

CARTAS DE RADIACIÓN SOLAR DIRECTA NORMAL PARA LA PAMPA HÚMEDA ARGENTINA

C. Raichijk

GERSolar, Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES), Departamento de Ciencias Básicas,
Universidad Nacional de Luján, Ruta 5 y Avda. Constitución, (6700) Luján,
Buenos Aires, ARGENTINA, Tel. /Fax: (54-2323) 440241, E-mail: gersolar@yahoo.com.ar

RESUMEN: Se generaron cartas con valores medios mensuales de radiación solar directa normal para la Pampa Húmeda Argentina. Para ello se fusionaron valores medios históricos de radiación directa normal de origen satelital de libre disponibilidad con valores estimados mediante correlaciones de descomposición a partir de datos de radiación solar global obtenidos en estaciones de la Red Solarimétrica Regional de la Universidad Nacional de Luján entre los meses de enero de 2011 y junio de 2012. Se consideraron dos bases de valores medios satelitales: los generados por NASA correspondientes al periodo 1983-2005 y por NREL para el periodo 1985-1991. Al cotejar valores obtenidos con mediciones pirheliométricas de radiación directa normal registradas en Luján se observó para el periodo enero 2011-junio 2012 un desvío cuadrático relativo medio anual de 13,1 % si se comparan con valores fusionados con medias históricas de NASA y de 11,7% con valores originados por NREL.

Palabras clave: radiación solar directa normal, interpolación residual, cartas, Pampa Húmeda, Argentina.

INTRODUCCIÓN

Contar con cartas con la distribución espacial de la radiación solar directa normal incidente, RDN, permite evaluar para distintas regiones el potencial tanto técnico como económico de una instalación basada en la utilización de colectores concentradores. Como se señaló en un trabajo anterior (Raichijk y Taddei, 2012) mediciones sistemáticas en tierra de radiación directa siguen siendo muy poco frecuentes y realizadas durante periodos cortos de tiempo. Al día de hoy en el país se cuenta con registros obtenidos en sólo tres campañas de medición: en Ushuaia durante los años 1995-2000 (Grossi Gallegos et al., 2006), en la ciudad de San Luis para el período 2000-2004 (Fasulo et al., 2006) y en Luján entre los meses de enero de 2011 y junio de 2012. Debido a ello, para poder evaluar la radiación solar directa disponible a nivel local y regional, se recurre por lo general a valores estimados mediante modelos.

Los modelos de estimación de la radiación solar pueden clasificarse en tres grupos: modelos físicos basados en la ecuación de transferencia radiativa, modelos parametrizados de atenuación, espectrales o de banda ancha, y modelos de descomposición. Los modelos físicos resuelven la ecuación de transferencia radiativa empleando distintos métodos numéricos para una atmósfera multicapa donde deben definirse los perfiles verticales de concentración de los distintos componentes atmosféricos, sus propiedades ópticas y los albedos de superficie. Los modelos parametrizados de atenuación evalúan la atenuación atmosférica de la radiación solar extraterrestre incidente mediante transmitancias, parametrizadas respecto a la longitud de onda o a la aeromasa relativa, definidas para cada componente atmosférico y proceso de atenuación, básicamente de dispersión y absorción. Se definen entonces para estimar la componente directa transmitancias de nubes, siendo estas el factor más preponderante de atenuación, y de gases permanentes, ozono, vapor de agua y aerosoles en condiciones de cielo claro. Algunos modelos de atenuación consideran el aporte de otros gases como el dióxido de nitrógeno (Gueymard, 2003). Los modelos de descomposición en cambio estiman mediante correlaciones empíricas la componente directa o difusa a partir de datos disponibles de radiación global.

En el marco proyecto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment) bajo el auspicio de UNEP (United Nations Environment Programme) se han generado para distintas regiones del planeta, entre otros productos, cartas de RDN con distintas resoluciones espaciales y empleando valores estimados mediante distintos modelos de estimación. Para la República Argentina se ofrecen libremente (<http://maps.nrel.gov/SWERA>) cartas con valores medios mensuales de RDN representadas en formato SIG de resolución moderada, 40 km x 40 km, empleando valores generados por NREL (US National Renewable Energy Laboratory) y de baja resolución, 1° x 1° (aprox. 100 km x 100 km), con valores estimados por NASA. Los valores NREL, incluyendo estimaciones de radiación global y difusa para América del Sur, se encuentran disponibles en <http://en.openei.org/datasets/node/495> y los estimados por NASA en <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.

