

# Un modelo lineal para estimar radiación solar global en la provincia de Córdoba a partir de datos satelitales CERES\_SYN1

Miguel Nolasco<sup>1</sup>, Silvina Sayago<sup>1</sup> y Mónica Bocco<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba  
mbocco@gmail.com

**Resumen.** La radiación solar es la principal fuente de energía del planeta. En cultivos agrícolas una estimación precisa de esta variable es importante para muchos modelos de crecimiento, que estiman necesidades de riego y rendimiento potencial, entre otros. En Argentina, particularmente en las regiones agrícolas, se carece de registros de radiación. En este contexto, los productos generados a partir de la teledetección proveen datos con continuidad temporal y homogeneidad espacial. El objetivo del presente trabajo fue comparar y evaluar la radiación solar registrada en distintas estaciones meteorológicas de la provincia de Córdoba (Argentina), con la obtenida del producto CERES\_SYN1 y así obtener un modelo lineal de ajuste de los datos satelitales para su estimación. Los resultados obtenidos mostraron una excelente adecuación del satélite a los registros, con valores de  $R^2$  entre 0,95 y 0,97, lo cual permite concluir que, para Córdoba, los datos provenientes de CERES\_SYN1 son buenos estimadores de la radiación solar.

**Palabras clave:** producto CERES\_SYN1, regresión, validación.

## 1 Introducción

La radiación solar, principal fuente de energía del planeta, es una variable fundamental para el desarrollo de la vida. Desde el punto de vista ecofisiológico, la radiación que intercepta una planta le permite realizar procesos como fotosíntesis, evapotranspiración, etc. En cultivos agrícolas con condiciones óptimas de agua y nutrientes, la productividad, en términos de tasa de crecimiento, puede ser analizada a partir de la radiación solar interceptada y la eficiencia en el uso de ésta [1]. Por esto, una estimación precisa de la radiación solar global es una entrada importante para muchos modelos de crecimiento de cultivos, los cuales están basados principalmente en procesos fotosintéticos y usan radiación y su conversión en energía química para determinar necesidades de riego y rendimiento potencial [2].

La medición de la radiación solar requiere de equipamientos que, además de sus costos, demandan mantenimiento permanente, por lo que esta variable meteorológica cuenta con muy pocos registros en comparación con la temperatura y la precipitación [3]. En Argentina, los datos de radiación solar medidos no se encuentran centralizados en una única base de datos, además existe una carencia de registros, particularmente en

las regiones agrícolas, lo que obliga frecuentemente a tener que estimarla [4]. Existen numerosos modelos empíricos y estocásticos, de redes neuronales, entre otros, que estiman la radiación solar a partir de las variables de registro más frecuentes, como temperatura, precipitación, humedad relativa, velocidad y dirección del viento [5].

Como las mediciones de radiación solar son, en general, espacial y temporalmente insuficientes para muchas aplicaciones, los productos generados a partir de la teledetección se constituyen en una forma de obtener datos con la continuidad temporal y homogeneidad espacial requerida [6]. En particular, el instrumento Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) de NASA, que proporciona observaciones globales de la energía radiante reflejada y emitida por la Tierra es una herramienta ampliamente utilizada en la estimación de datos de radiación [7].

En este sentido en [2] se comparan valores mensuales de radiación global medidos con los provistos por CERES, para 232 estaciones meteorológicas en España. En Argentina, [3] obtuvieron muy buenas correlaciones entre la radiación solar estimada por diferentes modelos empíricos y la obtenida a partir de CERES para distintas estaciones meteorológicas. En [8] obtuvieron una buena correlación entre la radiación solar registrada en la Estación Experimental Agropecuaria Manfredi (Córdoba) y la proveniente del producto CERES.

En particular la variante CERES Synoptic (CERES\_SYN1), que está diseñada para su aplicación en estudios de clima y de energía superficial, ha sido utilizada por [9] para validar dos estimaciones de componentes de flujo de radiación. Con este mismo producto, [10] estimaron radiación de onda corta en el Ártico. Para Argentina, [11] desarrollaron un Atlas de Radiación Solar, a partir de CERES\_SYN1 y obtuvieron una muy buena correlación con los datos medidos en cinco estaciones meteorológicas localizadas en la Patagonia y la provincia de Buenos Aires.

