

## **ANÁLISIS DE LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN SAN CARLOS, SALTA**

H. Grossi Gallegos, R. Aristegui, R. Righini

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@mail.unlu.edu.ar

**RESUMEN:** Por diferentes motivos, el uso de fuentes renovables de energía para la generación eléctrica ha experimentado un importante crecimiento en todo el mundo, siendo la solar una de ellas. En particular instalación de plantas de generación solar fotovoltaica o térmica de electricidad aparece como una actividad que concita un interés creciente tanto a nivel internacional como local. Los sitios apropiados para su instalación son aquellos en los cuales los niveles de irradiación solar son elevados. Para precisar su ubicación se hace necesario analizar las pocas mediciones existentes. En el presente trabajo se muestra la zona más recomendable en Argentina para tal fin, identificándose dentro de ella dos estaciones que tienen una razonable estadística. Los datos de radiación solar de la estación San Carlos son analizados en particular.

**Palabras clave:** irradiación global, análisis estadístico, San Carlos.

### **INTRODUCCIÓN**

El aprovechamiento de fuentes energéticas alternativas de generación eléctrica ha experimentado un importante crecimiento en todo el mundo. Los posibles escenarios de incremento de la temperatura media mundial, el aumento de las emisiones de dióxido de carbono (uno de los gases de efecto invernadero más importantes) y el agotamiento de los combustibles fósiles han estimulado el estudio y la implementación de sistemas alternativos para la generación eléctrica, tanto con centrales solares fotovoltaicas como fototérmicas. Los lugares apropiados para la ubicación de ambas son aquellos que presentan niveles de irradiación solar elevados y proximidad a las redes eléctricas en las cuales se inyectará la energía generada. En el caso de las centrales térmicas se suma la necesidad de disponibilidad de agua como requisito indispensable para su instalación.

El panorama mundial presenta, en la actualidad, un escenario de crecimiento potencial para la siguiente década. Como dato relevante, puede citarse que la producción y venta de paneles fotovoltaicos ha crecido alrededor de un 20% anual en la década de los '90, y que en la Comunidad Económica Europea el ritmo medio anual de crecimiento ronda el 30%.

Japón es el primer productor mundial de energía solar fotovoltaica. La Comunidad Económica Europea también ha realizado esfuerzos en ese sentido, teniendo a Alemania y a España como líderes en la producción de paneles fotovoltaicos y en la aplicación de este tipo de tecnología.

España y Alemania han realizado desde hace años esfuerzos importantes en dos sentidos: por un lado, se destaca el estímulo a la generación descentralizada por parte de pequeños usuarios, a los que se abona un precio subsidiado por kWh inyectado en la red; por el otro, la implementación de grandes sistemas de generación como la Central Solar de Almería en España, y Espenhain y Erlasee en Alemania. Otros países, tales como Estados Unidos y China, se encuentran trabajando activamente en generación fotovoltaica, ejecutando simultáneamente proyectos de generación descentralizada y producción en grandes centros.

En Argentina, la reciente reglamentación (por Decreto PEN N° 562/09) de la Ley 26190/06, aprobada para establecer un régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía, abre interesantes perspectivas para el establecimiento de centrales solares de potencia, ya que establece como objetivo lograr "una contribución de las fuentes de energía renovables hasta alcanzar el OCHO POR CIENTO (8%) del consumo de energía eléctrica nacional, en el plazo de DIEZ (10) años a partir de la puesta en vigencia del presente régimen", habiéndose definido un conjunto de beneficios impositivos aplicables a las nuevas inversiones en emprendimientos de producción de energía eléctrica, así como la remuneración a pagar por cada kilovatio hora efectivamente generado por las diferentes fuentes ofertadas que vuelquen su energía en el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) o estén destinadas a la prestación de servicio público.

