

NUEVO ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE LA PAMPA HÚMEDA ARGENTINA: RESULTADOS PRELIMINARES

R. Aristegui, R. Righini, V. Stern, J. Lell, S. Bazán

GERSolar, INEDES-CONICET, Universidad Nacional de Luján, Av. Constitución y Ruta 5, (6700)
Luján, Buenos Aires, Argentina – Tel. +54-2324-440241
gersolarunlu@yahoo.com.ar

Recibido 10/08/18, aceptado 19/09/18

RESUMEN: El Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar) de la Universidad Nacional de Luján ha confeccionado un nuevo Atlas de Radiación Solar de la Pampa Húmeda Argentina, el cual incluye 12 cartas mensuales y una anual que dan cuenta de los niveles diarios medios de irradiación solar en plano horizontal a nivel de la superficie terrestre. La información ha sido obtenida a través de las estaciones que el GERSolar y el INTA operan en la llanura Pampeana y corresponde a más de siete años de mediciones realizadas con instrumental de primera calidad en diez sitios de la provincia de Buenos Aires, Santa Fe, Entre Ríos, Córdoba y La Pampa. Se analiza la validez de la información presentada y se compara el potencial solar de la región con otros sitios de Argentina y el mundo.

Palabras clave: red de medición de radiación solar, Pampa Húmeda, mapas de radiación solar, aprovechamiento energético

INTRODUCCIÓN

El relevamiento de los niveles de radiación solar es ineludible para su aprovechamiento como fuente de energía. En efecto, el dimensionamiento de los sistemas de aprovechamiento de la radiación solar, ya sea para la producción de electricidad, para distintas aplicaciones térmicas industriales, para el calentamiento de agua, el secado de productos vegetales o como fuente de información básica en los procesos biológicos y las aplicaciones agronómicas, solo puede ser realizado si se conocen los niveles de irradiación solar a nivel de superficie con el suficiente grado de representatividad. (Grossi Gallegos et al, 1983; Aristegui et al, 2012; Rooster et al, 2012).

Durante los últimos años han surgido en Argentina diversas iniciativas destinadas a evaluar el recurso solar en varios sitios del país. Así se han publicado Atlas provinciales, entre los que pueden mencionarse los de Jujuy (Franco, J. 2016), Mendoza (Cortellezi M et al., 2012) y Entre Ríos(falta referencia), entre otros sitios con alto potencial para el uso del recurso solar como fuente primaria de energía. Merece citarse, en ese contexto, el amplio trabajo, publicado en 2008, el cual incluye las cartas de radiación solar de Argentina (Grossi Gallegos, 1998, a y b; Grossi Gallegos et al, 2007), constituyendo hasta la fecha el relevamiento más exhaustivo realizado en el país. También Carmona et. al (2017) han evaluado el recurso solar en Argentina, estimando valores diarios medios mensuales por medio de imágenes satelitales.

No obstante, la naturaleza dinámica de los fenómenos climáticos, entre los que la radiación solar está incluida, y el empleo de estimaciones basadas en datos satelitales en el trazado de muchas de esas cartas, hacen necesaria la continuidad del trabajo con el fin de actualizarlas y validarlas con información terrestre actualizada. Para lograrlo es preciso efectuar mediciones de calidad, ubicando las estaciones de medición en sitios con la adecuada distribución geográfica, de manera que los datos obtenidos permitan evaluar la variabilidad espacial regional y alcancen el tiempo mínimo de medición que las series requieran según su variabilidad temporal. (Grossi Gallegos et al, 2017; OMM 1983, OMM 1989)

Esa conjunción de factores necesarios (calidad de las mediciones, adecuada distribución espacial, y suficiente longitud temporal de las series para que los valores sean representativos) han dado lugar a una serie de iniciativas, a menudo provinciales o regionales, con diversos grados de ejecución. También es necesario destacar que esos factores constituyen a su vez severos limitantes para iniciativas más ambiciosas, tales como la encarada por el programa ENARSOL destinado a evaluar las componentes global, directa y difusa de la radiación solar en todo el territorio nacional. (Aristegui et al, 2012).