El objetivo del presente trabajo fue comparar y evaluar la radiación solar registrada en distintas estaciones meteorológicas de la provincia de Córdoba (Argentina) con la obtenida del producto CERES\_SYN1 y así obtener un modelo lineal de ajuste de los datos satelitales para su estimación.

## **2 Materiales y Métodos**

### **2.1 Región de estudio**

Las actividades agrícolas y ganaderas constituyen la actividad económica principal de la provincia de Córdoba [12]. Este trabajo fue realizado con datos de las localidades de Coronel Moldes, General Baldissera, Montecristo, Porteña y Villa del Totoral, las que fueron seleccionadas, de modo de poder cubrir toda el área de producción agropecuaria.

En cuanto al clima, a nivel provincial es de carácter templado. Las temperaturas estivales superan los 26°C y las mínimas, en invierno, se encuentran alrededor de los

8°C. La amplitud térmica no supera los 16°C. La precipitación anual refleja un gradiente de más de 900mm al este, y menos de 600 al Oeste. En el área de estudio el relieve está constituido por llanuras [13].

## 2.2 Datos de radiación en superficie

Se utilizaron datos de radiación solar de cinco estaciones meteorológicas ubicadas en la provincia de Córdoba (Figura 1). Las mismas pertenecen a la red de estaciones meteorológicas de la Bolsa de Cereales de Córdoba, y entre otros datos, registran radiación solar a intervalos de 10 minutos. Los valores fueron descargados del Sistema de Integración y Validación de Información Meteorológica, perteneciente al Ministerio de Agroindustria de la Nación (<http://sivimet.magyp.gob.ar/GISWEB/>). A partir de estos se calcularon los valores diarios de radiación ( $Wm^{-2}$ ) para el periodo 01/01/2016 (día 1)–31/07/2017 (día 577).



**Fig. 1.** Ubicación de las estaciones meteorológicas empleadas en este trabajo (realizado a partir del mapa satelital de Córdoba de IGN).

### 2.3 Datos satelitales

En este estudio se utilizaron flujos diarios, superficiales, en dirección descendente de radiación de onda corta (Shortwave Down Flux), correspondientes al conjunto de datos Ed4A CERES\_SYN1deg\_Day (en lo sucesivo, simplemente CERES\_SYN1), para todas las condiciones de cielo (All-sky) [14]. Los datos CERES\_SYN1 fueron obtenidos, en el formato netCDF, desde la página web del instrumento CERES de la NASA (<https://ceres-tool.larc.nasa.gov>). Para la Edición4 (Ed4A) están disponibles cinco resoluciones temporales (mensual, promedio horario mensual, diaria, promedio de 3 horas, y promedio de una hora) en una grilla global de 1° x 1° de latitud/longitud.

Los valores diarios de la serie histórica del producto CERES\_SYN1, para los pixeles correspondientes a cada estación meteorológica, fueron extraídos de acuerdo a sus respectivas coordenadas geográficas para el período considerado.

### 2.4 Estadísticos de validación

El ajuste entre la radiación solar diaria registrada en cada estación y la radiación proveniente de CERES\_SYN1 se realizó a partir de una regresión lineal. Para evaluar los errores de estimación se calcularon los estadísticos: coeficiente de determinación ( $R^2$ ), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el porcentaje de la raíz del error cuadrático medio (%RMSE).

## 3 Resultados y Discusión

En la Tabla 1 se muestran los valores de los estadísticos resultantes de las regresiones lineales entre los valores registrados de la radiación solar y los provenientes de CERES\_SYN1 para cada una de las estaciones. Los mismos muestran una excelente adecuación del satélite a los registros y, con la excepción de Villa del Totoral, el %RMSE es siempre menor a 17%.

Los valores obtenidos en este trabajo se encuentran en el rango de los presentados para la zona de Oliveros (Santa Fe), [15] obtuvieron un  $R^2 = 0,88$  y RMSE entre 28,47 y 53,24  $Wm^{-2}$ , considerando distintas campañas agrícolas, para radiación solar diaria a partir de CERES, antecesor de CERES\_SYN1. Para Manfredi (Córdoba), [8] compararon radiación solar diaria a partir de CERES obteniendo un ajuste con  $R^2 = 0,89$  y  $RMSE = 29,03 Wm^{-2}$ . [11] informaron coeficientes de determinación entre 0,96 y 0,97 y raíz del error cuadrático medio entre  $\pm 15$  y  $\pm 21 W m^{-2}$  para datos diarios de estaciones de Argentina usando el mismo producto de este trabajo. Más general, para estaciones continentales distribuidas en todo el planeta y evaluando un ajuste entre datos de radiación global diaria en superficie y los de CERES\_SYN1, [16], obtuvieron  $R^2 = 0,94$  y  $RMSE = 25,02 Wm^{-2}$ .