Por otro lado, la empresa estatal ENARSA licitó la provisión de 1.000 Megavatios de energía de fuentes renovables; el programa GENREN (Generación Renovable) prevé la adquisición de 1.000 MW - que equivalen a casi el 5% del consumo eléctrico del país - mediante contratos de compras que no superarán los 50 MW por proyecto y cuya duración se extenderá por quince años.

En todos los casos dimensionar estos sistemas de aprovechamiento de la energía solar requiere estimar la energía solar acumulada por superficies colectoras inclinadas en distintas orientaciones. Las centrales fototérmicas necesitan para su dimensionamiento información sobre la componente directa de la irradiación incidente. Sin embargo en la mayoría de las

estaciones de medición sólo se registra la irradiación global sobre plano horizontal, siendo muy poco frecuente el registro sistemático, ya sea de la componente difusa, mediante el uso de banda sombreadora, o de la componente directa a partir del empleo de pirheliómetros. Es por ello que se recurre a modelos empíricos que permiten a partir de la irradiación global sobre plano horizontal determinar la componente difusa de la misma y luego, por diferencia entre ambas, estimar la directa (Raichijk *et al.*, 2008).

El dimensionamiento de centrales fotovoltaicas demanda información sobre la irradiación global incidente sobre una superficie plana, la que puede estar fija (en un ángulo óptimo), animada de movimiento sobre un eje (con regulaciones estacionales o mensuales) o sobre dos (tracking), con el fin de mejorar la energía colectada a lo largo del año. La decisión final sobre el sistema de orientación que se adopte depende de consideraciones acerca de la relación costo/beneficio. En todos los casos, en Argentina, habrá que calcular la energía a coleccionar partiendo tan sólo de las mediciones de la irradiación global diaria y utilizando, llegado el caso, los mismos modelos de estimación de las componentes de la irradiación global que ya se mencionaron.

Vale la pena recordar que en el año 1978 comenzaron a instalarse las primeras estaciones de la Red Solarimétrica (equipadas con solarímetros fotovoltaicos Rho Sigma e integradores SIDCON) con el apoyo de la Organización de los Estados Americanos y de Secretaría de Estado de Ciencia y Tecnología, y en julio de 1979 se publicó el primer Boletín con datos de 5 de las 12 estaciones en operación. Luego la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales (CNIE) se hizo responsable de la Red Solarimétrica y compró para ella piranómetros termoelectricos fabricados por la firma Eppley (modelo 8-48 "Black and White").

Los datos de irradiación solar global diaria de esas estaciones constituyen la única base de mediciones realizadas en tierra en Argentina y su análisis sirvió para la elaboración de cartas con la distribución espacio-temporal del parámetro (Grossi Gallegos y Righini, 2007). En base a esta información se puede estimar la disponibilidad del recurso en diferentes zonas de Argentina y discutir sobre los lugares apropiados para la instalación de plantas solares de generación eléctrica. El caso de la localidad de San Carlos en Salta se discute en particular, presentándose estadísticas relacionadas con el recurso solar, ya que debe tenerse en cuenta que el Gobierno de la provincia de Salta adquirió en las proximidades de la localidad de San Carlos un predio para la instalación de una planta de generación térmica solar de potencia.

## MATERIALES Y METODO

Teniendo en cuenta la distribución espacial del promedio anual de la radiación solar global diaria sobre un plano horizontal en Argentina preparada por Grossi Gallegos (1998) y calculando la energía solar que en promedio se colecta en un año, se obtiene la carta que se presenta la Figura 1. Considerando que las zonas aptas para el aprovechamiento energético de la

