

## Tema 11 - Radiación solar y clima

### ANÁLISIS DE DATOS DE LA RED SOLARIMÉTRICA PAMPEANA

**R. Righini, R. Aristegui.**

GERSolar, INEDES, Universidad Nacional de Luján, Av. Constitución y Ruta 5, (6700) Luján, Buenos Aires, Argentina – Tel. (54-02323) 423171 – e-mail: gersolar@yahoo.com.ar

**RESUMEN:** La red de estaciones de medición de radiación solar que el Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar), opera en la Pampa Húmeda (Argentina) funciona hace más de dos años. Sus diez estaciones brindan datos cada diez minutos, permitiendo calcular integrales horarias y diarias de los niveles de radiación solar global en plano horizontal. Se analiza aquí el funcionamiento de la red comparando medias mensuales con datos estimados por NASA. La consistencia de los datos es evaluada usando la heliofanía medida en cada sitio y empleando correlaciones entre datos provenientes de pares de estaciones.

Se estudia el peso que cada estación tiene en los mapas obtenidos por medio de kriging de la distribución de isolíneas de radiación. Dicha información permite evaluar de manera cuantitativa la importancia de cada estación.

El mecanismo de análisis empleado puede ser útil para, eventualmente, planificar la instalación de redes de medición con similares objetivos.

**Palabras clave:** Red solarimétrica, Pampa Húmeda, Argentina.

#### INTRODUCCIÓN

La red de medición de la radiación solar global que el Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar) ha instalado en la Pampa Húmeda Argentina lleva ya, en la mayoría de los sitios, dos años de medición. Los solarímetros usados son sensores piranométricos termoeléctricos Eppley (modelo 8-48: "Black & White) y Kipp&Zonen (modelos CM5 y CM3) y la mayoría con integradores NOVUS, de dos canales, que permiten almacenar las integrales cada diez minutos de los niveles de radiación solar en plano horizontal (Righini et al, 2010).

Los equipos se encuentran ubicados en estaciones meteorológicas pertenecientes al INTA (Paraná, Pergamino, Balcarce, Anguil, Marcos Juárez, General Villegas y Barrow), la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (Azul) y Concepción del Uruguay (Universidad Tecnológica Nacional). A ellas debe sumarse la estación de Luján. Son operadas en todos los casos por personal de esas instituciones, contando con el auxilio técnico y las calibraciones periódicas de los solarímetros por parte del GERSolar, grupo que procesa los datos mensuales y confecciona el mapa de distribución de la radiación solar media mensual en la zona de interés (Righini et al, 2012).

El conocimiento de los valores medios de los niveles de radiación solar reviste una importancia creciente. Por un lado los emprendimientos diversos de sistemas de aprovechamiento energético que utilicen esta fuente de energía como primaria han ido incrementándose a nivel mundial y localmente se han visto favorecidos por los alcances de la ley 26.190/06, que ha previsto alcanzar el 8% de la energía eléctrica total generada en el país mediante fuentes renovables. Un paso adelante en ese sentido lo ha constituido la resolución 108 de la Secretaría de Energía de la Nación que liberó al mercado de generación eléctrica de las pautas rígidas fijadas por la legislación mencionada, permitiendo que nuevos actores se sumen a la generación fotovoltaica de electricidad negociando el precio al que la energía será vendida en cada caso particular. Los sitios de instalación de estas plantas generadoras, su rendimiento potencial, y la discusión tarifaria sobre los costos de la energía inyectada al sistema eléctrico interconectado nacional, necesitan del conocimiento de la distribución espacio temporal de la variable solar para poder ser evaluados con propiedad.

Existen, además, otros sistemas de aprovechamiento energético. En tal sentido podemos citar sistemas de calentamiento de agua, por ejemplo, que permiten ahorrar combustibles fósiles o, en algunos casos, suplantarlos.

En el ámbito de la biología, el conocimiento de una fuente primaria de energía, tal como lo es la radiación solar, es fundamental en la evaluación de aquellos sistemas biológicos que requieran de la energía de entrada al sistema como información relevante.

Por último, también resulta importante evaluar la distribución espacio-temporal del recurso solar habida cuenta de un posible proceso de cambio climático, el que inevitablemente sería reflejado por ella.

Por lo tanto la existencia de una red solarimétrica en la zona de mayor nivel de producción agrícola ganadera del país, de mayor actividad industrial y en la cual se asienta el grueso de la población nacional, reviste una gran importancia. Para

asegurar su correcto funcionamiento y la calidad de la información suministrada, es necesario analizar la representatividad de los datos obtenidos. De igual forma, el estudio de las correlaciones existentes entre los datos de las diversas estaciones ayudará, tanto a evaluar la calidad de la información que está siendo recolectada como a detectar en un futuro posibles problemas relacionados con datos espurios provenientes de fallas asociadas con el equipamiento instalado.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En la primera parte de este trabajo se compararán los valores medios mensuales obtenidos para cada una de las estaciones de la red con los estimados por NASA mediante el algoritmo de cálculo SRB, un modelo físico de transferencia radiativa, variación del originalmente desarrollado por Pinker y Laszlo (Pinker y Laszlo, 1992). NASA ha aplicado ese modelo a imágenes GOES durante el período 1983-2005. Si bien es cierto que los valores medios mensuales calculados por NASA y medidos por la red de la UNLu no deben ser necesariamente coincidentes ya que se trata de series distintas, un gran apartamiento de entre los estimados y los medidos podría indicar la existencia de problemas en el funcionamiento de la red. Por otro lado los valores medios anuales provenientes de ambas fuentes no debieran diferir significativamente (Wilcox y Gueymard, 2010; Grossi Gallegos y Righini, 2011). En efecto, ambos artículos muestran que bastan, generalmente, un par de años de mediciones de radiación solar global para determinar con un error pequeño el valor medio anual.

Para efectuar la comparación se bajaron datos de Nasa (<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?+s01#s01>, para el período 1983-2005.) El algoritmo usado evalúa el error cometido entre un 6 y un 12%, en valores medios mensuales.