La Pampa Húmeda Argentina presenta una serie de características propias que confieren particular interés al relevamiento del recurso solar en ella. Por un lado, se trata de una región de unos 600.000 km² que presenta la mayor población del país, inmersa en una zona de alta producción agropecuaria y que cuenta a su vez con una importante población dispersa, alejada de las redes públicas de transmisión de energía eléctrica. Estos hechos confieren una indudable importancia económica a la evaluación de los niveles de irradiación solar, con vista a responder a una serie de demandas energéticas que esa población presenta.

Por otro lado, la preponderancia de planicies en la zona asegura la posibilidad de cubrir su extenso territorio con un número relativamente pequeño de estaciones de medición estratégicamente distribuidas. Debido a esa baja variabilidad espacial la interpolación geoestadística de los datos permite obtener valores confiables en toda la zona.

En lo que respecta a la longitud de las series temporales de datos necesarios para determinar el recurso con valores medios mensuales que resulten representativos, la zona requiere un número de años de medición que se sitúa en la franja intermedia de los valores extremos que Argentina presenta. En tal sentido, se puede afirmar que las series de datos deben tener alrededor de diez años para que los valores medios mensuales representen los de la serie a largo plazo con un error menor al 5%, dentro de un intervalo de confianza del 90% (Righini et al, 2014).

La red de estaciones que el GERSolar opera junto con INTA (Convenio UNLu-INTA, 2015) cumple en la actualidad con los requisitos indispensables para trazar las cartas solares de la Pampa Húmeda: instrumental adecuado, distribución espacial apropiada, y el suficiente período de toma de datos.

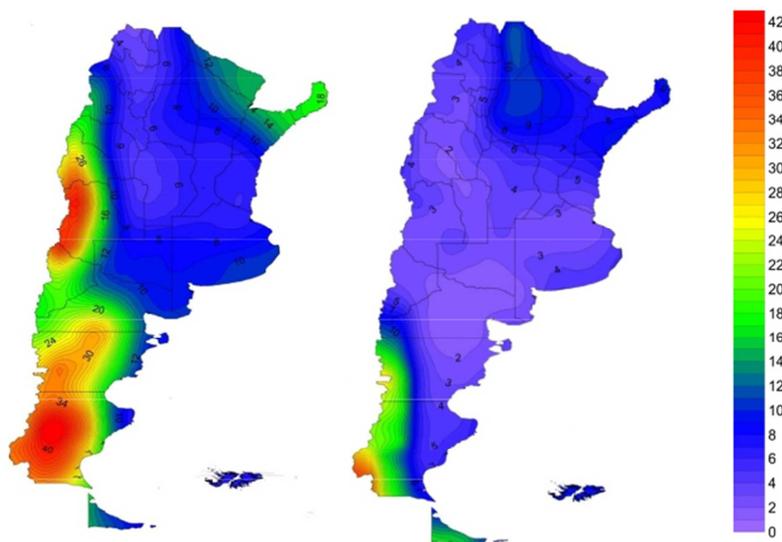


Figura 1: Años de medición necesarios para evaluar los valores diarios medios mensuales con error del 5% y nivel de confianza del 90%. Izquierda, Julio. Derecha: Enero.

MATERIALES Y MÉTODOS

La red regional operada por el GERSolar e INTA consta de diez estaciones de medición instaladas en las provincias de Buenos Aires, Córdoba, Santa Fe, Entre Ríos y La Pampa, las que pueden verse en la Figura 2. Las estaciones cuentan con solarímetros de primera calidad (CMP11 y CM5 de

Kipp&Zonen; y 8-48 de Eppley), calibrados cada dos años, tal como fija la norma, en el Laboratorio de calibración del GERSolar (Righini et al, 2015) y adquiredores de datos Campbell CR1000 y CR800. Los solarímetros son interrogados por los adquiredores de datos una vez por segundo, almacenándose los valores integrados una vez por minuto. Los niveles de irradiación minutas son integrados para obtener los valores de irradiación (en MJ/m² o kWh/m²) horarios y diarios, y el promedio mensual de estos últimos se utiliza como base para el trazado de isoclinas de irradiación en la zona, empleando el método de interpolación kriging. Mensualmente esos mapas son presentados en la página web que el GERSolar administra en el sitio de la UNLu: <http://www.gersol.unlu.edu.ar/>. El período empleado para el trazado de las cartas se extiende entre 2010 y 2018, con datos de diez estaciones de medición de la radiación solar.