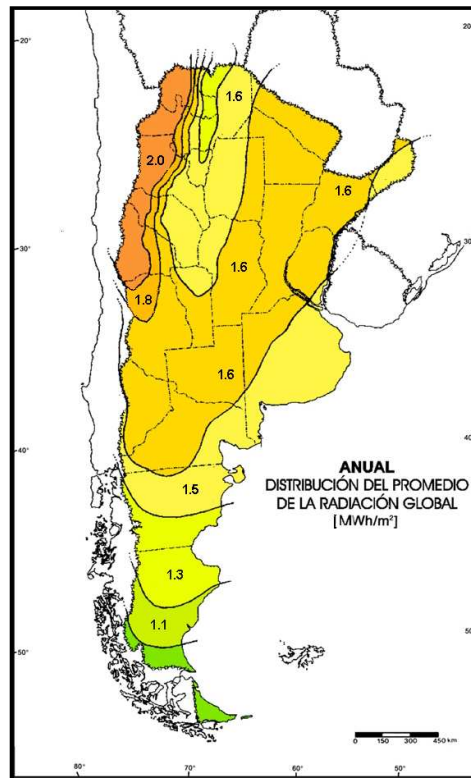


Figura 1. Distribución espacial de la energía solar media recibida anualmente sobre un plano horizontal en Argentina [ $MWh/m^2$ ].

radiación solar deben recibir no menos de 1,8 MWh/m<sup>2</sup> anuales, se puede ver que las regiones ubicadas al Oeste y Noroeste de nuestro país son las recomendables para estas aplicaciones.

En esta zona existen dos estaciones que disponen de una razonable estadística: San Juan, en la provincia del mismo nombre, y San Carlos, ubicada en la provincia de Salta. Los registros de la primera fueron ya analizados en una presentación reciente (Raichijk *et al.*, 2009), por lo que en este trabajo se analizarán los datos registrados por la Red Solarimétrica en la localidad de San Carlos.

San Carlos se encuentra en un valle que se extiende longitudinalmente en la dirección Norte-Sur, limitado hacia el Este y el Oeste por cadenas montañosas, situado a unos 1600 metros sobre el nivel del mar. Hacia el Oeste se encuentra la Sierra de Quilmes o Sierra del Cajón; se trata de un cordón montañoso de unos 3000 metros de altura situado a unos 12 km, que tiene alturas como el Cerro Bayo que pueden alcanzar los 4300 metros. Hacia el Este está la Sierra del León Muerto, donde también existen cerros que presentan alturas del orden de los 3100 metros; esta serranía se halla a unos 15 km de San Carlos. Por lo tanto, en la propia localidad existen dos barreras orográficas hacia el Oeste y el Este, que se alzan a unos 10° respecto del horizonte hacia el oeste y unos 6° hacia el Este. Esa situación se mantiene a lo largo del valle, tanto hacia el Norte como hacia el Sur.

Lo habitual para caracterizar el comportamiento estadístico de los valores de irradiación solar global diaria es calcular su valor medio mensual y su desvío estándar, agregando el coeficiente de variabilidad (definido como el cociente entre el desvío estándar y el valor medio) y el nivel de confianza asociado a cada promedio. Para completar la descripción se estudia la probabilidad de ocurrencia de días nublados consecutivos y la del índice de claridad (esto es, qué fracción de la irradiación disponible fuera de la atmósfera es recibida en tierra, luego de interactuar con los componentes atmosféricos).

## RESULTADOS

En base a la información registrada se calcularon los valores medios mensuales y su desvío estándar (kWh/m<sup>2</sup>), los que se consignan en la Tabla 1, en donde se presentan también el coeficiente de variabilidad y el nivel de confianza con que se puede asegurar que el valor medio muestral difiere del de la población en 6% o menos (esto es, de acuerdo al número de meses de observación que se dispone, qué porcentaje del tiempo la media muestral se mantiene dentro de una franja de  $\pm 6\%$  de la media poblacional, a la que suele denominarse “media a largo plazo”). El error del 6% se fijó en función del error del instrumental instalado en el lugar de medición.