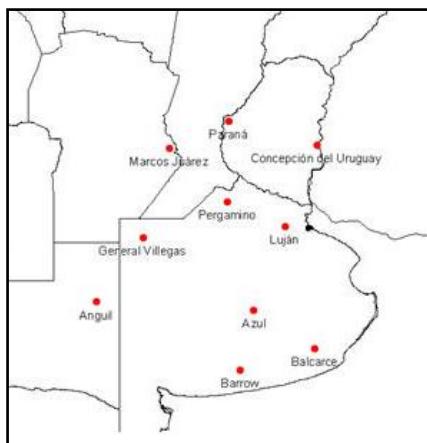


Figura 1: Red de estaciones solarimétricas pertenecientes al GERSolar.

La consistencia de los datos brindados por la red fue corroborada cotejando valores de heliofanía diarios contra los datos solarimétricos de cada una de las estaciones.

Se estudiaron, posteriormente, las correlaciones entre valores diarios medios mensuales, valores diarios y valores horarios para cada uno de los pares de estaciones que tenían series de datos coincidentes en el tiempo. El objetivo fue tratar de hallar por medio de las mismas una evaluación al funcionamiento de la red y eventualmente utilizar las correlaciones entre datos para suplir la pérdida parcial de una estación o detectar mediciones inconsistentes.

Luego se analizaron los desvíos entre valores diarios medios mensuales históricos provenientes de la base de datos que la antigua red solarimétrica proveyó y valores diarios medios mensuales provenientes de la red de la UNLu, en aquellas estaciones donde los hubiese disponibles.

Por último se verificó el peso estadístico que cada estación tiene en el trazado de las cartas de radiación media mensual, tanto para los meses de Enero y Julio, así como para el valor medio anual. Este proceso permite conocer la importancia que cada estación tiene en el trazado de las isolíneas de radiación solar, pensando de manera cuantitativa su representatividad en la red. En todos los casos se analizaron datos correspondientes a los meses de Enero, Junio y los valores anuales en cada uno de los sitios de la red donde esos valores se encontraban disponibles.

## RESULTADOS

### Comparación de estimaciones de NASA con datos de la Red solarimétrica de UNLu.

Las cartas siguientes muestran los mapas correspondientes a los valores diarios medios mensuales de los meses de Enero y Junio y al valor diario medio anual de la irradiación solar global a nivel de la superficie terrestre en la zona analizada.

En cada gráfico, a la izquierda se representan las cartas trazadas con los datos aportados por el modelo SRB, aplicado al período 1983-2005, calculado por NASA. A la derecha, las cartas trazadas con los datos provenientes de la red de medición de radiación solar de la UNLu. Tanto para las cartas de NASA como para las de la red se usó kriging como método de interpolación para el trazado de las isolíneas.

La tabla 1 resume los desvíos de las medias mensuales y anuales en cada estación, tomando como referencia los datos de NASA.

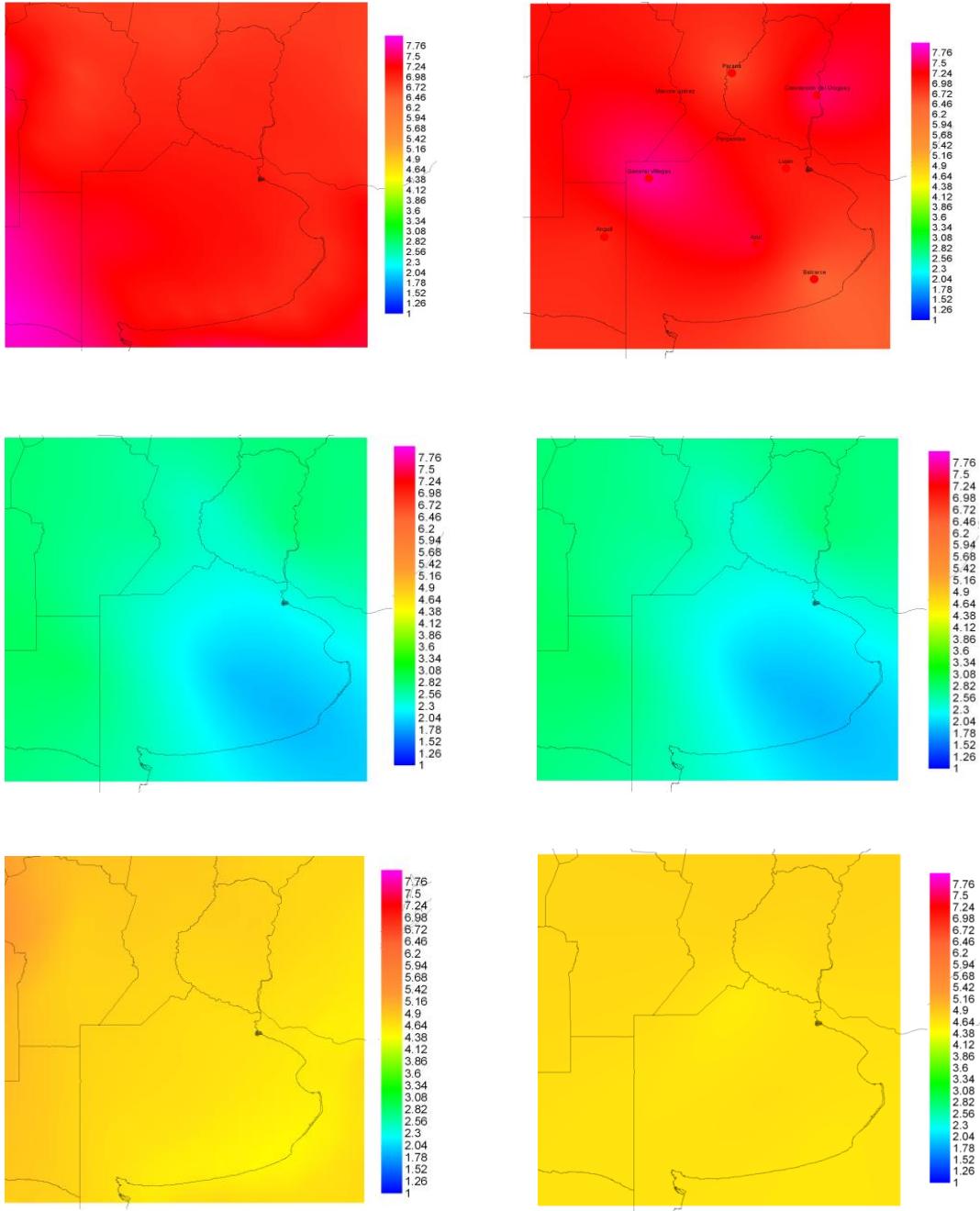


Figura 2: Mapas de valores diarios medios de radiación solar global trazados con datos de NASA (izquierda) y con datos de la red de medición de la UNLu (derecha). Arriba: Enero. Centro: Junio. Abajo: media anual. ( $\text{kWh/m}^2$ ).

