

## COMPARACIÓN DE MODELOS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN NETA DIARIA CON IMÁGENES DE SATÉLITE

Carmona, F.<sup>1,3</sup>; Rivas, R.<sup>1,4</sup>, Caselles, V.<sup>2</sup> y Ocampo, D.<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Hidrología de Llanuras *Dr. Eduardo J. Usunoff*, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Pinto 399, 7000 Tandil, Argentina.

<sup>2</sup> Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica, Universidad de Valencia, Dr. Moliner 50, Burjassot, Valencia 46100, España.

<sup>3</sup> Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina (ANPCyT);

<sup>4</sup> Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CICPBA).

[facundo.carmona@rec.unicen.edu.ar](mailto:facundo.carmona@rec.unicen.edu.ar)

### RESUMEN

La radiación neta es una medida de la energía disponible a nivel de terreno, su estudio es de gran importancia para el cálculo de la evapotranspiración y otros procesos físicos y biológicos. En general no se disponen de medidas directas, y cuando se disponen éstas se limitan a estudios locales. Para estimar la radiación neta en una región, y conocer su variación espacial, se recurre a datos de satélite. En este trabajo se estima la radiación neta instantánea con satélite y se evalúa una serie de modelos para obtener valores diarios. Se utilizan datos locales registrados en la región pampeña argentina e información de los sensores Thematic Mapper (TM) y Enhanced Thematic Mapper (ETM+). Los resultados muestran que el modelo de [Rivas y Carmona \(2011\)](#) es el que presenta mejor funcionamiento en la zona de aplicación, con errores inferiores a los  $10 \text{ W m}^{-2}$ .

**Palabras clave:** radiación neta, satélite, datos meteorológicos, modelos empíricos.

### INTRODUCCION

La Radiación neta ( $R_n$ ) es la suma de todas las contribuciones de radiación de onda corta y larga que entran y salen de la superficie. Su estudio es de gran importancia, dado que es el parámetro de entrada en el cálculo de la evapotranspiración de referencia y es la variable principal que controla variados procesos físicos y biológicos a nivel de superficie ([Rosenberg et al., 1983](#)).

Generalmente, no se dispone de datos de  $R_n$  debido a limitaciones económicas y técnicas asociadas con la medida directa. Cuando se dispone de datos de  $R_n$ , usualmente se limitan a pequeñas áreas y no representan las variaciones espaciales ([Samani et al., 2007](#)). Es por ello que, algunos investigadores han estudiado su estimación tanto a escala local como regional (por ej. [Bisht et al., 2005](#); [Wang y Liang, 2008](#); [Kjaersgaard y Cuenca, 2009](#)). En el primer caso, se hace utilizando datos disponibles en estaciones meteorológicas, mientras que en segundo lugar se incorporan datos de satélite capaces de modelar las variaciones espaciales a través del albedo, la proporción de vegetación y la temperatura de superficie, principalmente, estimados píxel a píxel.

A escala regional, es importante considerar que las imágenes de satélite proveen datos instantáneos, siendo que en la generalidad de los casos se requiere contar con magnitudes diarias, con lo cual deben obtenerse relaciones para convertir la  $R_n$  instantánea a valores diarios.

Es por ello que, el objetivo del presente trabajo es estimar la radiación neta instantánea con datos de satélite y evaluar una serie de modelos para obtener valores diarios. Se utilizan datos locales registrados por una estación de Balance de Energía en la región pampeana, Argentina, y datos de satélite de los sensores Thematic Mapper (TM) y Enhanced Thematic Mapper (ETM+), misión Landsat.

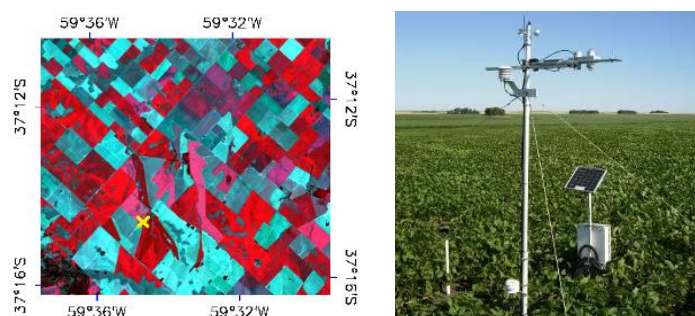
## MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1- Sitio experimental y datos utilizados