SAN CARLOS					
	Número de meses	Irradiación global media diaria (kWh/m <sup>2</sup> )	Desvío estándar $\sigma$ (kWh/m <sup>2</sup> )	Coeficiente de variabilidad Cv	Nivel de confianza (%)
ENERO	5	5,8	0,9	0,16	61
FEBRERO	6	5,3	0,5	0,09	88
MARZO	6	5,5	0,4	0,07	66
ABRIL	9	4,6	0,9	0,20	64
MAYO	8	3,8	0,7	0,18	64
JUNIO	7	3,5	0,4	0,11	83
JULIO	7	3,6	0,5	0,14	74
AGOSTO	6	4,4	0,4	0,09	89
SEPTIEMBRE	6	5,1	0,7	0,14	71
OCTUBRE	5	6,1	1,0	0,16	93
NOVIEMBRE	4	6,5	0,5	0,08	88
DICIEMBRE	4	6,5	0,5	0,08	88

Tabla 1. Promedios mensuales de la irradiación solar global diaria incidente sobre plano horizontal y su desvío estándar, expresados ambos en kWh/m<sup>2</sup>, junto con la longitud de los registros, su coeficiente de variabilidad y el nivel de confianza, correspondientes a San Carlos (Salta).

Otra característica de interés es conocer la probabilidad de ocurrencia de días nublados consecutivos. Durante ese período puede haber una caída significativa en la energía generada por una planta fotovoltaica de generación eléctrica. Estos resultados se muestran en la Figura 2, en los que se presenta la frecuencia relativa (o probabilidad) de ocurrencia anual de 2, 3 y 4 días nublados consecutivos.

El índice de claridad  $K_t$ , definido como el cociente entre la irradiación global diaria recibida en la superficie de la tierra y la que se recibe fuera de la atmósfera en ese lugar, es una forma de calificar la bondad de un lugar para el aprovechamiento de esta fuente de energía. Su frecuencia relativa de ocurrencia se presenta en la Figura 3 en la que se presenta en función de intervalos de amplitud 0,1. A estos valores se los suele agrupar en tres clases: de 0 a 0,3 correspondiente a días mayormente

cubiertos, de 0,3 a 0,6 a semicubiertos, y mayores que 0,6 (de 0,6 a 0,9) a días claros. La frecuencia relativa (o probabilidad) de ocurrencia de días con valores de índice de claridad agrupados en estas clases se presenta en la Figura 4.