En términos generales puede concluirse que la red está brindando valores medios aceptables si se los compara con la estimación de NASA. Los valores medios anuales, salvo para Pergamino, presentan un desvío cuadrático medio respecto a los datos de Nasa inferiores al 4%. Pergamino exhibe un comportamiento singular al respecto, ya que el valor medio se desvía en un 10,7%. No obstante la base de datos de Pergamino es de muy corta extensión y no se tienen registros de los meses de enero, marzo y mayo, por lo cual es razonable que el valor medio anual difiera significativamente de los datos estimados por NASA.

| Celda                  |            |             | Diferencia Nasa |            |             |              | Diferencia Nasa |             |               |  | Diferencia Nasa |  |
|------------------------|------------|-------------|-----------------|------------|-------------|--------------|-----------------|-------------|---------------|--|-----------------|--|
|                        | Nasa Enero | Luján Enero | Luján % Enero   | Nasa Junio | Luján Junio | Luján% Junio | Nasa Anual      | Luján Anual | Luján % Anual |  |                 |  |
| Anguil                 | 7,5        | 6,97        | 7,1             | 2,08       | 2,85        | 36,8         | 4,83            | 4,62        | 4,3           |  |                 |  |
| Azul                   | 7,19       | 7,41        | 3,1             | 2,055      | 1,94        | 5,5          | 4,66            | 4,81        | 3,2           |  |                 |  |
| Balcarce               | 7,04       | 6,44        | 8,5             | 1,97       | 1,87        | 4,8          | 4,52            | 4,54        | 0,5           |  |                 |  |
| Concepción del Uruguay | 6,96       | 7,59        | 9,1             | 2,38       | 2,81        | 18,0         | 4,75            | 4,95        | 4,4           |  |                 |  |
| General Villegas       | 7,255      | 7,74        | 6,7             | 2,21       | 2,51        | 13,4         | 4,76            | 4,82        | 1,3           |  |                 |  |
| Luján                  | 7,07       | 7,00        | 1,0             | 2,22       | 2,21        | 0,3          | 4,66            | 4,58        | 1,8           |  |                 |  |
| Marcos Juárez          | 6,94       | 7,26        | 4,6             | 2,46       | 2,64        | 7,2          | 4,81            | 4,72        | 1,8           |  |                 |  |
| Paraná                 | 6,915      | 6,63        | 4,1             | 2,425      | 2,40        | 1,0          | 4,80            | 4,89        | 2,0           |  |                 |  |
| Pergamino              |            |             |                 | 2,26       | 2,33        | 3,2          | 4,71            | 4,21        | 10,7          |  |                 |  |

Tabla 1: Diferencias porcentuales entre datos calculados por Nasa y los medidas por la Red de la UNLu.

Las diferencias entre lo estimado por NASA y lo medido por la red para el mes de Junio en las localidades de Anguil, Concepción del Uruguay y General Villegas son grandes. Debido a que las series históricas tienen bases de tiempo muy diferentes no deben, necesariamente, coincidir. Por otro lado en el mes de Junio la radiación es baja, por lo cual el error relativo puede crecer significativamente. No obstante, las acusadas diferencias para estas estaciones (en particular para Anguil) debieran considerarse una advertencia sobre el funcionamiento de la red en esos sitios y evaluar la confiabilidad de esas mediciones recurriendo a otros mecanismos.

#### Correlación entre datos de radiación provenientes de pares de estaciones.

Un análisis que puede resultar interesante consiste en correlacionar datos entre pares de estaciones. Si se analizan datos diarios y valores medios mensuales y se hallan correlaciones que resulten significativas, las mismas pueden resultar de utilidad. En efecto, ante la ausencia de datos de una de las estaciones puede inferírselo de otra y, de esa manera, completar la base de datos necesaria para abordar el trazado de las cartas mensuales de radiación. También este tipo de correlaciones puede permitir detectar datos erróneos, ya que si algún dato proveniente de una determinada estación resulta sospechoso, puede definirse su validez comparándolo del que surge del estimado con los de otra estación con la que guarde una fuerte correlación.

La dependencia de los coeficientes de correlación lineal entre pares de estaciones con la distancia entre las mismas puede también dar cuenta de características regionales del campo de radiación.

En los gráficos siguientes se muestran, a modo de ejemplo, correlaciones para valores diarios y medios mensuales de datos de radiación solar global provenientes de la red regional.

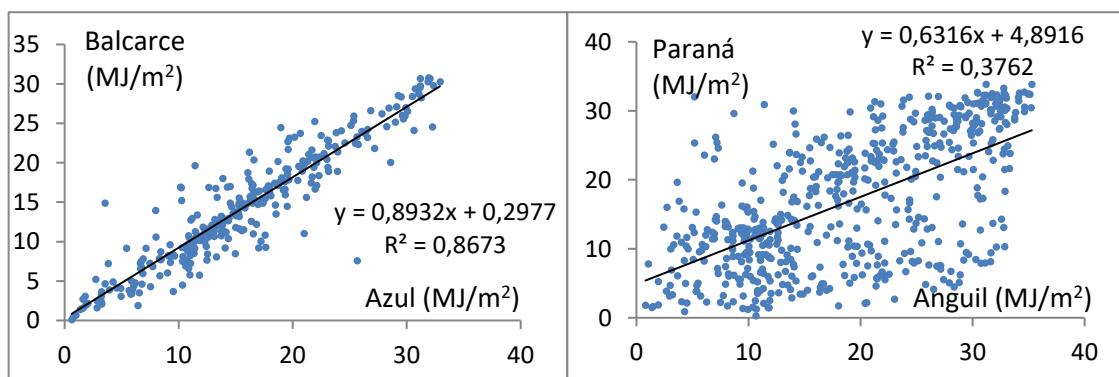


Figura 3: Correlaciones entre datos diarios de radiación de las estaciones Balcarce y Azul (izquierda) y Paraná y Anguil (derecha).