Los valores medios mensuales de RDN generados por NREL fueron estimados mediante el modelo CSR, Climatological Solar Radiation model (Maxwell et al., 1998). El modelo CSR utiliza los algoritmos del modelo parametrizado de atenuación meteorológico/estadístico METSTAT (Maxwell, 1998), que a su vez se basa en el modelo parametrizado de cielo claro de Bird y Hulstrom (1981), con datos de entrada de cobertura nubosa de la base de datos RTNeph (Real-Time Nephanalysis) y datos de origen satelital de ozono, vapor de agua precipitable y espesor óptico de aerosoles. Todos los datos satelitales de entrada, originalmente de distinta resolución espacial, así como los valores de salida del modelo fueron ajustados a la grilla de 40 km de resolución de la base de datos de cobertura nubosa RTNeph. La base de datos RTNeph originada por el Air

Force Global Weather Center de EE.UU. colecta desde 1983 todo tipo de información disponible de cobertura nubosa: datos de tierra suministrados por estaciones meteorológicas, datos de radiosondas de capas superiores de la atmósfera y registros de satélites ambientales de órbita polar, para generar una grilla de proyección estereográfica polar para los hemisferios Sur y Norte. Los valores medios mensuales NREL utilizados en el presente trabajo corresponden al periodo 1985-1991. El modelo CSR se validó en 213 estaciones de EE. UU. respecto a datos medios mensuales registrados en el periodo 1961-1990, observándose para la radiación directa normal un desvío cuadrático relativo, RMSE%, medio anual de 7,2% con un sesgo relativo, MBE%, medio anual de -1,7% (George y Maxwell, 1999).

Por su parte los valores medios mensuales de RDN originados por NASA pertenecen a la base de datos SSE (Surface meteorology and Solar Energy data set) versión 6.0, tienen una resolución espacial menor de 1° x 1° de latitud y longitud y corresponden al periodo 1983-2005. Estos valores fueron estimados a partir de valores medios mensuales de radiación global disponibles de la base de datos GEWEX/SRB (Global Energy and Water Cycle Experiment/ Surface Radiation Budget) versión 3.0 mediante correlaciones empíricas propias de descomposición definidas a partir de datos de tierra registrados en las estaciones de la red BSRN (Baseline Surface Radiation Network). Los valores de radiación global GEWEX/SRB utilizados se estimaron a su vez mediante el modelo físico de transferencia radiativa de Pinker y Laszlo (1992) empleando datos de entrada de origen satelital de irradiancia a tope de atmósfera, nubes, vapor de agua, ozono y albedos de superficie más valores modelados de aerosoles. Al validar los valores medios mensuales estimados de RDN respecto a datos pirheliométricos obtenidos en estaciones de la red BSRN en el periodo enero 1992-junio 2005 se observaron un RMSE% medio mundial entre los 60° de latitud Sur y Norte de 23,3% con un MBE% de +8,4% (http://power.larc.nasa.gov/documents/SSE_Methodology.pdf).

En un trabajo previo (Raichijk et al., 2008) y de forma preliminar, debido a que no se contaba con datos de tierra que permitieran validar los resultados obtenidos, se confeccionaron cartas de RDN media mensual para la República Argentina mediante modelos de descomposición a partir de cartas de radiación global media mensual presentadas en trabajos anteriores, Righini et al. (2004, 2005). Se emplearon en aquella oportunidad las correlaciones de Page (Duffie y Beckman, 1991) para obtener a partir de valores de radiación global diaria media mensual valores medios mensuales de radiación difusa y las de Collares-Pereira y Rabl (1979) para estimar a partir de estos valores horarios de radiación global y difusa, lo que permite por diferencia estimar la radiación directa horaria sobre plano horizontal. Por último, el valor horario sobre plano horizontal se proyectó en la dirección incidente en el punto medio de cada hora y se integró para los días medios de cada mes.