El estudio se desarrolló con datos locales registrados por una estación de Balance de Energía (EBE) en la región pampeana subhúmeda-húmeda (37° 14' S, 59° 34' O, 235 m) e imágenes de satélite (Figura 1). La región se caracteriza por tener un clima templado y húmedo, con una temperatura promedio anual de 14,2 °C, una temperatura mensual máxima de 21,6 °C, en el mes de enero, y mínima cercana a los 8 °C en los meses más fríos del año (junio, julio y agosto). La precipitación media anual es de alrededor de los 950 mm (Estación Tandil de la Red Meteorológica Nacional Argentina: 37° 14' S, 59° 15' O, 175 m) y las lluvias se registran en cualquier época del año, siendo más frecuentes en otoño y primavera. Además, los promedios anuales de la humedad relativa, radiación solar y velocidad de viento son de 83 %, 186 W m<sup>-2</sup> y 2,6 m s<sup>-1</sup>, respectivamente (Rivas y Caselles, 2004; Rivas y Carmona, 2011).

A escala local, la  $Rn$  se registró con un radiómetro neto CNR1 (Kipp y Zonen), la temperatura de superficie con un sensor de alta precisión IRR-P 1505 (Apogee Instruments, Inc.), y las variables de temperatura/humedad relativa del aire con un equipo integrado CS215-L16 (Campbell Scientific, Inc.). Los instrumentos se instalaron a 2 m de altura sobre la superficie y los datos se guardaron en un datalogger CR10X (Campbell Scientific, Inc.).

Se utilizaron un total de cinco imágenes de satélite, una de ellas captada por el sensor TM (22/01/2010) y las cuatro restantes por el sensor ETM+ (29/12/2009, 14/01/2010, 20/04/2010 y 06/05/2010) de la misión Landsat (escena 225-86 del *World-wide Reference System*). En las primeras tres fechas la estación estaba instalada sobre un cultivo de soja, y en las últimas dos sobre su rastrojo.



**Figura 1.** Composición falso color compuesto del área de estudio (izquierda) y estación de balance de energía (derecha). La cruz en la figura izquierda indica la posición de la estación.

### 2.2- Estimación de la radiación neta instantánea

La radiación neta instantánea,  $Rn_i$ , se estimó a partir de la ecuación:

$$Rn_i = (1 - \alpha)Rs_{\downarrow i} + Rl_{\downarrow i} + \varepsilon_s \sigma T_{Si}^4 - (1 - \varepsilon_s)Rl_{\downarrow i} \quad (1)$$

donde  $Rs_{\downarrow i}$  es la radiación solar instantánea (W m<sup>-2</sup>),  $\alpha$  es el albedo de la superficie,  $\varepsilon_s$  la emisividad de superficie,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann (W m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>),  $T_{Si}$  es la temperatura de superficie (K), y  $Rl_{\downarrow i}$  es la radiación de onda larga descendente (W m<sup>-2</sup>).

Las variables  $\alpha$ ,  $\varepsilon_s$  y  $T_{Si}$  se obtuvieron desde información de satélite (ver Rivas y Carmona 2011) y  $Rs_{\downarrow i}$  a partir de ecuaciones (ver Carmona, 2012). La  $Rl_{\downarrow i}$  se determinó a partir de parámetros calculados con datos locales de temperatura y humedad relativa del aire,  $Ta_i$  (K) y  $HR_i$ , siendo:

$$Rl_{\downarrow i} = \varepsilon_a \sigma Ta_i^4 = (\alpha_0 + \alpha_1 Ta_i + \alpha_2 HR_i) \sigma Ta_i^4 \quad (2)$$

siendo  $\alpha_0$  igual a  $-8,8 \cdot 10^{-1}$ ,  $\alpha_1$  igual a  $5,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$   $\alpha_2$  igual a  $2,02 \cdot 10^{-3} \text{ \%}^{-1}$ , según el modelo propuesto en Carmona (2012).

### 2.3- Estimación de la radiación neta diaria

Los valores de la radiación neta diaria,  $Rn_d$ , se obtuvieron a partir de los modelos propuestos en los trabajos de [Seguin e Itier \(1983\)](#), [Samani et al. \(2005\)](#), [Samani et al. \(2007\)](#) y [Rivas y Carmona \(2011\)](#). Las ecuaciones utilizadas se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Modelos utilizados para obtener la  $Rn_d$  a partir de la instantánea de satélite con cielo despejado.