Es notable aquí como estaciones separadas por considerable distancia, como Paraná y Anguil, presentan una mayor dispersión en los datos diarios, como era de esperar. Por el contrario, Azul y Balcarce presentan un alto coeficiente de correlación, producto de la cercanía entre ambas.

La correlación hallada en casos como el de Balcarce o Azul (donde el  $R^2$  es elevado) puede emplearse cuando mediciones de alguna de las dos estaciones, Balcarce o Azul, sean particularmente dudosas (o todos los registros correspondientes a un mes). En este tipo de casos puede usarse la otra estación para confirmar su validez o, de ser pertinente la decisión, descartar las mediciones que correspondan.

La figura 4 muestra los coeficientes de correlación para datos diarios de todos los pares de estaciones, presentados en función de la distancia entre las mismas.

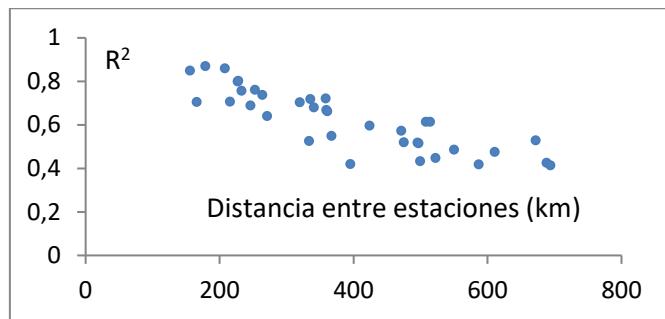


Figura 4: Coeficientes de correlación entre datos diarios de pares de estaciones en función de la distancia.

Es notable ver cómo la correlación entre los datos diarios de estaciones cae a medida que la distancia entre las mismas aumenta. Este hecho es esperado, ya que los datos, necesariamente se descorrelacionan a medida que los puntos de medición se alejan (Grossi Gallegos y Lopardo, 1988). El comportamiento, para datos medios mensuales, considerando también datos de estaciones tomadas de a pares puede, sin embargo, no presentar la misma característica respecto al coeficiente de correlación. En efecto, al estar todas las estaciones de la red en aproximadamente la misma zona climática (Pampa Húmeda), es de esperar que los valores medios mensuales de radiación sean similares, por lo cual los coeficientes deben permanecer relativamente independientes de la distancia entre pares de estaciones. Este hecho se muestra claramente en la figura 5.

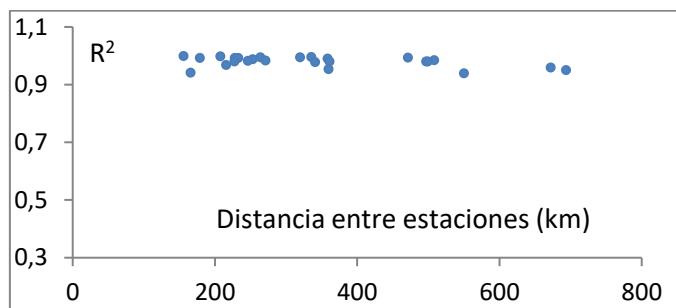


Figura 5: Coeficientes de correlación entre datos medios mensuales de pares de estaciones en función de la distancia.

Lo anteriormente expuesto sugiere un funcionamiento aceptable de la red, tomando como parámetro las medias mensuales de radiación solar. Si hubiese una descorrelación significativa entre algún par de estaciones para los meses analizados claramente sería visible y esos valores debieran revisarse para tratar de evaluar la existencia de algún tipo de error en la medición de la radiación. El hecho que no la haya indica coherencia en las mediciones realizadas.

También se muestra, en la figura 6, un análisis de la correlación entre valores diarios de radiación global entre las estaciones de Luján y Pergamino. Aquí la dispersión puede ser amplia, pero el coeficiente de correlación lineal es significativo. Aunque las dispersiones de datos horarios siempre son mayores que las correspondientes a valores diarios o medias mensuales, un análisis de la información permitiría predecir, en algunos casos, la radiación en una localidad en función de la medida en otra, estudiando un posible desfasaje temporal entre las mediciones de ambas estaciones. El estudio de esos desfasajes temporales puede llegar a ser importante en un futuro cercano, cuando deba preverse con cierta antelación la cantidad de energía que producirán plantas fotovoltaicas integradas al sistema interconectado nacional. De hecho en algunos países este tipo de análisis se considera importante. Uruguay, para su futura planta de generación fotovoltaica, está tratando de prever los niveles de radiación con una anticipación del orden de los 30 minutos. (Alonso Suárez et al., 2012).

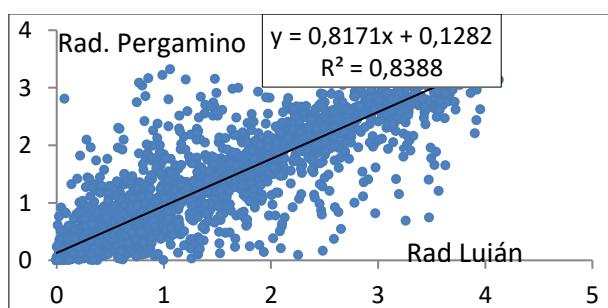


Figura 6: Correlación entre datos horarios medidos en las estaciones Pergamino y Luján. Las unidades de ambos ejes están en MJ/m<sup>2</sup>.

En un futuro cercano, cuando la red regional acumule mayor cantidad de información, los datos permitirán realizar una primera evaluación en ese sentido.