En el presente trabajo se analizó un método alternativo para generar cartas con valores medios mensuales de RDN para la Pampa Húmeda Argentina. Se fusionaron, empleando una técnica de interpolación residual, valores de origen satelital generados tanto por NASA como por NREL con valores estimados mediante la correlación horaria de Boland et al. (2001) a partir de datos de radiación global obtenidos en 8 estaciones de la Red Solarimétrica Regional de la UNLu cuya área de cobertura corresponde a la región climáticamente homogénea antes mencionada. La correlación de Boland, junto a otros 11 modelos empíricos de descomposición, ha sido validada previamente respecto a mediciones pirheliométricas de radiación directa normal registradas en Luján, mostrándose como la de mejor respuesta al obtenerse para valores horarios un desvío cuadrático medio relativo, RMSE%, de 12,9% y un sesgo medio relativo, MBE%, de 0,38% (Raichijk y Taddei, 2012).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron medias mensuales históricas de RDN de origen satelital publicadas por NREL para el periodo 1985-1991 y por NASA correspondientes al periodo 1983-2005 para generar, en primera instancia en el área de estudio, grillas de valores satelitales interpolados con una misma resolución espacial. A su vez, a partir de datos de radiación global registrados en 8 estaciones de la Red Solarimétrica Regional de la Universidad Nacional de Luján entre los meses de enero de 2011 y junio de 2012 se estimó mediante la correlación de descomposición horaria de Boland et al. (2001) valores medios mensuales de RDN en cada una de estas localidades. Se consideró datos de radiación global correspondientes sólo a este periodo ya que se cuenta para el mismo con datos de RDN obtenidos en la Estación Solarimétrica de Luján (34,59 S, 59,06 W, 20 msnm) mediante un pirheliómetro Eppley NIP montado en un seguidor solar Kipp&Zonen SOLYS 2 controlado por GPS y que fueron reservados para realizar el estudio de validación de los resultados propuestos en el presente trabajo.

En la Tabla 1 se consignan las 8 estaciones consideradas, sus coordenadas y alturas sobre el nivel del mar, los sensores piranométricos utilizados y la cantidad de meses con registros completos de radiación global disponibles en el periodo analizado. En cada una de estas estaciones se cuenta con datos de radiación global integrados cada 10 minutos los que luego fueron llevados a una base temporal horaria. El área de cobertura de la Red Solarimétrica Regional (ver Figura 1) abarca la Pampa Húmeda y gran parte de la provincia de Entre Ríos, es una zona plana y homogénea climáticamente con un clima templado húmedo, Cfa según la clasificación de Köppen-Geiger, con temperaturas medias anuales entre 10 °C y 15 °C sin estación seca.

Estación	Latitud S (°)	Longitud W (°)	altura (msnm)	sensor	n° de meses completos
Anguil	36,54	63,99	165	K&Z CM5	12
Azul	36,77	59,88	132	Eppley B&W	8
Balcarce	37,76	58,30	130	Eppley B&W	6
Concepción del Uruguay	32,48	58,23	25	K&Z CM3	2
General Villegas	34,87	62,78	110	K&Z CM5	6
Marcos Juárez	32,57	62,08	110	Eppley B&W	6
Paraná	31,85	60,54	110	Eppley B&W/ K&Z CM3	14
Pergamino	33,94	60,57	65	Eppley B&W	12

Tabla 1: Características de las estaciones con registros de radiación solar global consideradas en el presente trabajo.