**Tabla 1.** Coeficientes de determinación, raíz del error cuadrático medio ( $Wm^{-2}$ ) y porcentaje de éste para los ajustes entre radiación solar registrada y CERES\_SYN1 para las estaciones y todo el período considerados en este trabajo.

| Estación           | R <sup>2</sup> | RMSE ( $W m^{-2}$ ) | %RMSE |
|--------------------|----------------|---------------------|-------|
| Coronel Moldes     | 0,97           | 28,27               | 13,11 |
| General Baldissera | 0,96           | 31,08               | 18,26 |
| Montecristo        | 0,96           | 27,99               | 14,52 |
| Porteña            | 0,95           | 31,04               | 17,31 |
| Villa del Totoral  | 0,95           | 50,04               | 21,27 |

La Figura 2 muestra las evoluciones temporales de la radiación solar proveniente de CERES\_SYN1 y la observada en superficie para las estaciones utilizadas en este trabajo. Como puede observarse en la Figura 2, los valores del producto CERES\_SYN1, en todos los casos, siguen el mismo patrón que la radiación registrada. Se pueden distinguir dos tipos de comportamientos, en el caso de Coronel Moldes y Villa del Totoral, CERES\_SYN1 muestra subestimación de la radiación registrada, siendo más marcada en la última estación, lo cual se confirma con los mayores valores obtenidos para RMSE y %RMSE. Para el caso de General Baldissera, Porteña y Montecristo ocurre lo contrario.

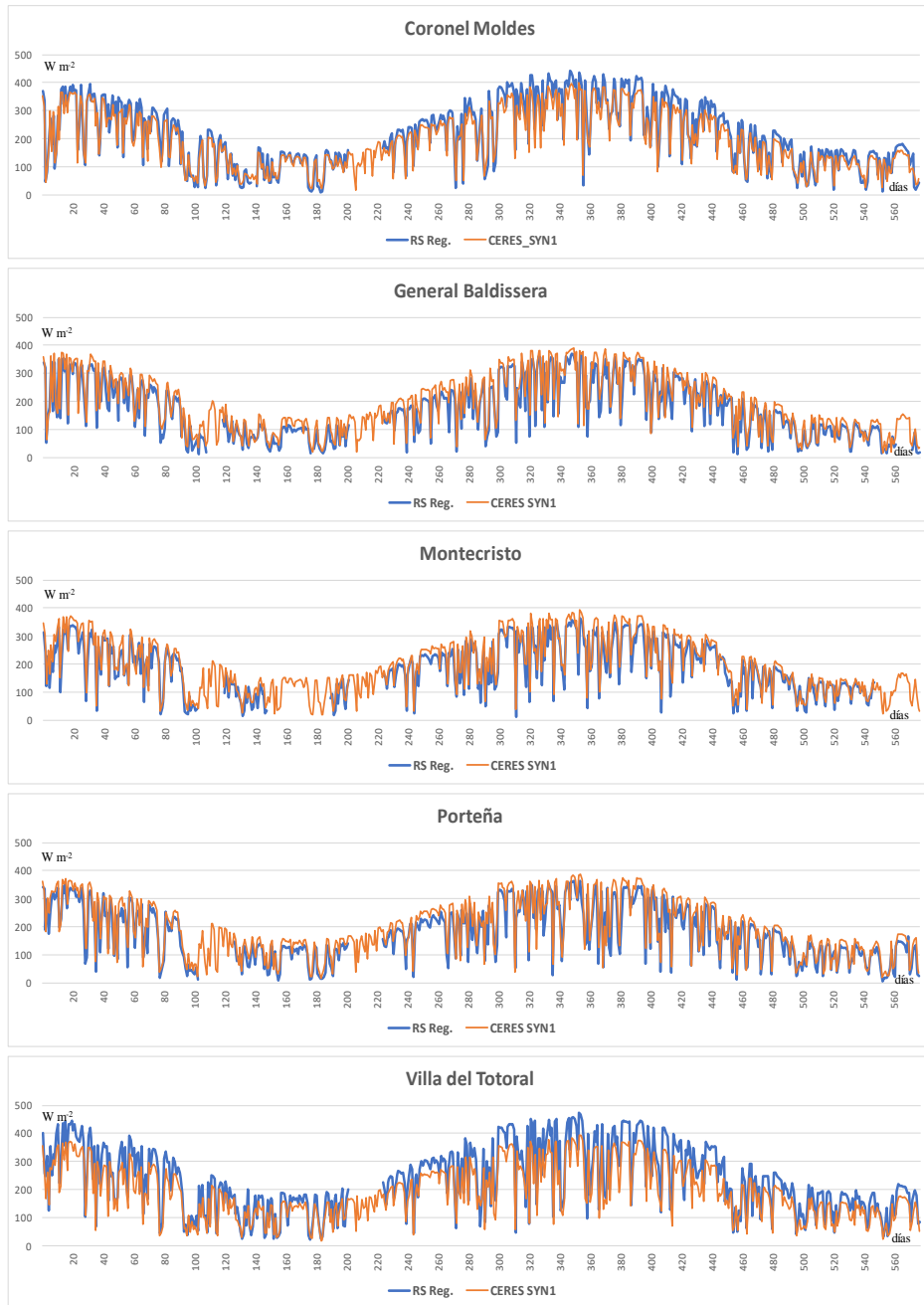
Hay dos hipótesis que permitirían explicar la mayor diferencia observada para Villa del Totoral (Tabla 1). Por una parte, el pixel correspondiente a la estación abarca una parte de las salinas grandes, lo cual puede provocar que la radiación provista por el satélite tenga variaciones debido al efecto del alto albedo de este tipo de superficie. Como señala [17], bajos valores de NDVI se relacionan con mayores de albedo, lo que propicia la pérdida de radiación de onda corta.