Las mediciones de la red Pampeana se han utilizado para evaluar valores medios estimados de irradiación solar global en Atlas en formato SIG de cobertura mundial o continental, los cuales se ofrecen con acceso libre a través de distintos sitios web (bases de datos generadas por el NREL, INPE y NASA, ninguna de las cuales incluye datos de tierra dentro del territorio argentino). (Raichijk et al, 2017). Dado el carácter estratégico del recurso solar y la información sobre su distribución y variabilidad, la medición y sostenimiento en el tiempo de una red de medición terrestre perteneciente a instituciones del estado (Universidad de Luján e INTA) cobra una importancia singular.

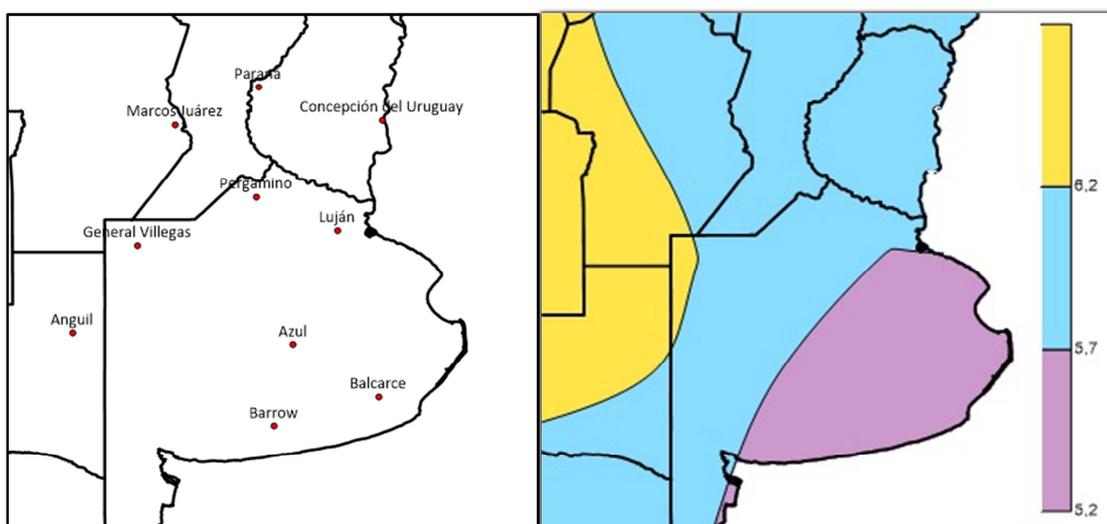


Figura 2: Izquierda: estaciones de medición de la red del GERSolar. Derecha: Mapa de irradiación solar diaria media mensual correspondiente al mes de marzo de 2018 (los valores están en kWh/m²).

La metodología empleada para el trazado de las presentes cartas ha sido discutida en un artículo anterior (Righini et al, 2017) y ha permitido elaborar doce cartas mensuales que representan la distribución espacial diaria media mensual de los valores de irradiación solar y una más con el valor de irradiación anual acumulado promedio.

Merece destacarse dentro de esta discusión la evaluación de los años de medición necesarios para la determinación del recurso. La cantidad de años requeridos ha sido establecida con la siguiente metodología:

Se usaron datos de radiación solar calculados por medio de imágenes satelitales a través de la aplicación del modelo SRB de Nasa sobre una serie de 23 años de estimaciones. Si bien las estimaciones satelitales pueden presentar desvíos respecto a los valores reales (Righini et al, 2016), las mismas fueron empleadas para determinar la variabilidad temporal del recurso, por lo cual el interés estaba centrado en dicha variabilidad, no en la representatividad de sus valores.