Autor/es del Modelo	Abreviación	Ecuación
Seguin e Itier (1983)	SI83	$\left[ \frac{Rn_d}{Rn_i} \right] = 0,30 \pm 0,03$
Samani et al. (2005)	S05	$\left[ \frac{Rn_d}{Rn_i} \right] = \left[ \frac{Rs_d}{Rs_i} \right]$
Samani et al. (2007)	S07	$\left[ \frac{Rn_d}{Rn_i} \right] = \left[ \frac{Rs_d}{Rs_i} \right] \left( \frac{Ta_d}{Ta_i} \right)^4$
Rivas y Carmona (2011)	RC11	$Rn_d = Rn_i 0,43 - 54$

## RESULTADOS

A partir de las ecuaciones 1 y 2 se obtuvieron los mapas de radiación neta instantánea para las cinco imágenes de satélite utilizadas. En la Tabla 2 se presentan los resultados de los valores de  $Rn_i$  estimados ( $Rn_{i\_satélite}$ ) y medidos con el radiómetro CNR1 ( $Rn_{i\_CNR1}$ ). Los valores de  $Rn_{i\_satélite}$  corresponden al promedio de una región de interés de 2 ha, tomando el área circundante de la EBE.

**Tabla 2.** Comparación de los valores de radiación neta instantánea medida y estimada con satélite.

Fecha	Sensor	$Rn_{i\_CNR1} (W m^{-2})$	$Rn_{i\_satélite} (W m^{-2})$	DIF. ( $W m^{-2}$ )	% DIF.
29/12/2009	ETM+	685	691	6	1
14/01/2010	ETM+	615	625	10	2
22/01/2010	TM	586	577	-9	-1
20/04/2010	ETM+	275	280	5	2
06/05/2010	ETM+	219	210	-9	-4
<b>BIAS</b>				<b>1</b>	<b>0</b>
<b>RMSE</b>				<b>8</b>	<b>2</b>

Tal como puede observarse al comparar valores medidos y estimados, las ecuaciones 1 y 2 muestran gran capacidad para obtener la  $Rn_i$  con satélite, con un  $RMSE$  de  $9 W m^{-2}$  y prácticamente sin sesgo o desviación del error ( $BIAS$ ,  $1 W m^{-2}$ ). Estos resultados adquieren mayor relevancia dado que, para el cálculo, se requiere contar con datos locales de temperatura y humedad relativa del aire, disponibles en cualquier estación meteorológica.

A continuación, a partir de los mapas de  $Rn_i$  se generaron los mapas de  $Rn_d$  considerando los cuatro modelos presentados en la Tabla 1. En este caso, dos fechas no se consideraron por la presencia de nubosidad durante el día. En la Tabla 3, se presentan los resultados de los valores de  $Rn_d$  estimados ( $Rn_{d\_modelo}$ ) y medidos con el radiómetro CNR1 ( $Rn_{d\_CNR1}$ ).

**Tabla 3.** Valores de radiación neta diaria medida y estimada a partir de los cuatro modelos considerados.

Fecha	CNR1 ( $W m^{-2}$ )		SI83 ( $W m^{-2}$ )		S05 ( $W m^{-2}$ )		S07 ( $W m^{-2}$ )		RC11 ( $W m^{-2}$ )	
	$Rn_{d\_CNR1}$		$Rn_{d\_SI83}$	DIF.	$Rn_{d\_S05}$	DIF.	$Rn_{d\_S07}$	DIF.	$Rn_{d\_RC11}$	DIF.
14/01/2010	211		188	-24	267	56	252	41	215	4
22/01/2010	202		173	-29	240	38	235	33	194	-8
06/05/2010	44		63	19	77	33	76	32	36	-8
<b>BIAS</b>				<b>-11</b>	<b>42</b>	<b>35</b>	<b>-4</b>			
<b>RMSE</b>				<b>24</b>	<b>43</b>	<b>35</b>	<b>7</b>			

Los resultados muestran que el modelo presentado por [Rivas y Carmona \(2011\)](#) es el que mejor funcionamiento presenta, con valores de  $RMSE$  y  $BIAS$  de  $7 W m^{-2}$  y  $-4 W m^{-2}$ .