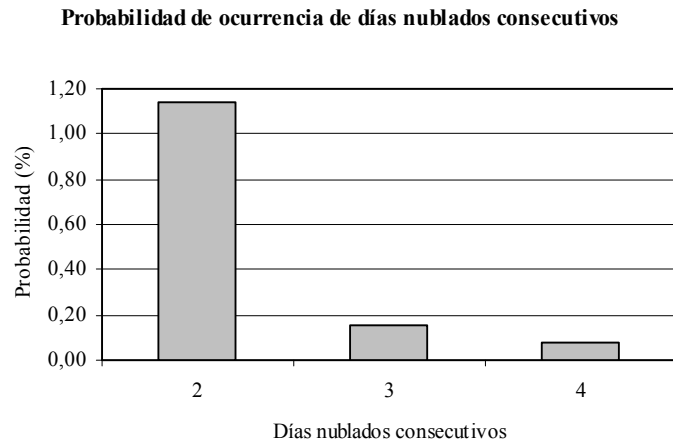


Figura 2. Probabilidad

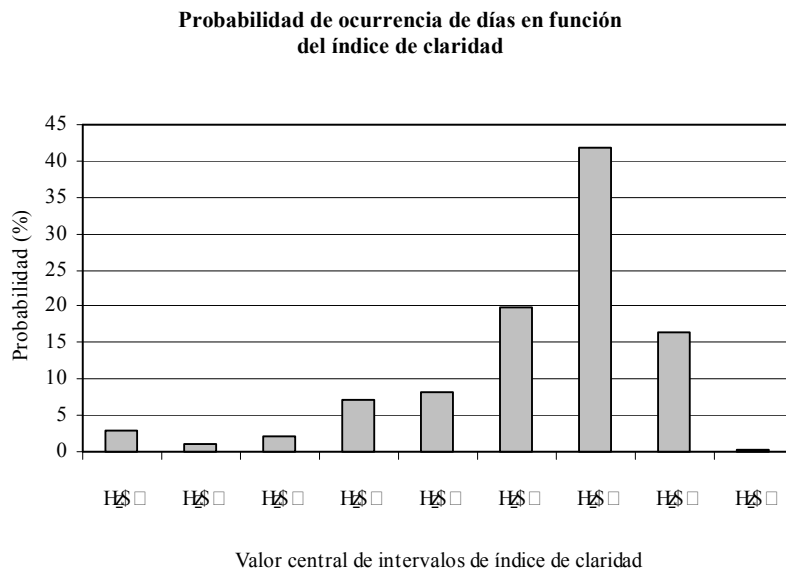


Figura 3. Probabilidad (%) anual de ocurrencia de valores diarios del índice de claridad ( $k_i$ ) en San Carlos clasificados en intervalos de 0,1.

## COMENTARIOS

La primera observación importante para destacar sobre los resultados hallados es que la energía solar media recibida anualmente sobre un plano horizontal en San Carlos es mayor que 1,8 MWh/m<sup>2</sup>, valor que lo hace atractivo para estas aplicaciones de generación.

Por lo que puede observarse, la probabilidad de ocurrencia de 2 días nublados consecutivos es muy baja: 1,14%; de 3 días consecutivos, 0,15% mientras que la de 4 días consecutivos es sólo de 0,08%. La probabilidad de ocurrencia de valores elevados del índice de claridad (días despejados) es de 60%, la de días seminublados de 36% y la de nublados de 4%.

Si se buscara conocer todos los valores medios mensuales de irradiación global con el mismo nivel de confianza (90%), deben recalcularse los errores absolutos asociados con los valores medios. Para ello se emplea la relación que vincula la

longitud de los registros ( $n$ ), el desvío estándar ( $\sigma$ ), la denominada *variable normal tipificada* ( $Z$ ) (García, 2004), y el error absoluto del valor medio ( $\varepsilon$ ) (Grossi Gallegos, 1998):

$$n \geq \left( \frac{Z \cdot \sigma}{\varepsilon} \right)^2$$

Los errores relativos que se desprenden de este cálculo se presentan en la Tabla 3.

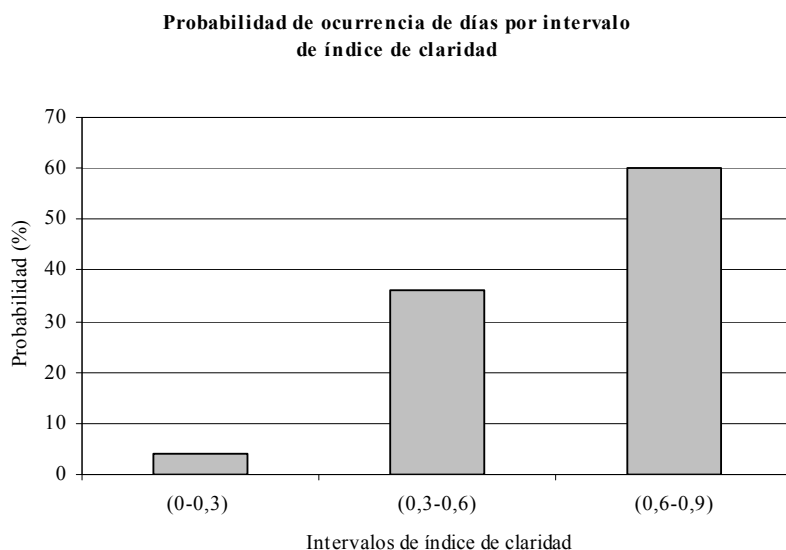


Figura 4. Probabilidad (%) anual de ocurrencia de valores diarios del índice de claridad ( $k_i$ ) en San Carlos clasificados en intervalos de 0,3.