Considerando este hecho, se procedió de la siguiente manera:

a) Se evaluó el valor medio de los datos del centro de cada celda y el desvío estándar alrededor de ese valor medio. Esto se hizo para cada uno de los meses y para el valor medio anual, procesándose para cada celda 23 valores correspondientes a cada mes y 23 valores medios anuales (período 1983-2005).

b) Con los valores medios mensuales y el valor promedio se calculó la desviación estándar σ de cada celda para cada uno de los meses del año y para la media anual.

c) Se seleccionó un nivel de incerteza determinado, denominado δ , al que a su vez se le asignaron distintos valores: 1,5%, 3%, 5% y 10%.

d) El error absoluto admitido para cada mes se determinó como la media mensual del período de la serie multiplicado por δ . Se le llamó ε a este producto. Este procedimiento se aparta del empleado por Grossi Gallegos, juzgándose más apropiado evaluar los errores mensuales en función de los valores medios mensuales correspondientes a cada mes. Emplear, tal como lo hiciera Grossi Gallegos, el valor máximo medido puede dar lugar a subestimar el número de años de medición necesarios durante los meses de invierno (que presentan los menores valores de radiación) y sobreestimarlos en los meses de mayor radiación.

e) En base a la desigualdad de Tschebichev se determinó el número n de años de medición necesarios como

$n \geq \left(\frac{z(p) \cdot \sigma}{\varepsilon} \right)^2$, donde $Z(p)$ es el valor de la distribución de probabilidad t de Student con $n-1$ grados de libertad, que establece en $1-p$ la probabilidad porcentual de que el valor de la media real se encuentre dentro del intervalo de confianza $\bar{x} - Z(p) \cdot \sigma$; $\bar{x} + Z(p) \cdot \sigma$ con una media muestral \bar{x} calculada en n años.

f) Con los n así obtenidos para cada valor de δ y p seleccionados se interpolaron los valores de cada celda usando kriging, representándose espacialmente en un mapa de Argentina los valores de las isolíneas correspondientes.

Esa metodología aseguró que, para la mayoría de los meses, los años de medición existentes en los sitios de la red (Tabla 1) son suficientes para evaluar el recurso solar con el nivel de incerteza explicitado. La excepción la constituyen los de marzo, abril y junio, para los cuales, en el peor de los casos, son necesarios entre diez y quince años de medición. Este hecho confiere el carácter de preliminar a las presentes cartas.

Estación	Longitud	Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Anguil	-63,99	-36,54	148	85	140	150	93	140	186	154	164	186	148	147
Azul	-59,88	-36,77	62	70	93	90	93	90	124	93	100	69	54	62
Balcarce	-58,30	-37,76	185	140	186	150	186	120	124	124	180	216	150	173
Barrow	-60,24	-38,32	155	141	155	150	155	180	186	139	150	155	150	155
C. del Uruguay	-58,35	-32,49	185	141	155	150	186	180	186	155	175	186	180	178
Gral. Villegas	-62,78	-34,87	155	169	184	150	185	179	185	186	179	186	180	186
Luján	-59,06	-34,59	243	220	243	240	248	239	217	208	239	248	237	248
Marcos Juárez	-62,08	-32,57	186	191	217	210	240	210	217	152	150	155	150	125
Paraná	-60,54	-31,85	217	140	135	120	155	180	186	186	210	217	210	217
Pergamino	-60,57	-33,94	143	124	155	210	154	240	248	186	205	216	131	179

Tabla 1: Cantidad de días medidos dentro de cada mes, por estación.

Los valores medios mensuales han sido calculados promediando sobre todos los días del mes disponibles. Si bien las series de datos tienen días faltantes en prácticamente todas las estaciones, se considera que:

- los promedios así calculados difieren en un valor menor al error instrumental que los obtenidos promediando las medias de todos los meses.
- de haber considerado sólo los meses con un número de días faltantes menores que 3 (Grossi Gallegos et al, 2017), los datos disponibles hubiesen sido sensiblemente menos que los analizados.