A partir de dicho modelo, en la Figura 2 se muestran los mapas de  $Rn_d$  elaborados.

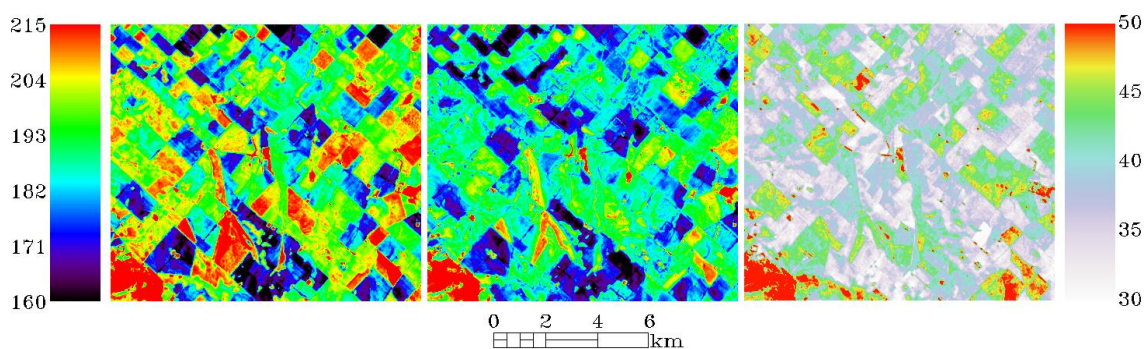


Figura 2. Mapas de  $Rn_d$  ( $W m^{-2}$ ) para las fechas (a) 14/01/2010, (b) 22/01/2010 y (c) 06/05/2010.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una alternativa para la estimación de la radiación neta diaria a partir de datos de satélite e información meteorológica. Los resultados, en comparación con los métodos clásicos, muestran que la mejor combinación para la estimación de la radiación neta es: *i*) calcular los valores instantáneos de radiación de onda larga descendente a partir de medidas de temperatura y humedad del aire instantáneas; y *ii*) calcular la radiación neta diaria como función lineal de la radiación neta instantánea.

Utilizando la combinación de ecuaciones propuestas en este trabajo puede calcularse la radiación neta diaria para cualquier momento del año, hecho que hasta el momento no consideran los modelos existentes.

## AGRADECIMIENTOS

El trabajo fue realizado gracias a fondos otorgados por la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires, la Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires y la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina (PRH N° 0032 UNCPBA - ANPCyT).

## REFERENCIAS

- Bisht, G., Venturini, V., Islam, S., Jiang, L., 2005. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. *Remote Sensing of Environment*, 97, 52-67.
- Carmona, F., 2012. Estimación de la radiación atmosférica descendente a partir de datos meteorológicos. Tesis de Máster, Universidad de Valencia, Valencia 46100, Burjassot, España. 54 pp.
- Kjaersgaard, J. H., Cuenca, R.H., 2009. Comparison of the performance of net radiation calculation models. *Theor. Appl. Climatol.*, 98(1-2), 57-66.
- Rivas, R. y Carmona, F. 2011. Evapotranspiration in the Pampean Region using field measurements and satellite data. *Physics and Chemistry of the Earth*, Elsevier, Special Issue: Remote Sensing – Hafeez, doi:10.1016/j.pce.2010.12.002.
- Rivas, R., Caselles, V., 2004. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing-based surface temperature and local meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, 93:68-76.
- Rosenberg, N. J., Blad, B. L., Verma, S. B., 1983. *Microclimate - The biological environment*, Wiley, New York.
- Samani, Z., Bawazir, A.S., Bleiweiss, M., Skaaggs, R., Tran, V.D., 2007. Estimating Daily Net Radiation over Vegetation Canopy through Remote Sensing and Climatic Data. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 133(4), 291-297.
- Samani, Z., Nolin, S., Bleiweiss, M., and Skaggs, R. 2005. "Discussion of Predicting Daily Net Radiation Using Minimum Climatological Data." *J. Irrig. Drain. Eng.*, 131(4), 388-389.
- Seguin, B., Itier, B., 1983. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *Int. J. Remote Sens.*, 4, 371-383.
- Wang, K., Liang, S., 2008. Estimation of Daytime Net Radiation from Shortwave Radiation Measurements and Meteorological Observations. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48, 634-643.