Por otro lado, puede existir una posible interferencia de las sierras que se encuentran próximas, con efectos sobre los valores de radiación solar provenientes del satélite. Algunos autores sugieren que cuando hay presencia de montañas cerca de las estaciones, puede que no se reciba radiación directa cuando el ángulo cenital solar es grande y también las montañas pueden producir un efecto de sombreado [16].

Estas diferencias, que resultan ser sistemáticas, al menos en el período considerado, podrían corregirse realizando un reescalado como el propuesto en [2]. La Tabla 2 muestra los parámetros de la regresión lineal de ajuste entre los valores diarios de radiación medidos y los provistos por CERES\_SYN1, para cada estación.

**Tabla 2.** Coeficientes de la regresión entre los valores de radiación solar registrada y la obtenida por CERES\_SYN1 para las estaciones y todo el período considerados en este trabajo.

| Estación           | Pendiente | Ordenada al origen |
|--------------------|-----------|--------------------|
| Coronel Moldes     | 0,87      | 10                 |
| General Baldissera | 1,00      | 23,20              |
| Montecristo        | 1,03      | 14,4               |
| Porteña            | 1,00      | 19,66              |
| Villa del Totoral  | 0,81      | 4,14               |



**Fig. 2.** Radiación registrada en superficie y proveniente de CERES\_SYN1 para las estaciones y todo el período considerados en este trabajo.

Finalmente, al considerar un análisis global, considerando todos los registros de las cinco estaciones, se obtuvo un buen ajuste, con valor de  $R^2= 0,90$ , y a partir de éste, la relación lineal que permitiría estimar la radiación en toda la zona de llanura de la provincia:

$$Rad_{est} = 1,02 \times Rad_{CERES\_SYN1} - 4,51$$

Donde:

$Rad_{est}$  es el valor estimado de la radiación para un determinado día.

$Rad_{CERES\_SYN1}$  es el valor obtenido del satélite para ese día.

## 4 Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten concluir que los datos de flujos diarios, superficiales, provenientes de CERES\_SYN1 resultan buenos estimadores de la radiación solar en superficie para el área geográfica de llanura de la provincia de Córdoba, en ausencia total o parcial de registros.

Las diferencias en las estimaciones se pueden mejorar aplicando un reescalado lineal de los datos satelitales, si bien a futuro será necesario indagar en las causas que gobiernan estos comportamientos.