	n° de meses	Cv	ER %
ENERO	5	0,16	11,8
FEBRERO	6	0,09	6,0
MARZO	6	0,07	4,7
ABRIL	9	0,20	11,0
MAYO	8	0,18	10,5
JUNIO	7	0,11	6,8
JULIO	7	0,14	8,7
AGOSTO	6	0,09	6,0
SEPTIEMBRE	6	0,14	9,4
OCTUBRE	5	0,16	11,8
NOVIEMBRE	4	0,08	6,6
DICIEMBRE	4	0,08	6,6

Tabla 3. Errores relativos asociados a los valores medios mensuales de irradiación global para el caso de requerirse para todos un nivel de confianza del 90%.

## CONCLUSIONES

La información disponible sobre los niveles de medición de la radiación solar en Argentina señala la zona noroeste del país como apropiada para la instalación de centrales de generación solar de energía eléctrica. En particular la zona de San Carlos, en Salta, resulta apropiada, debido a que la energía solar media recibida anualmente sobre un plano horizontal supera los 1,8

MWh/m<sup>2</sup>, lo cual representa un valor importante para este tipo de aplicaciones. Ese valor hallado es representativo de la situación debido a que los coeficientes de variabilidad de las medias mensuales son bajos, lo que permite concluir que los valores medios mensuales se mantienen dentro de una franja de  $\pm 6\%$  de la media poblacional (“media a largo plazo”). La cantidad de más de tres días nublados consecutivos es baja, y alta la probabilidad de ocurrencia de días con  $kt > 0,6$ , lo que refuerza la posición de San Carlos como zona particularmente atractiva para el aprovechamiento energético de la radiación solar.

La necesidad de continuar midiendo los niveles de radiación solar en las zonas propicias es evidente en general, y en particular, para el caso de San Carlos, los errores relativos de las medias mensuales evidencian cuáles meses requieren de una estadística mayor para disminuir la incerteza del valor medio. Futuras mediciones, tanto en este lugar como en otros potencialmente aptos para este tipo de aprovechamientos, deberán planificarse considerando una base temporal de integración de los valores instantáneos menor (horaria o cada diez minutos), emprendiendo simultáneamente la medición de la irradiación directa a incidencia normal, orientada a los posibles emprendimientos con concentración.

## REFERENCIAS

- García R. M. (2004) “Inferencia estadística y diseño de experimentos” EUDEBA, 1ra. Edición, Buenos Aires, 736 p.
- Grossi Gallegos H. (1998) Evaluación a nivel de superficie de la radiación solar global en la República Argentina, Tesis, Universidad Nacional de Luján, 183 pp.
- Grossi Gallegos H. y Righini R. (2007) “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).
- Raichijk C, Grossi Gallegos H, Righini R (2008) Cartas preliminares de irradiación directa para Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 12, pp. 11.01 -11.07 versión CD-ROM.
- Raichijk C, Grossi Gallegos H, Aristegui R, Righini R (2009) Sobre el recurso solar en la provincia de San Juan. En *Actas del Tercer Congreso Nacional – Segundo Congreso Iberoamericano Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía – HYFUSEN 2009* versión CD-ROM, versión CD-ROM, San Juan, Argentina.

**Abstract:** By different reasons, the use of renewable sources of energy for electrical generation has undergone an important growth anywhere in the world, being solar one of them. In particular, the installation of plants of solar photovoltaic or thermal generation of electricity appears like an activity that as much arouses an increasing interest at international level as local. The appropriate sites for their installation are those in which the levels of solar irradiation are elevated. In order to define its situation it is them necessary to analyze the few existing measurements. In the present work one of the most recommendable zone in Argentina for such aim is presented and identifying within her two stations that have a reasonable statistic. Solar radiation data of the station San Carlos are analyzed in particular.

**Key words:** global irradiation, statistical analysis, San Carlos.