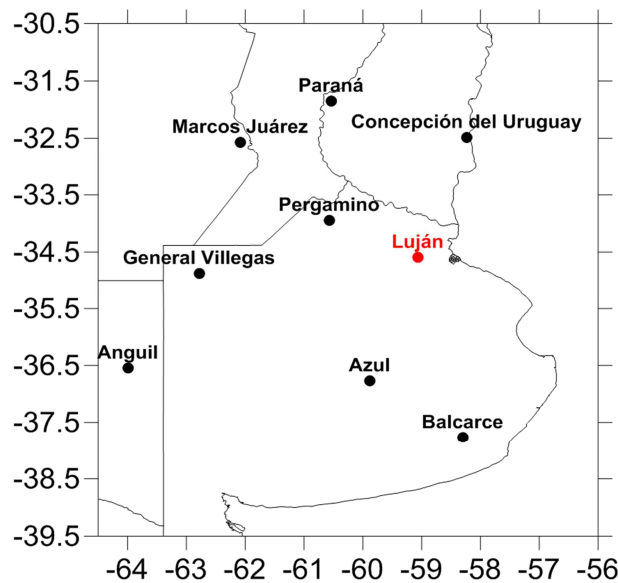


Figura 1: Área de cobertura de la Red Solarimétrica Regional de la UNLu, la estación de Luján (en rojo) se reservó para el estudio de validación.

La correlación de descomposición de Boland et al. (2001) permite estimar la llamada fracción difusa horaria, k_d , mediante una función logística definida respecto al índice de claridad horario, k_t , de la siguiente manera:

$$k_d = 1 / [1 + \exp (-5,0033 + 8,6025 k_t)] \quad (1)$$

siendo $k_d = d / h$ y $k_t = h / h_0$, donde d (KWh/m²) es la radiación difusa horaria, h (KWh/m²) la radiación global horaria y h_0 (KWh/m²) la radiación horaria a tope de atmósfera.

A partir del dato registrado de h y el valor estimado de d mediante (1) se obtiene, por diferencia, el valor de la radiación directa horaria sobre plano horizontal que luego se proyecta en la dirección incidente en el punto medio de cada hora para estimar así el valor de la radiación directa normal horaria. Estos valores se integran para cada día de cada mes considerado para finalmente definir el valor diario medio mensual de RDN del periodo analizado. Se tuvieron en cuenta sólo meses con datos completos de radiación global.

Con los valores medios mensuales satelitales de RDN y los estimados en cada estación considerada se generaron por interpolación residual las nuevas cartas para cada mes del año. En cada estación y para cada mes se define primero la diferencia entre el valor medio mensual de RDN estimado mediante la correlación de descomposición (1) y el valor satelital interpolado en el lugar, luego por kriging estas diferencias se interpolan en toda la región generando grillas de la misma resolución espacial que las grillas con valores satelitales interpolados previamente. Finalmente estas grillas se suman obteniéndose así las grillas con valores fusionados de RDN. Mediante esta técnica se garantiza que en cada estación el valor fusionado final sea igual al valor de RDN estimado a partir de (1).

Las nuevas cartas generadas fueron validadas respecto a mediciones pirheliométricas registradas en Luján durante el mismo periodo. Para ello se definen el desvío cuadrático relativo, RMSE%, y el sesgo relativo, MBE%, medios anuales entre los valores medios mensuales de RDN medidos en Luján, $\bar{H}_{DN\ med}$ (KWh/m²), y los estimados en este trabajo en el mismo lugar, $\bar{H}_{DN\ est}$ (KWh/m²), mediante las siguientes expresiones:

$$RMSE\% = \frac{\left[\frac{\sum_{i=1}^{12} (\bar{H}_{DN\ med, i} - \bar{H}_{DN\ est, i})^2}{12} \right]^{1/2}}{\left(\frac{\sum_{i=1}^{12} \bar{H}_{DN\ med, i}}{12} \right)} 100\% \quad (2)$$

$$MBE\% = \frac{\sum_{i=1}^{12} \bar{H}_{DN\ med, i} - \bar{H}_{DN\ est, i}}{\sum_{i=1}^{12} \bar{H}_{DN\ med, i}} 100\% \quad (3)$$

siendo i los valores correspondientes a cada mes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figuras 2, 3, 4 y 5 se presentan, a modo de ejemplo, para la Pampa Húmeda y provincia de Entre Ríos pares de cartas de valores medios mensuales de RDN expresados en KWh/m² obtenidos por fusión de valores estimados en las estaciones de la Red Regional con valores satelitales NREL y NASA para los meses de Enero, Abril, Julio y Octubre respectivamente.