*Consistencia de los datos en base a la heliofanía relativa.*

La heliofanía relativa media mensual está relacionada con las medias mensuales de los coeficientes de transparencia atmosférica (kt). Lo usual es considerar.

$$k_t = a \cdot H_r + b$$

Donde  $H_r$  es la heliofanía relativa (horas de Sol/horas teóricas de Sol) y  $a$  y  $b$  son los coeficientes de ajuste de la ecuación lineal (Ångström, 1924). Sin embargo, los valores diarios de ambas pueden ser utilizados para depurar datos de radiación solar global (Roberti et al., 2000). Esa dependencia entre ambas variables también es lineal para valores diarios, si bien el coeficiente de correlación es menor.

En la tabla 2 se muestran las correlaciones diarias entre  $k_t$  y heliofanía relativa para cada estación (donde se midan ambas variables) y mes considerado

| Estación       | Ene             | Feb             | Mar             | Abr             | May             | Jun             | Jul             | Ago             | Sep             | Oct             | Nov             | Dic             |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Azul           | 0,83;0,83<br>;1 | 0,87;0,87<br>;1 | 0,93;0,93<br>;1 | 0,78;0,78<br>;1 | 0,81;0,81<br>;1 | 0,88;0,88<br>;1 | 0,88;9,88<br>;2 | 0,94;0,8<br>;2  | 0,69;0,42<br>;2 | 0,85;0,85<br>;2 | 0,87;0,87<br>;1 |                 |
| C. del Uruguay |                 |                 |                 |                 | 0,93;0,93<br>;1 | 0,72;0,72<br>;1 |                 | 0,86;0,86<br>;1 | 0,93;0,93<br>;1 |                 |                 |                 |
| Anguil         | 0,91;0,88<br>;2 | 0,76;0,46<br>;2 | 0,79;0,77<br>;2 | 0,74;0,71<br>;2 | 0,85;0,83<br>;2 | 0,93;0,93<br>;1 | 0,80;0,85<br>;1 | 0,89;0,87<br>;2 | 0,64;0,1<br>;1  | 0,73;0,64<br>;2 | 0,93;0,8<br>;2  | 0,88;0,6<br>;2  |
| Paraná         | 0,83;0,25<br>;2 | 0,96;0,44<br>;2 |                 |                 | 0,56;9,56<br>;1 | 0,86;0,82<br>;2 | 0,92;0,36<br>;2 | 0,94;0,35<br>;2 | 0,94;0,6<br>;2  | 0,97;0,95<br>;2 | 0,91;0,90<br>;2 | 0,94;0,82<br>;2 |
| Balcarce       | 0,92;0,87<br>;2 | 0,89;0,89<br>;2 | 0,91;0,82<br>;2 | 0,95;0,95<br>;1 | 0,87;0,87<br>;1 | 0,93;0,93<br>;1 | 0,9;0,9<br>;1   | 0,89;0,89<br>;1 | 0,67;0,53<br>;2 | 0,80;0,73<br>;2 |                 | 0,86;0,86<br>;1 |
| Pergamino      | 0,87;0,05<br>;3 | 0,89;0,89<br>;1 | 0,71;0,71<br>;1 | 0,9;0,86;<br>2  | 0,86;0,86<br>;1 | 0,93;0,89<br>;2 | 0,9;0,86<br>;2  | 0,91;0,9<br>;2  | 0,89;0,83<br>;2 | 0,95;0,82<br>;2 | 0,88;0,74<br>;2 | 0,93;0,64<br>;2 |
| Marcos Juárez  | 0,92;0,89<br>;2 | 0,95;0,46<br>;2 | 0,9;0,9<br>;1   | 0,94;0,94<br>;1 | 0,93;0,89<br>;2 | 0,92;0,92<br>;1 | 0,94;0,92<br>;2 | 0,93;0,93<br>;2 | 0,94;0,94<br>;1 | 0,91;0,91<br>;1 | 0,91;0,91<br>;1 | 0,8;0,8<br>;1   |

Tabla 2: Coeficientes de correlación lineal entre  $k_t$  y heliofanía relativa para datos diarios de las estaciones de la red solarimétrica. Se muestran los valores máximo, mínimo y la cantidad de meses considerados.

La tabla 2 revela correlaciones, en general, aceptables entre radiación y heliofanía en base diaria, mostrando en principio un buen funcionamiento de la red de medición. Sin embargo algunos meses presentan valores inaceptablemente bajos del coeficiente de correlación lineal entre ambas variables. Esto puede indicar problemas en las mediciones, ya sea de heliofanía o de radiación. Como ejemplo, la figura 5 muestra datos de heliofanía relativa y  $k_t$  en dos casos extremos. Si bien es cierto que la relación lineal tiene validez para valores medios mensuales, a nivel diario también debe darse una correlación lineal, si bien la cantidad porcentual de datos explicados por la correlación debe ser menor.

El análisis de los datos en los casos en que hay valores muy bajos del coeficiente de correlación lineal indica la necesidad de observar puntualmente algunos días particulares en determinadas estaciones. En esos casos se usa la correlación entre datos de radiación de la estación cuestionada y otra que se ubique a una distancia relativamente cercana. Así puede determinarse cuál de las variables (heliofanía o radiación) resultó mal medida en cada caso en particular. Cuando la medición de radiación en la estación cercana resultó ser muy diferente, se consideró correcta la medición de heliofanía; en el caso en que ambas mediciones de radiación resultaron ser similares, se consideró como incorrecta la medida de la heliofanía. En algunos casos no fue posible determinar la fuente de error, por lo que los datos de radiación no pudieron ser depurados, pero fueron tomados en cuenta. Ello ocurre cuando el coeficiente de correlación lineal entre datos de radiación de ambas estaciones es similar al que existen entre la heliofanía relativa y el  $k_t$  en la estación cuyos datos son cuestionados. En ese caso no es posible determinar la fuente de error.

Empleando este mecanismo de depuración, fue posible descartar o completar algunas mediciones. La tabla 3 resume las variaciones del coeficiente de correlación lineal entre  $k_t$  y heliofanía relativa para los meses cuyos datos fueron depurados en las estaciones indicadas.