Un análisis de la influencia de los días faltantes en los valores medios mensuales se encuentra en proceso de elaboración, lo que permitirá arribar a conclusiones precisas sobre el tratamiento de los datos en las futuras versiones del Atlas de la Pampa Húmeda Argentina.

RESULTADOS

En la siguiente página (Figura 3) se muestran dos cartas de irradiación diaria media mensual para la zona correspondiente a la Pampa Húmeda Argentina. Las magnitudes corresponden a kWh/m^2 . Los valores asignados representan los valores medios a largo plazo con una incerteza del 5% dentro de un nivel de confianza del 90%, salvo para los meses de marzo, abril y junio, para los cuales el intervalo de confianza es menor al 90%.

Debido a que la radiación fotosintéticamente activa (PAR) es un porcentaje casi fijo del valor de radiación solar global, las cartas obtenidas pueden usarse a su vez para representar cartas de PAR (Figura 4). Esa banda espectral resulta de relevancia en los campos agronómico y biológico, por lo cual las cartas de radiación global constituirían un aporte destinado a cubrir un faltante de información en estas áreas de particular interés. Para lograr esto simplemente puede evaluarse la radiación PAR como el 44% de la radiación solar diaria media mensual (Denegri, 2011, Raichijk, 2011.) Este factor brinda valores aceptables de radiación fotosintéticamente activa con diversos niveles de cobertura de cielo.

Potencial fotovoltaico de la Pampa Húmeda Argentina

Al tiempo que las cartas de irradiación presentadas aportan información a una serie de herramientas que optimizan el aprovechamiento energético de la energía solar (discos de irradiación solar, (Wallace, 2017), cálculo de ángulos de inclinación óptimos para la captación de energía, entre otros) el atlas muestra una realidad poco tenida en cuenta: la Pampa Húmeda presenta valores de irradiación que la transforman en una zona con un gran potencial de desarrollo de sistemas de aprovechamiento energético, en particular de generación fotovoltaica.

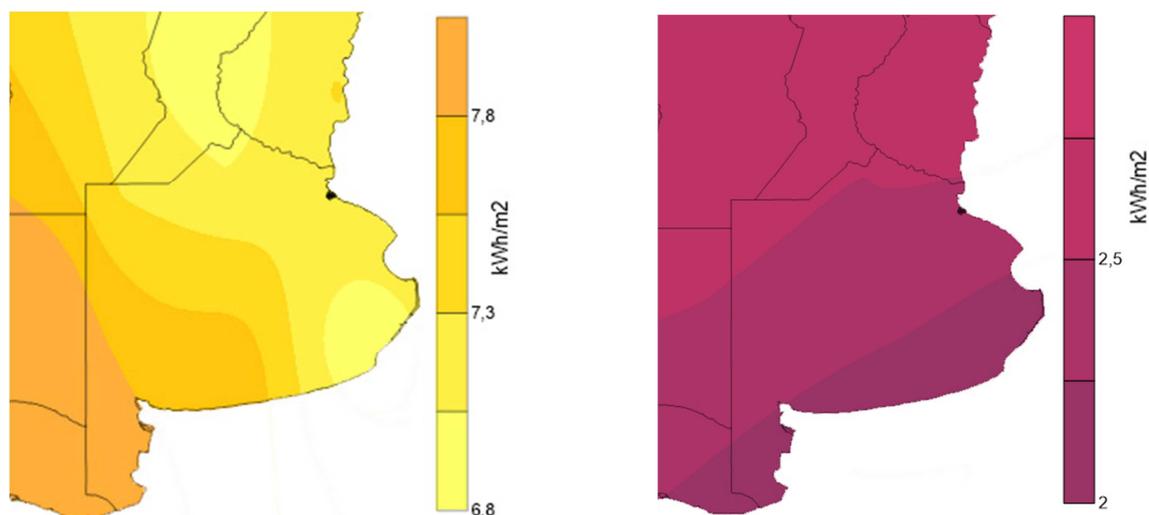


Figura 3: Cartas de irradiación solar diaria media mensual de la Pampa Húmeda Argentina correspondientes a los meses de enero (derecha) y julio (izquierda). Los valores están en kWh/m^2 .

