

Para calcular ϵ se ha usado la metodología propuesta por Sobrino y Raissouni (2000) en la que se establecen umbrales de NDVI entre píxeles de suelo desnudo, píxeles completamente recubiertos de vegetación y píxeles compuestos de sol y vegetación (píxeles mixtos).

Temperatura de la superficie terrestre (TST)

La obtención de la TST en el caso de las imágenes Landsat se ha llevado a cabo mediante la metodología propuesta por Cristóbal *et al.* (2009) la cual está sustentada en la ecuación de transferencia radiativa. Su principal ventaja es la no dependencia de radiosondeos para la determinación de la TST. La metodología está pensada para la obtención de la TST en condiciones globales usando en el desarrollo de su algoritmo la base de radiosondeos TIGR-TOVS, representativa de la mayoría de condiciones atmosféricas a escala global. El algoritmo está

diseñado para un rango de vapor de agua de 0 a 8 g·cm⁻², más que suficiente en las condiciones habituales en España. En el caso de TERRA/AQUA MODIS se ha usado el producto de la TST (MOD11A1).

Temperatura del aire (T_a)

La temperatura instantánea, media y mínima del aire se han calculado mediante técnicas de regresión múltiple y de interpolación espacial de los datos provenientes de las estaciones meteorológicas con la metodología propuesta por Cristóbal *et al.* (2008) obteniéndose un RMSE típico de entre 1.7, 1 y 1.7 K, respectivamente.

RESULTADOS

Áreas de validación y estimadores del error

Para llevar a cabo la validación del modelo se han seleccionado dos tipos de áreas de validación. La primera se corresponde a la red de estaciones agrometeorológicas del SMC, de la cual se han seleccionado un total de 12 estaciones ubicadas en diferentes zonas agrícolas de Cataluña, y la segunda se corresponde al área experimental de Vallcebre, ubicada en una zona submediterránea del prepirineo catalán (Gallart *et al.*, 2002) la cual dispone de una parcela ubicada en una cubierta de *Pinus sylvestris* homogénea para realizar la validación.

Para llevar a cabo la validación del modelo de R_{nd} se han calculado tres estimadores del error: *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Bias Error* (MBE) y el coeficiente de determinación (R^2).

Validación de la R_{nd} : estaciones agrometeorológicas

La tabla 1 muestra los resultados de la validación del modelo de R_{nd} usando imágenes Landsat y TERRA/AQUA MODIS. Como se puede observar, los mejores resultados se obtienen en el caso de la modelización con datos Landsat obteniéndose un RMSE promedio de 22 W m⁻², resultados muy similares a los obtenidos en la bibliografía. En el caso de TERRA/AQUA los resultados obtenidos presentan un RMSE alto de 72 y 82 W m⁻², respectivamente. En ambos casos el R^2 presenta unos valores más bajos de lo que se esperaría, sobretodo en el caso de Landsat, de 0.23. Estos resultados se pueden explicar por la alta heterogeneidad de las áreas donde se encuentran las estaciones meteorológicas respecto a un píxel de 120 m y, especialmente de 1000m como es el caso de TERRA/AQUA MODIS.

Tabla 1.- Promedio de los estimadores del error en función de las estaciones meteorológicas (n estaciones) y de los días claros seleccionados (n días) durante el periodo 2000-2007 para las estaciones agrometeorológicas. Las unidades del RMSE y del MBE en $W m^{-2}$.

	Landsat	TERRA	AQUA
RMSE	22	72	82
R ²	0.23	0.16	0.14
MBE	9	-65	-75
n estaciones	6	11.8	
n días	22	171	

Validación de la R_{nd}: parcela experimental forestal

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos en el caso de la validación en la parcela forestal de *Pinus sylvestris*, que como en el caso anterior son muy similares si bien mejores que los mencionados en la bibliografía. A diferencia del caso anterior, los resultados son similares para los tres satélites, de aproximadamente $21 W m^{-2}$, presentando un R² elevado, de 0.97 para el caso de Landsat y de aproximadamente 0.74 para TERRA/AQUA MODIS. En este caso la parcela de estudio sobre una cubierta de *Pinus sylvestris*, es representativa de un píxel de 120m y aunque no lo es de un píxel de 1000m, el hecho de ser el área eminentemente forestal hace que los resultados obtenidos sean más representativos que en el caso de la validación con las estaciones agrometeorológicas.

Tabla 2.- Promedio de los estimadores del error en función de los días claros seleccionados (n días) durante el periodo 2003-2005 para la parcela experimental de *Pinus sylvestris*. Las unidades del RMSE y del MBE en $W m^{-2}$.

	Landsat	TERRA	AQUA
RMSE	21	21.4	22
R ²	0.97	0.76	0.73
MBE	-12	2.6	0.5
n días	12	31	27

CONCLUSIONES

La validación de los modelos de R_{nd} obtenidos, con un RMSE de aproximadamente $21 W m^{-2}$ para Landsat y TERRA/AQUA, están consonancia, si bien mejoran, los errores mencionados en la bibliografía. Esto hace posible su introducción como variable de entrada en modelos más complejos como la modelización de la evapotranspiración real así como otros flujos de energía a escala regional. La modelización SIG de las variables meteorológicas y el procesado la banda

térmica han demostrado ser de gran utilidad para la estimación de esta variable tan compleja.

Finalmente, hay que tener en cuenta que el tamaño de la parcela es esencial para validar los modelos, especialmente en zona agrícolas con elevada heterogeneidad.

BIBLIOGRAFÍA

- Bisht, G., Venturini, V., Islam, S. y Jiang, L. 2005. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. *Remote Sens. Environ.*, 97: 52-67.
- Cristóbal, J., M. Ninyerola y X. Pons. 2008. Modeling air temperature through a combination of Remote Sensing and GIS data, *J. Geophys. Res.*, 113 D13106.
- Cristóbal, J., Jiménez-Muñoz, J. C.; Sobrino, J. A.; Ninyerola, M. y Pons, X. 2009. Improvements in land surface temperature retrieval from the landsat series thermal band using water vapour and air temperature. *J. Geophys. Res.* (en prensa).
- Dilley A. C. y D. M.O'Brien. 1998. Estimating downward clear sky long-wave irradiance at the surface from screen temperature and precipitable water. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 124: 1391-1401.
- Gallart, F., P. Llorens, J. Latron y D. Regüés. 2002. Hydrological Processes and their seasonal controls in a small Mediterranean mountain catchment in the Pyrenees. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 6: 527-537.
- Hurtado E. y J. A. Sobrino. 2001. Daily net radiation estimated from air temperature and NOAA-AVHRR data: a case study for the Iberian Peninsula. *Int. J. Remote Sens.*, 8, no. 20: 1521-33.
- Liang, S., A. H. Strahler y C. Walthall. 1999. Retrieval of land surface albedo from satellite observations: a simulation study, *Journal Appl. Meteorol.*, 38: 712-725.
- Lagouarde, J. P. y Brunet, Y. 1983. A simple model for estimating the daily upward longwave surface radiation flux from NOAA-AVHRR data, *Int. J. Remote Sens.*, 14, no. 5: 907-925.
- Liang, S. 2001. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo, *Remote Sensing Environment*, 76: 213-238.
- Sobrino, J. A. y N. Raissouni. 2000. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco, *Int. J. Remote Sensing*, 21, no. 2: 353-366.