La baja correlación lineal entre heliofanía relativa y  $k_t$  para Anguil no pudo ser resuelta por el mecanismo de depuración. Por esa causa el equipo fue cambiado a principios del presente año por otro recalibrado.

| Estación y mes                 | R <sup>2</sup> original | R <sup>2</sup> depurado |
|--------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Azul<br>Septiembre 2012        | 0,69                    | 0,91                    |
| Balcarce<br>Septiembre<br>2012 | 0,67                    | 0,91                    |
| Balcarce<br>Octubre<br>2012    | 0,73                    | 0,93                    |
| Pergamino<br>Diciembre<br>2012 | 0,64                    | 0,93                    |

Tabla 3: Coeficientes de correlación lineal entre heliofanía relativa y kt recalculados luego de la depuración de datos.

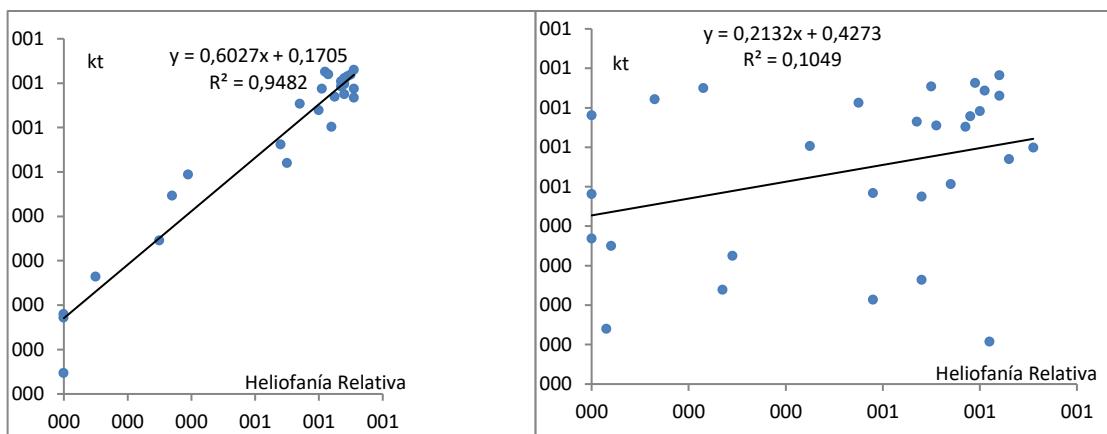


Figura 7: Correlaciones halladas entre kt y heliofanía relativa en dos casos extremos: izquierda: Marcos Juárez, Febrero de 2013; derecha: Anguil, Septiembre de 2012.

Igual acción se llevará a cabo con Pergamino, cuyos valores, a pesar de ser consistentes, se revelan como bajos respecto a las estaciones circundantes. Un reemplazo del solarímetro allí instalado y el monitoreo de los datos que el nuevo brinde permitirán conocer si la baja radiación medida es debida a una característica climática local o, en cambio, fue ocasionada por un mal funcionamiento del sensor.

*Peso relativo de cada estación en el trazado de los mapas de isolíneas.*

El peso que cada estación tiene puede ser evaluado quitando cada una de ellas en el trazado del campo de radiación que se realiza por medio del kriging. De esa manera es posible determinar la incidencia que cada estación tiene en el mapa regional y, así, evaluar si se encuentra convenientemente ubicada.

Para analizar el peso se procedió a eliminar los datos provenientes de cada una de las estaciones de la red para los meses de Enero, Junio y la media anual.

En cada uno de los casos, una vez que una estación fue eliminada de la base de datos se procedió al trazado de las cartas empleando kriging como método de interpolación.

También se efectuó un análisis cuantitativo. En efecto, las matrices, que calculan por interpolación la radiación en cada uno de los nodos de la grilla de datos (usada para trazar las isolíneas de los mapas), son aptas para cuantificar el peso de cada estación. Usando como base la grilla calculada con datos de todas las estaciones, se puede evaluar la diferencia porcentual de los valores de radiación interpolados en los nodos de las grillas que resultan de sacar cada una de las estaciones.

En primer lugar se trazaron mapas considerando todas las estaciones y luego eliminando cada una de ellas para los meses de Enero, Junio y la media anual de radiación solar media diaria. A modo de ejemplo la figura 8 muestra los resultados para la media anual.

Las tablas 4, 5 y 6 resumen cuantitativamente las diferencias porcentuales absolutas máximas, mínimas y medias para todos los nodos de la grilla de interpolación, sacando cada una de las estaciones indicadas para su construcción por kriging.

|                 | Sin<br>Anguil | Sin<br>Azul | Sin<br>Balcarce | Sin<br>Concepción | Sin<br>Luján | Sin<br>Marcos Juárez | Sin<br>Pergamino | Sin<br>Villegas | Sin<br>Paraná |
|-----------------|---------------|-------------|-----------------|-------------------|--------------|----------------------|------------------|-----------------|---------------|
| <b>Máximo</b>   | 18,4          | 9,0         | 9,0             | 20,3              | 5,9          | 6,5                  | 5,6              | 5,2             | 11,7          |
| <b>Mínimo</b>   | 0,0           | 0,0         | 0,0             | 0,0               | 0,0          | 0,0                  | 0,0              | 0,0             | 0,0           |
| <b>Promedio</b> | 3,9           | 1,5         | 1,4             | 4,6               | 1,3          | 1,7                  | 1,3              | 1,6             | 2,4           |
|                 | Sin<br>Anguil | Sin<br>Azul | Sin<br>Balcarce | Sin<br>Concepción | Sin<br>Luján | Sin<br>Marcos Juárez | Sin<br>Villegas  | Sin<br>Paraná   |               |
| <b>Máximo</b>   | 10,6          | 8,1         | 13,9            | 12,2              | 5,0          | 2,7                  | 7,4              | 11,4            |               |
| <b>Mínimo</b>   | 0,0           | 0,0         | 0,0             | 0,0               | 0,0          | 0,0                  | 0,0              | 0,0             |               |
| <b>Promedio</b> | 1,6           | 1,2         | 1,5             | 2,3               | 0,8          | 0,5                  | 1,1              | 1,8             |               |
|                 | Sin<br>Anguil | Sin<br>Azul | Sin<br>Balcarce | Sin<br>Concepción | Sin<br>Luján | Sin<br>Marcos Juárez | Sin<br>Pergamino | Sin<br>Villegas | Sin<br>Paraná |
| <b>Máximo</b>   | 4,2           | 6,2         | 5,1             | 5,3               | 0,2          | 0,0                  | 3,9              | 5,6             | 3,9           |
| <b>Mínimo</b>   | 0,0           | 0,0         | 0,0             | 0,0               | 0,0          | 0,0                  | 0,0              | 0,0             | 0,0           |
| <b>Promedio</b> | 1,0           | 0,9         | 1,0             | 1,0               | 0,0          | 0,0                  | 0,7              | 0,7             | 0,7           |