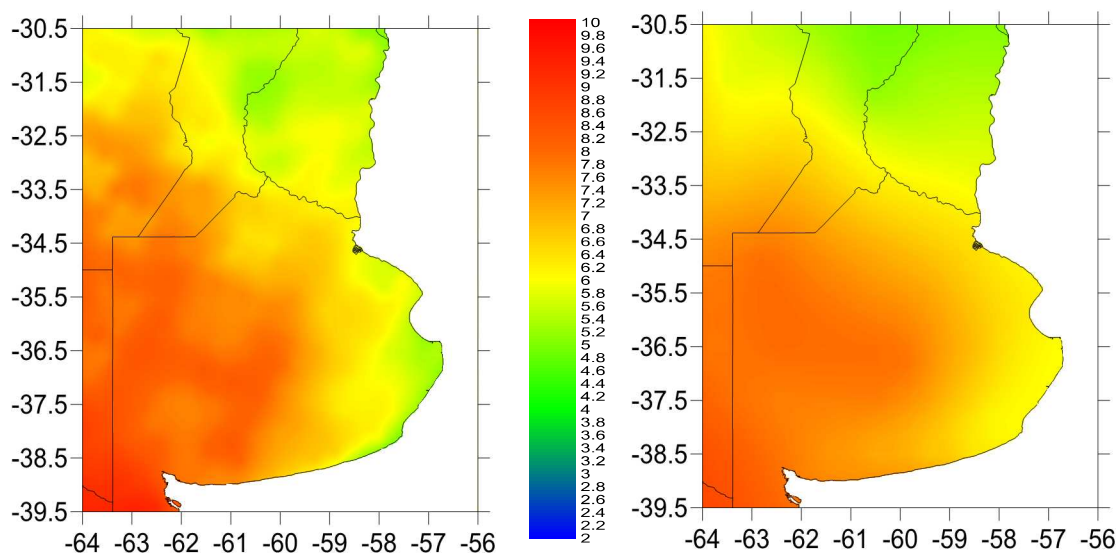


Figura 2: Distribución espacial de los valores diarios medios mensuales de RDN, expresados en KWh/m², correspondientes a Enero obtenidos por fusión de valores estimados en estaciones de la Red Regional con valores publicados por NREL (izq.) y por NASA (der.) respectivamente.

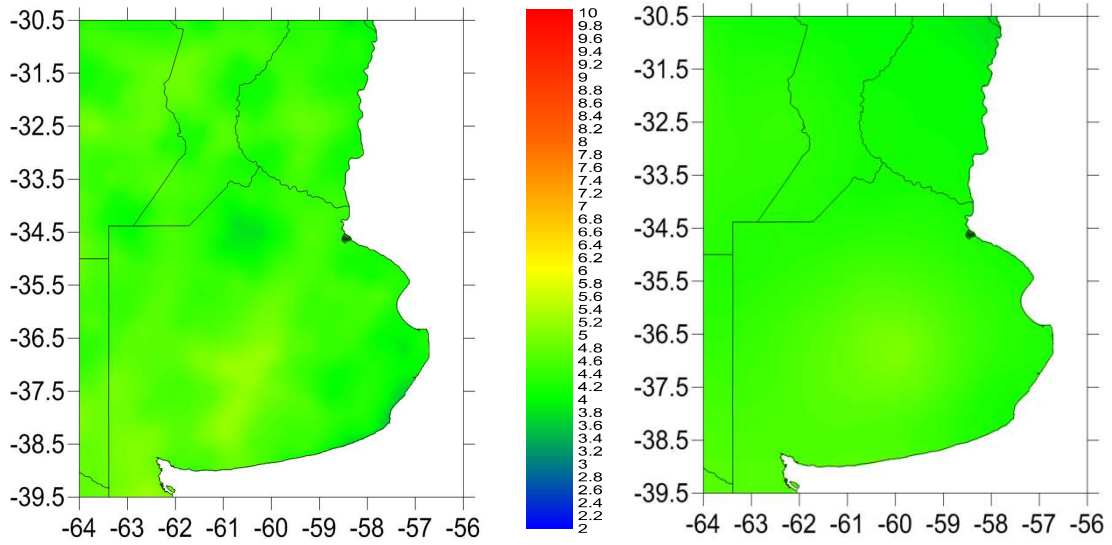


Figura 3: Distribución espacial de los valores diarios medios mensuales de RDN, expresados en KWh/m^2 , correspondientes a Abril obtenidos por fusión de valores estimados en estaciones de la Red Regional con valores publicados por NREL (izq.) y por NASA (der.) respectivamente.