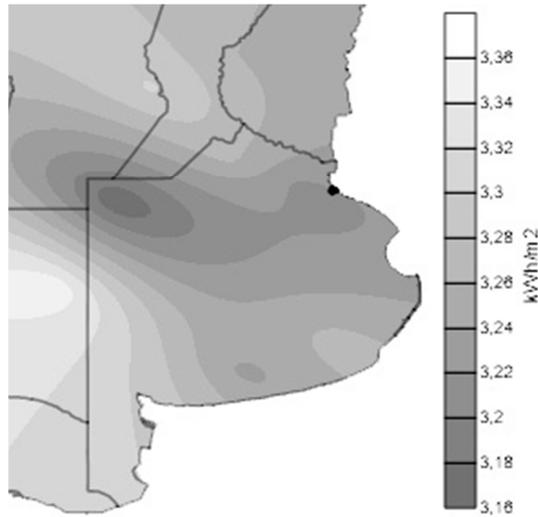


Figura 4: Radiación fotosintéticamente activa correspondiente al mes de enero de 2018. Los valores están en kWh/m^2

En efecto, tal cual muestra la Figura 5, dicha zona presenta valores de irradiación comparables a los de España (una de las mejores zonas de Europa en términos de irradiación solar, <https://www.panelessolaresbarcelona.com/mapa-de-la-radiacion-solar-en-europa>), si bien es cierto que en Argentina existen zonas con valores mucho más elevados de irradiación solar (entre los mejores del mundo).

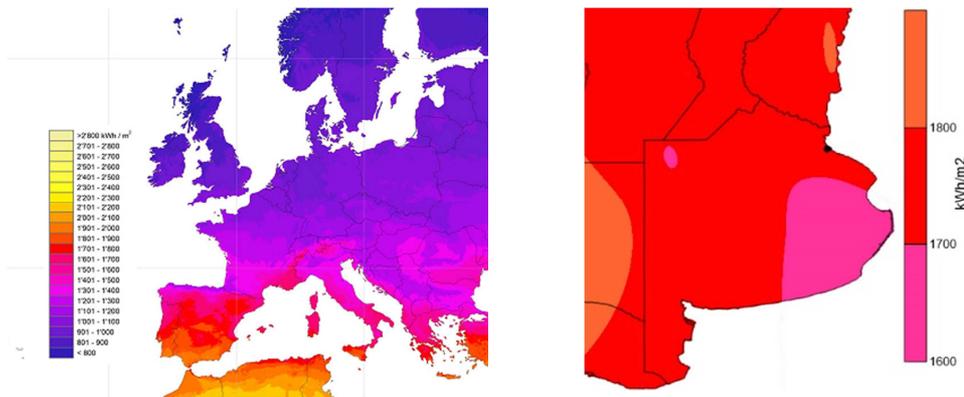


Figura 5: Mapa de energía anual colectada promedio. A la izquierda: Europa. A la derecha, Pampa Húmeda. Valores en kWh/m^2 .

Análisis de días cobertura de cielo

Del análisis de los datos recolectados en las estaciones que constituyen la red solarimétrica pampeana, se puede obtener una estadística sobre la cobertura nubosa en la zona. Considerando las siguientes categorías: cielo cubierto: $kt < 0,3$; cielo parcialmente cubierto con dominancia de difusa: $0,3 < kt < 0,55$; cielo parcialmente cubierto con dominancia de directa: $0,55 < kt < 0,7$; cielo despejado: $0,7 < kt$, puede concluirse que el porcentaje de días cubiertos, parcialmente cubiertos y nublados permanece prácticamente constante en toda la zona considerada. Otro parámetro de importancia surgirá en el futuro inmediato del análisis de días cubiertos consecutivos, dato muy relevante para el dimensionamiento de los dispositivos de acumulación en sistemas fotovoltaicos aislados. En la Figura 6 se muestran los porcentajes de kt diarios para la base completa. La zona tiene una alta ocurrencia de

días despejados y parcialmente cubiertos con dominancia de directa, alcanzando entre ambos, a nivel anual, un promedio del 60% de los días.