Tablas 4, 5 y 6: Diferencias porcentuales absolutas máximas, mínimas y promedios, para los nodos de las grillas de interpolación calculadas por kriging. Arriba: Junio. Medio: Enero. Abajo: valores anuales.

En todos los casos las diferencias mayores entre valores de radiación interpolados por kriging se dieron en las estaciones que fueron sacadas para el cálculo. Es decir que ninguna estación está erróneamente situada, si se considera que los datos que brinda no pueden ser calculados simplemente empleando kriging.

Como es de esperar, en los meses de invierno, por ser menor los valores de radiación, las diferencias porcentuales crecen significativamente, mientras que para las medias anuales, los valores bajan.

Una de las estaciones cuyos datos resultan de particular importancia es Anguil. Las cartas de Enero, Junio y la anual presentan variaciones importantes cuando los datos de esa estación en particular no son tomados en cuenta. Anguil se encuentra en el límite de la zona que delimita la Pampa Húmeda. Medir allí es importante para determinar con precisión el comportamiento de las isolíneas del campo de radiación.

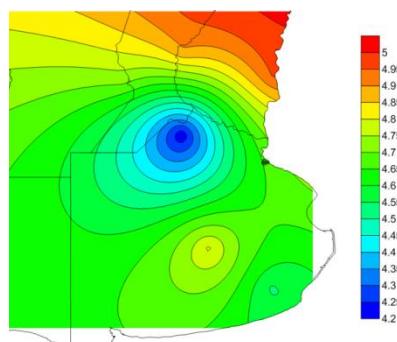
Concepción y Paraná también se revelan como estaciones importantes para el trazado de las cartas y pueden considerarse bien ubicadas.

Luján y Azul aparecen, como estaciones que tienen una importancia relativamente menor. En particular Azul, por su ubicación geográfica y su comportamiento similar a la estación Balcarce no es excesivamente relevante en el trazado de los mapas de isolíneas para los meses analizados y para los valores anuales. No obstante sería prematuro descartarlas sin estudiar su influencia en los meses del año restantes y acumular una cantidad más importante de datos provenientes de las mismas que permitiesen llegar a inferencias de mayor peso estadístico.

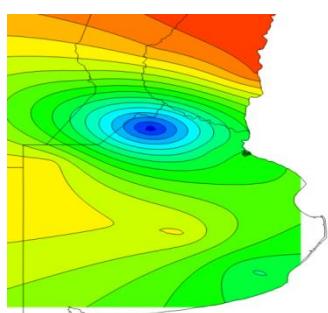
## CONCLUSIONES

El análisis de la red solarimétrica de la Pampa Húmeda argentina muestra que, en principio, los valores que se encuentra entregando la red están dentro de lo que puede esperarse para la zona. La comparación anual entre los datos de la red y los de NASA, revela diferencias menores entre los datos estimados para cada una de las estaciones y los medidos en ellas.

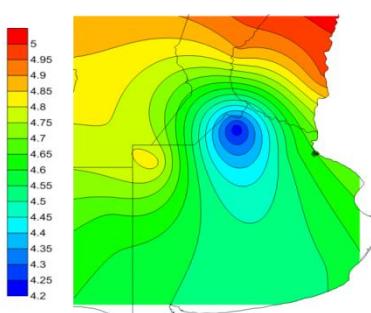
Las correlaciones existentes entre los valores medios mensuales corroboran el buen funcionamiento de la red: el conjunto presenta una homogeneidad climática, lo cual debe verse reflejado, tal como ocurre, en la zona en la cual se encuentran instalados los sensores.