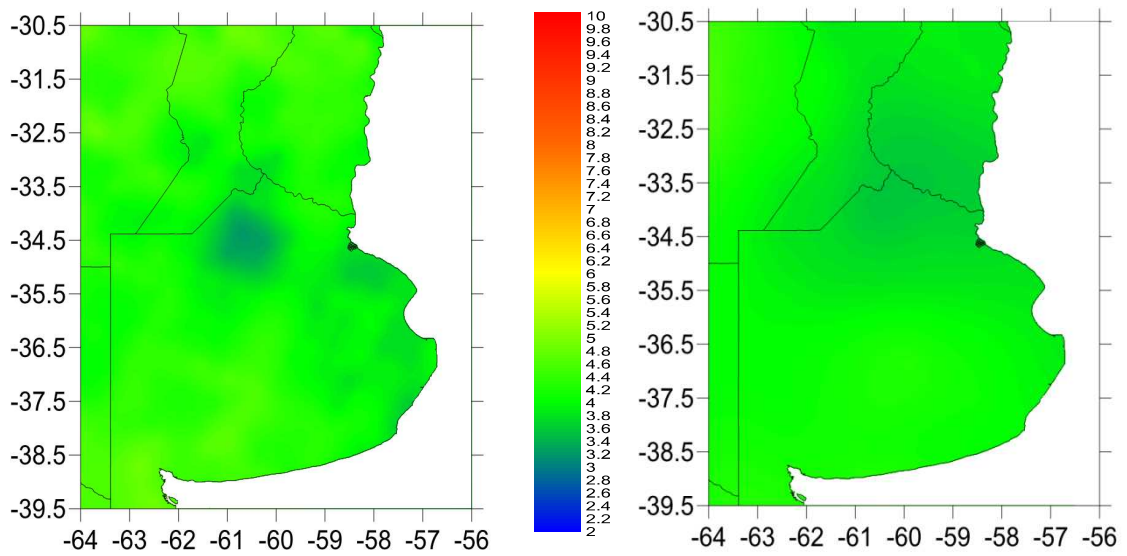


Figura 4: Distribución espacial de los valores diarios medios mensuales de RDN, expresados en KWh/m^2 , correspondientes a Julio obtenidos por fusión de valores estimados en estaciones de la Red Regional con valores publicados por NREL (izq.) y por NASA (der.) respectivamente.