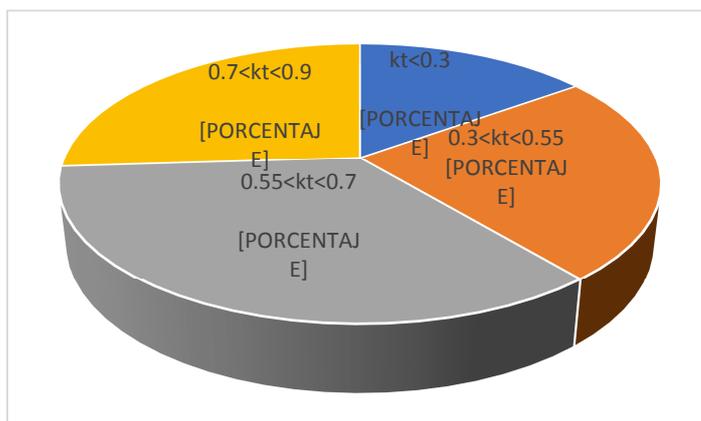


Figura 6: Porcentaje promedio de índice de claridad en la Pampa Húmeda.

CONCLUSIONES

El Atlas de irradiación solar de la Pampa Húmeda Argentina representa un importante avance en lo que hace a la actualización de la información sobre los niveles de irradiación solar de la región. El Atlas presenta un buen acuerdo con el trabajo presentado por Carmona et al. (2017), pero a diferencia de éste no se trata de una estimación sino que se basa en mediciones de los niveles de irradiación solar durante un número de años que permite evaluar el recurso solar con un aceptable nivel de confianza.

La Pampa Húmeda es una zona de gran desarrollo económico, donde reside la mayor cantidad de habitantes de Argentina, con una importante población dispersa alejada de las redes públicas de distribución de energía y en un contexto local y regional de incremento de la oferta de energía fotovoltaica, contar con este tipo de información resulta relevante. Los emprendimientos energéticos, agropecuarios y científicos que la utilicen contarán con datos actualizados obtenidos con instrumental de primera calidad, debidamente calibrado y con el suficiente peso estadístico como para asegurar la representatividad de los valores medios.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen a Andrés Domenech, técnico del GERSolar y a los observadores de las EEA del INTA encargados de las estaciones solarimétricas.

ABSTRACT

The Solar Radiation Studies Group (GERSolar) of the National University of Luján has created a new Atlas of Solar Radiation of the Pampas Húmeda Argentina, which includes 12 monthly letters and an annual one that offers the account of the new means of communication solar irradiation in a horizontal plane at the level of the earth's surface. The information has been obtained through the stations that the GERSolar and the INTA operates in the Pampeana plain and the correspondence to more than seven years of measurements made with first quality instruments in ten sites in the province of Buenos Aires, Santa Fe, Entre Ríos, Córdoba and La Pampa. The validity of the information presented is analyzed and the solar potential of the region is compared with other sites in Argentina and the world.

KEYWORDS

Solar radiation measurement network, Pampa Húmeda, solar radiation maps, energy use