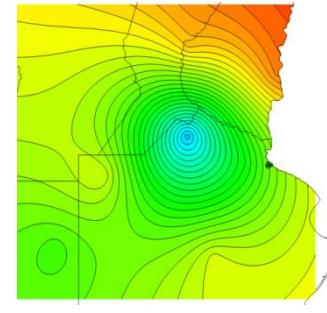
Anual todas



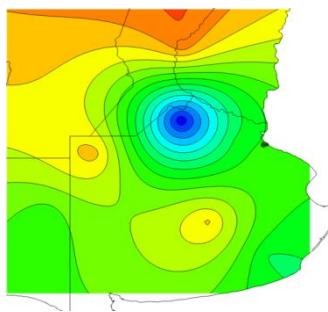
Anual sin Anguil



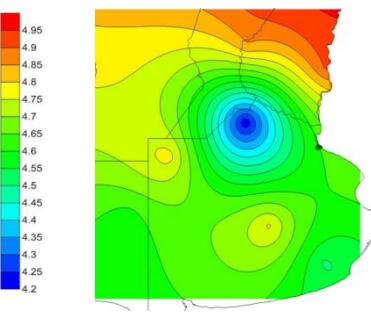
Anual sin Azul



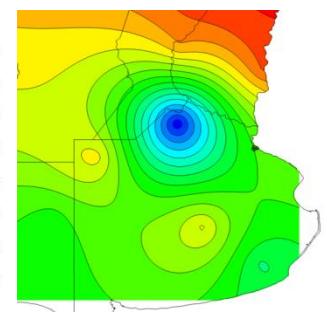
Anual sin Balcarce



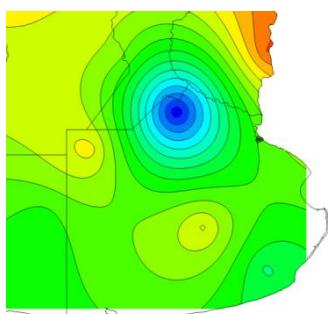
Anual sin Concepción



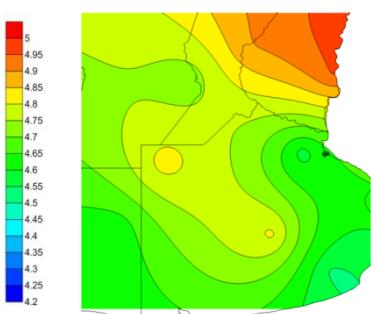
Anual sin Luján



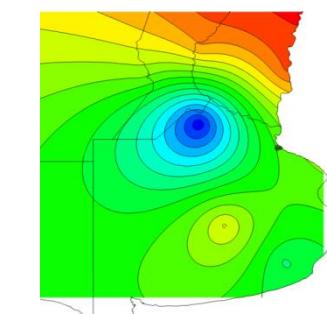
Anual sin Marcos Juárez



Anual sin Paraná



Anual sin Pergamino



Anual sin Villegas

Figura 8: Mapas de radiación solar media anual trazados con todas las estaciones de la red y sacando sucesivamente una de ellas.

Las correlaciones entre valores diarios de radiación solar global para estaciones, se revelan, tal como debía esperarse, dependientes de la distancia y resultan útiles para el proceso de depuración de datos, lo cual, juntamente con datos de heliofanía, permite detectar anomalías en las mediciones y depurar la base de datos.

La correlación entre valores horarios para diferentes estaciones permitirá, en un futuro cercano, estudiar mecanismos de pronóstico a corto plazo de los niveles de radiación solar dentro de la zona analizada, acción que adquirirá una importancia creciente a medida que se incremente la potencia instalada e inyectada a las redes públicas por medio de sistemas de generación fotovoltaica de electricidad.

El análisis sobre el peso que cada una de las estaciones de medición tiene en el trazado de las cartas medias de radiación solar en base mensual y anual constituye una herramienta importante para determinar la correcta ubicación de las estaciones y, en algunos casos, considerar su traslado a otros sitios geográficos dentro de la zona que ameriten la medición *in situ*. El proceso de sacar cada una de las estaciones y recalcular las matrices usadas para el trazado de isolíneas mediante kriging se revela como una herramienta extrapolable a otras redes, presentes o futuras. Vale la pena aclarar que ese mecanismo difiere del co-kriging, en el cual se recalcula el valor interpolado solamente en la propia estación extraída del conjunto de datos.

Una opción para seleccionar correctamente los sitios de una red futura puede comenzar con el primer paso de evaluar, mediante un algoritmo como el que NASA usa para la presentación de estimaciones de la radiación solar a nivel de la superficie terrestre, la ubicación posible de las estaciones, quitando sucesivamente los puntos donde se encuentran los datos usados para luego de calcular las matrices de interpolación por kriging, evaluar las diferencias con la matriz original calculada con todos los puntos disponibles. La relevancia de cada sitio en su relación con el resto de la red podrá ser cuantificada de esa forma, en primera instancia, lo que sumado a la variabilidad del recurso y a la existencia de zonas agroclimáticas y fitogeográficas diferenciadas brindará información importante para la selección de los sitios apropiados para la medición.

## REFERENCIAS

Alonso Suárez R., Abal G., Siri R., Musé P. (2012) Brightness-dependent Tarpley model for global solar radiation estimation using GOES satellite images: Application to Uruguay. *Solar Energy* vol. 86 (11), 3205-3215.

Ångström A. (1924). Solar and terrestrial radiation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 50. pp 121-125.

Grossi Gallegos, H. and Lopardo, R. (1988) Spatial variability of the global solar radiation obtained by the Solarimetric Network in the argentine Pampa Húmeda. *Solar Energy* vol. 40 (5), 397-404.

Grossi Gallegos H. y Righini R. (2011) Acerca de la representatividad de los valores de radiación solar global medidos por la red solarimétrica en la Pampa Húmeda. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* (ISSN 0329-5184) vol. 15, pp. 11.33-11.40.

Pinker R. y Laszlo I. (1992). Modeling surface solar irradiance for satellite applications on a global scale. *J. Appl. Meteor.* Vol 31. pp 194 – 211.

Righini R., Roldán A., Grossi Gallegos H., Raichijk C., Nueva red de estaciones de medición de la radiación solar. Comunicación. ASADES 2010, en Cafayate (Salta), Argentina, del 15 al 19 de noviembre de 2010

Righini R., Roldán A., Aristegui R., Benítez E.. Estado actual de la red de medición de la radiación solar del GERSolar. Comunicación. ASADES 2012, en Rosario (Santa Fé), Argentina, del 23 al 27 de octubre de 2012.

Roberti A., Renzini G. y Grossi Gallegos H., Desarrollo de un software capaz de correlacionar y consistir datos de radiación solar y heliofanía. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 4 N° 2, pp. 11.37-11.38 (2000).

Wilcox, S. and Gueymard, C. (2010) Spatial and Temporal Variability of the Solar Resource in the United States. In ASES SOLAR 2010 Conf. Proc., Phoenix, AZ

**ABSTRACT:** The solar radiation stations measuring network, operating for Research Group of Solar Radiation (GERSolar), has in the humid Pampas Argentina is two years of operation. Ten stations provide data every ten minutes, and the hourly and daily global solar radiation integral levels in the horizontal plane. Here we analyze the correlations between the values measured by the seasons and monthly averages. These values are compared with data estimated by NASA. The consistency of the data is analyzed using heliophany and correlations between pairs of stations.

We analyze the weight that each station has in the radiation isolines maps. This information enables quantitatively evaluate the importance of each station and also to determine the most appropriate sites for future facilities measuring stations. The analysis mechanism used may be useful to eventually plan to install networks measurement with similar objectives.

**KEYWORDS:** Solar network, Pampa Húmeda, Argentina.