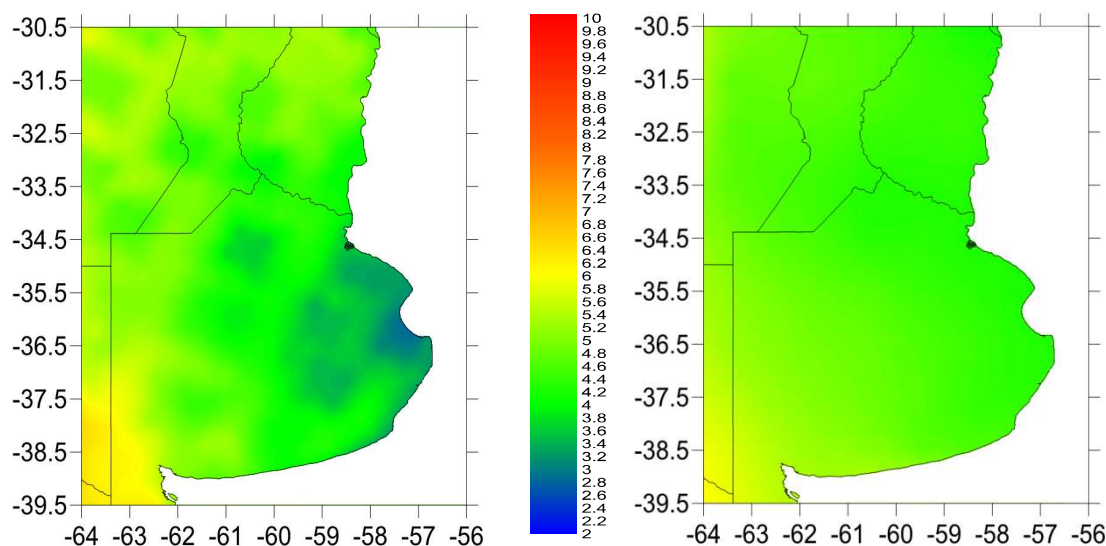


Figura 5: Distribución espacial de los valores diarios medios mensuales de RDN, expresados en KWh/m^2 , correspondientes a Octubre obtenidos por fusión de valores estimados en estaciones de la Red Regional con valores publicados por NREL (izq.) y por NASA (der.) respectivamente.

En la Tabla 2 se muestran los resultados del estudio de validación obtenidos al cotejar mediciones de RDN registradas en Luján tanto con valores estimados en el lugar por medio de la fusión con valores satelitales NREL y NASA como con los valores de los correspondientes píxeles NREL y NASA que se publican en la página SWERA.

Valores estimados de RDN en Luján	RMSE%	MBE%
fusionado/NREL	11,7	8,8
NREL/píxel	8,8	4,8
fusionado/NASA	13,1	10,4
NASA/píxel	11	-3,3

Tabla 2: Valores de RMSE% y MBE% medios anuales obtenidos al cotejar datos medios mensuales de RDN registrados en Luján con valores estimados en el lugar en este trabajo y publicados por NREL y NASA.

Las cartas obtenidas por fusión con valores NREL, debido a su mayor resolución espacial original, muestran en general una distribución espacial de los valores de RDN más detallada que las originadas con valores NASA, observándose entre estas diferencias más significativas en la zona oriental de la provincia de Buenos Aires para el mes de Octubre. Los resultados del estudio de validación en Luján a su vez, si bien evidencian para valores estimados en el presente trabajo desvíos cuadráticos medios anuales razonables, estos se muestran levemente superiores a los obtenidos para valores medios históricos satelitales publicados tanto por NREL como por NASA. En este sentido cabe destacar que el periodo de tiempo considerado de tan sólo un año y medio de extensión, acotado a la única base de mediciones pirheliométricas de RDN disponible a la fecha en Luján, sumado al hecho de no poder contar para todos los meses del mismo periodo con registros de radiación global simultáneos en todas las estaciones de la Red Regional, ver Tabla 1, confiere a estos resultados un carácter preliminar que, sin invalidar el método propuesto, obliga en un futuro a revisarlos con una base de datos más extensa y representativa de la región.

CONCLUSIONES

Se generaron para la Pampa Húmeda, incluyendo la provincia de Entre Ríos, cartas preliminares de valores diarios medios mensuales de radiación solar directa normal por medio de una técnica de interpolación residual que permite fusionar valores medios históricos de origen satelital de libre disponibilidad con valores estimados a partir de datos más recientes de radiación global obtenidos en 8 localidades de la región. Estos valores, que deberán ser refrendados en un futuro cuando se disponga de

una base de datos más extensa tanto para el proceso de estimación como para su validación, permiten identificar en primera instancia en la región zonas de interés para posibles aplicaciones de aprovechamiento de la radiación solar incidente con la utilización de colectores concentradores. Al comparar los valores medios mensuales obtenidos en este trabajo con datos pirheliométricos de RDN registrados en la Estación Solarimétrica de Luján se observan desvíos cuadráticos relativos medios anuales razonables de 11,7% con un MBE% de 8,8% para valores fusionados con datos publicados por NREL y de 13,1% con un MBE% de 10,4% con valores NASA. Estos resultados, que indican en ambos casos una subvaloración de los valores estimados respecto a los medidos, muestran desvíos levemente superiores a los que se observan al comparar valores medios satelitales con los registrados en Luján en el periodo analizado pero mucho menores si se comparan valores de RDN estimados en un trabajo anterior, Raichijk et al. (2008), cuando se empleó las correlaciones de Page (Duffie y Beckman, 1991) y Collares-Pereira (1979), observándose en este caso un RMSE% medio anual de 19,2% con un MBE% de 17%. Si bien los resultados preliminares obtenidos son satisfactorios y el método de interpolación residual propuesto se considera pertinente para una región plana y homogénea climáticamente como la estudiada, permitiendo generar cartas actualizadas de la componente directa con una precisión aceptable, será necesario disponer de una base de datos más extensa como se dijo anteriormente para poder realizar estimaciones del parámetro con un mayor peso estadístico.