Los ajustes obtenidos aseguran que los datos de CERES\_SYN1 pueden utilizarse entonces, de manera confiable, en diversidad de aplicaciones, en particular en modelos de simulación de cultivos.

**Agradecimientos.** A Secyt – UNC por el apoyo financiero brindado para la realización de este trabajo.

## Referencias

1. Connor, D. J., Loomis, R. S., & Cassman, K. G. Crop ecology: productivity and management in agricultural systems. 556 p. Cambridge University Press. (2011).
2. Almorox, J., Ovando, G., Sayago, S. and Bocco, M. Assessment of surface solar irradiance retrieved by CERES. International Journal of Remote Sensing 38(12), 3669–3683. (2017).
3. Ovando, G., Sayago, S. y Bocco, M. Radiación solar: modelos para estimarla a partir de imágenes de CERES. Acta de la XXXVIII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente 3, 08.01–08.09. (2015).
4. Will, A., Bustos, J., Bocco, M., Gotay, J. and Lamelas, C. On The Use of Niching Genetic Algorithms for Variable Selection in Solar Radiation Estimation. Renewable Energy 50, 168–176. (2013).

5. Sayago, S., Ovando, G. y Bocco, M. Radiación solar a partir de datos satelitales. En: 45 JAIIO– 8vo. Congreso Argentino de AgroInformática, CAI 2016, CABA, pp.160–171. (2016).
6. Liang, S.: Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces. 534 p. John Wiley & Sons, NJ, USA. (2005).
7. Kato, S., Loeb, N. G., Rutan, D. A., & Rose, F. G. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) data products for climate research. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. Ser. II, 93(6), 597–612. (2015).
8. Sibilia, S. y Sayago, S. Radiación solar diaria a partir de un modelo de estimación y datos de satélite. En: 46 JAIIO– 9no. Congreso Argentino de AgroInformática, CAI 2017, Córdoba, pp. 13–19 (2017).
9. Krishna, S. S., Manavalan, P., & Rao, P. V. N. Estimation of net radiation using satellite based data inputs. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(8), 307–313. (2014).
10. Sun, D., Ji, C., Sun, W., Yang, Y., & Wang, H. Accuracy assessment of three remote sensing shortwave radiation products in the Arctic. *Atmospheric Research*. (2018). En prensa.
11. Carmona, F., Orte, P. F., Rivas, R., Wolfram, E., & Kruse, E. Development and Analysis of a New Solar Radiation Atlas for Argentina from Ground-Based Measurements and CERES\_SYN1deg data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. (2017). En prensa.
12. Dirección de estadísticas y Censos. Secretaría General de la Gobernación. Gobierno de la Provincia de Córdoba. <https://estadistica.cba.gov.ar/economia/>. (2018)
13. Jarsún, B., Gorgas, J. A., Zamora, E., Bosnero, E., Lovera, E., Ravelo, A. y Tassile, J. L. En Gorgas, J. A., Tassile, J. L. (Eds.) *Recursos Naturales de la provincia de Córdoba: Los suelos. Nivel de Reconocimiento, 1(500.000)*. 541 p. (2003).
14. CERES\_SYN1deg\_Ed4A Data Quality Summary (10/3/2017) [https://ceres.larc.nasa.gov/documents/DQ\\_summaries/CERES\\_SYN1deg\\_Ed4A\\_DQS.pdf](https://ceres.larc.nasa.gov/documents/DQ_summaries/CERES_SYN1deg_Ed4A_DQS.pdf)
15. Ovando, G., Sayago, S., Salvagiotti, F. y Bocco, M. Estimación del rendimiento de soja con datos de radiación solar de CERES. En: 46 JAIIO– 9no. Congreso Argentino de AgroInformática, CAI 2017, Córdoba, pp. 20–32. (2017).
16. Chen, M., Zhuang, Q. and He, Y.: An Efficient Method of Estimating Downward Solar Radiation based on the MODIS observations for the use of Land Surface Modeling. *Remote Sensing* 6, 7136–7157. (2014).
17. Jia, A., Jiang, B., Liang, S., Zhang, X., and Ma, H. (2016). Validation and spatiotemporal analysis of CERES surface net radiation product. *Remote Sensing*, 8(2), 90.