BIBLIOGRAFÍA

- Grossi Gallegos, H., Nollmann, I., Lopardo, R. y Atienza, G. (1983). Evaluación preliminar del recurso solar en Argentina. En Actas de la 8a. Reunión de Trabajo de la ASADES, Santa Rosa, Argentina, pp. 179-194.
- Aristegui, R. y Righini R. (2012). Discusión sobre el proceso de selección de sitios apropiados para la ubicación de estaciones de una futura red solarimétrica nacional. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* (ISSN 0329-5184) vol. 16, pp. 11.39-11.46.
- Rooster, R. y Abdulha, A. (2012). On the growing importance of solar energy in the world: a new horizon. *Internatonal Solar Energy Magazine*, Vol 8. 245, p. 124-131.
- Franco, J. Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Jujuy. Comunicación. Jornada Nacional de Energía Solar Aplicada, San Salvador de Jujuy, septiembre de 2016.
- Cortellezzi M y Kaake N. Atlas de la energía de Mendoza. 54 pp. Usillal Ediciones, 2012.
- Aristegui, R. Righini, R. Discusión sobre el proceso de selección de sitios apropiados para la ubicación de estaciones de una futura red solarimétrica nacional. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* (ISSN 0329-5184), vol. 16, pp. 11.39-11.46 (2012).
- Grossi Gallegos H., Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. I. Análisis de la información. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 4, pp.119-123 (1998).
- Grossi Gallegos H., Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. II. Cartas de radiación. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 5, pp. 33-42 (1998).
- Grossi Gallegos H. y Righini R. Atlas de energía solar de la República Argentina”,. Publicado por la Universidad Nacional de Luján y la Secretaría de Ciencia y Tecnología, Buenos Aires, Argentina, 74 páginas + 1 CD-ROM, mayo de 2007 (ISBN 978-987-9285-36-7), Registro de la Propiedad Intelectual No. 554247 del 15 de marzo de 2007.
- Carmona F., Orte, F., Rivas, R. Wolfram E. y Kruse E. Development and Analysis of a New Solar Radiation Atlas for Argentina from Ground-Based Measurements and CERES_SYN1deg data. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, Noviembre de 2017. Grossi Gallegos, H, Coquet E. La pérdida de datos diarios de irradiación solar global y una evaluación sobre su influencia en los promedios mensuales. *Revista de Climatología*, Vol17, 45-47 (2017).
- Organización Meteorológica Mundial (1983): Guía de prácticas climatológicas (2a edición), OMM, Ginebra.
- Organización Meteorológica Mundial (1989): Cálculo de las normales estándar mensuales y anuales de 30 años: preparado por una reunión de expertos, Washington D.C.,EE.UU., marzo de1989.WCDPNo. 10, OMM, Ginebra.
- R. Righini, R. Aristegui, A. Roldán. Determinación de la cantidad de años de medición necesarios para la evaluación de la radiación solar global a nivel de superficie en Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* (ISSN 0329-5184) vol. 2, 2014, pp. 1117-1125.
- Convenio UNLu-INTA. El GERSolar (por parte de la UNLu) y el INTA firmaron un convenio específico de cooperación destinado a mantener la red pampeana de medición de la radiación solar, con vigencia 2015-2019.
- R. Righini y R. Aristegui, Caracterización del nuevo laboratorio de medición del GERSolar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* (ISSN 0329-5184) Vol. 3, pp. 11.01-11.09, 2015.

- C. Raichijk y F. Taddei, Atlas globales de radiación solar: Evaluación en la Pampa Húmeda Argentina, Acta de la XL Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente (ISBN 978-987-29873-0-5). Vol. 5, pp. 11.79-11.86, 2017.
- R. Righini y R. Aristegui (2016) Plantas fotovoltaicas: perjuicios por no evaluar convenientemente el recurso solar. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, ISBN 978-987-29873-0-5, pp 08.69-08.76.
- R. Righini y R. Aristegui. Metodología para el trazado de cartas solares de la Pampa Húmeda Argentina. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (ISSN 0329-5184) Vol. 4, pp. 11.105-11.112, 2017.
- Denegri, M. J, Relación entre la radiación fotosintéticamente activa y la radiación solar global en Luján, Buenos Aires, Argentina. XIV Congreso Latino-e Ibérico de Meteorología, Setúbal, Portugal, 258-263. (2011)
- C. Raichijk, Estudio de las fracciones solar UV, PAR e IR en Luján, Provincia de Buenos Aires. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (ISSN 0329-5184) vol. 5, 2011, pp. 1187-1194.
- C. Wallace. Cálculo y elaboración de los discos de irradiación solar para su uso como herramienta de gestión en políticas provinciales para la promoción de la energía solar en la República Argentina. Tesis de maestría en energías renovables, mención solar, UTN, Córdoba, 2017.