REFERENCIAS

- Bird R. y Hulstrom R. (1981) A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces. SERI/TR, 642-761. Golden, CO: Solar Energy Research Institute.
- Boland J, Scott L, Luther M. (2001) Modeling the diffuse fraction of global solar radiation on a horizontal surface. *Environmetrics* 2001, 12, 103-116.
- Collares-Pereira, M. y Rabl, A. (1979) The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy* 22, 2, 155-164.
- Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991) *Solar Energy Thermal Processes*, pp. 89-91. John Wiley and Sons, New York.
- Fasulo A., Adaro J., Nieto M. B. (2006) Análisis de cinco años de mediciones de la radiación solar en la ciudad de San Luis. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 10, 11, 27-11.33.
- George R. y Maxwell E. (1999) High-Resolution Maps of Solar Collector Performance Using A Climatological Solar Radiation Model. Proceedings of the 1999 Annual Conference of American Solar Energy Society, Portland, ME. Disponible en http://www.nrel.gov/gis/pdfs/proceedings_solar99.pdf
- Grossi Gallegos H., Roberti A., Sierra V. (2006) Análisis de los datos de radiación solar disponibles en Ushuaia, Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 10, 11, 09-11.14.
- Gueymard C. (2003) Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment. *Solar Energy* 74, 5, 355-379.
- Maxwell E. (1998) METSTAT-The solar radiation model used in the production of the NSRDB. *Solar Energy* 62, 4, 263-279.
- Maxwell E., George R., Wilcox S. (1998) A Climatological Solar Radiation Model. Proceedings of the 1998 Annual Conference of American Solar Energy Society, Albuquerque NM. Disponible en http://www.nrel.gov/gis/pdfs/proceedings_solar98.pdf
- Pinker R. y Laszlo I. (1992) Modeling Surface Solar Irradiance for Satellite Applications on a Global Scale. *J. Appl. Meteor.* 31, 194-211.
- Raichijk C., Grossi Gallegos H., Righini R. (2008) Cartas preliminares de irradiación directa para Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 12, 11, 01 -11.07,
- Raichijk C. y Taddei F. (2012) Estudio comparativo de modelos empíricos de estimación de la radiación solar directa horaria. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 16, 11, 23-11.29.
- Righini R., Grossi Gallegos H., Raichijk C. (2004) Trazado de nuevas cartas de irradiación solar global para Argentina a partir de horas de brillo solar (heliofanía). *Energías Renovables y Medio Ambiente* 14, 23-31.
- Righini R., Grossi Gallegos H., Raichijk C. (2005) Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina. *Renewable Energy* 30, 1241-1255.

ABSTRACT: Charts of daily monthly mean values of direct normal solar radiation for the Argentine Humid Pampa Region were generated. For it were fused historical mean values of satellite derived direct normal radiation with values estimated by decomposition correlations from global solar radiation data obtained from stations of Regional Solarimetric Network of Universidad Nacional de Luján between the months of January 2011 and June 2012. It was considered two satellite databases: those generated by NASA for the period 1983-2005 and by NREL for the period 1985-1991. On comparing obtained values with pirheliometric measurements registered in Lujan was observed for the period January 2011-June 2012 an annual mean root square relative errors of 13.1% when using historical mean values of NASA and of 11.7% using values originated by NREL.

Key words: direct normal radiation, residual interpolation, charts, Humid Pampa Region, Argentina.