

## TRAZADO DE MAPAS MEDIOS ANUALES DE ENERGÍA SOLAR GLOBAL, DIRECTA, DIFUSA Y TILT, USANDO LA BASE DE DATOS DE SWERA. CASO DE ESTUDIO: PROVINCIAS DE SALTA Y JUJUY.

R. Laspiur<sup>1</sup>, G. A. Salazar<sup>1,2</sup>, J. Zerpa, M. Watkins<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Física – Facultad de Ciencias Exactas – U.N.Sa.

<sup>2</sup>INENCO

Avda. Bolivia 5150 – CP A4408FVY – Salta Capital – Salta - Argentina

Tel./Fax +54-387-4255489

<sup>3</sup>Facultad de Ciencias Exactas y Naturales – Universidad Nacional de Catamarca

Av. Belgrano 300 – 4700, Catamarca, Argentina

e-mail: [salazarg@unsa.edu.ar](mailto:salazarg@unsa.edu.ar), [german.salazar@uv.es](mailto:german.salazar@uv.es)

Recibido 12/08/13, aceptado 23/09/13

**RESUMEN:** En este trabajo se presentan los mapas de energía solar media anual correspondientes a la radiación solar global, directa normal al haz, difusa y Tilt, para las provincias de Salta y Jujuy. Los mapas se trazaron utilizando los datos de la base satelital SWERA, cuyas celdas son cuadrados de 40 km. de lado, a través del método geoestadístico del kriging y un variograma lineal. Se compararon las distribuciones de irradiación (energía) solar con las provincias fitogeográficas y la distribución de las lluvias anuales en la provincia de Salta, encontrándose una rápida correlación con una de ellas. Los mapas se presentan como una herramienta inicial para el estudio de la distribución de la radiación solar en el Norte de Argentina.

**Palabras clave:** mapa, solar, Salta, Jujuy, SWERA.

### INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la distribución espacial y temporal de la energía solar resulta de importancia ya que permite realizar estudio de pre factibilidad para la instalación de sistemas que aprovechen este tipo de energía renovable. La elección de un sitio para la instalación de un sistema grande de generación solar depende, obviamente, de la disponibilidad del recurso pero también depende de otros factores, como la disponibilidad de caminos, redes eléctricas, fuentes de agua potable, cercanía a telefonía celular o fija, etc (Mills, 2004). Eso es así porque un sistema de generación solar de grandes dimensiones (por ejemplo, un sistema concentrador Fresnel) requiere de subsistemas para su correcto funcionamiento y los mismos dependen de los ítems mencionados anteriormente, tanto para su funcionamiento, control, supervisión y mantenimiento.

En nuestro país, la región del NorOeste Argentino (NOA) es la que posee, en términos generales, la mejor disponibilidad del recurso solar. Así lo muestra el “Atlas de Energía Solar de la República Argentina” de Grossi Gallegos y Righini (2007). Sin embargo, en ese trabajo se realizó el trazado de líneas de iso-radiación solar global a partir de datos medidos en poquísimos puntos, tal y como se observa en la Figura 1.

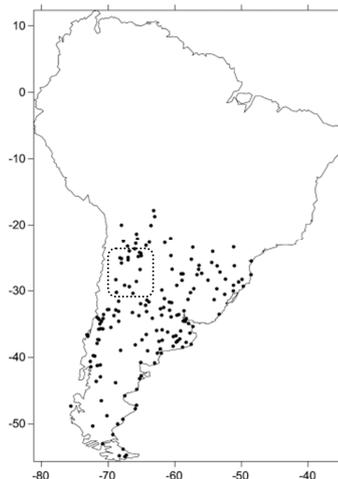


Figura 1. Mapa de Sudamérica donde se observan los sitios de los que se dispuso de datos medidos (Righini et al, 2005)

Utilizando el método del kriging se trazaron las líneas estimando los valores de radiación entre puntos mediante variogramas (Aguiar, 2000). Ese método permite minimizar los errores cometidos en la interpolación de los valores del campo de radiación solar (Aristegui et al, 2011). Este método también se utilizó para el trazado de los mapas de radiación de Brasil.

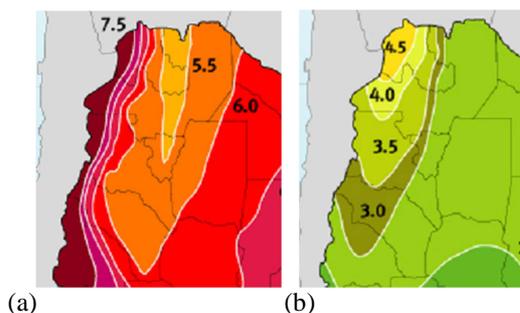


Figura 2a Isolneas de irradiacion solar global (en kWh/m<sup>2</sup>) para el NOA en enero. Figura 2b Isolneas de irradiacion solar global (en kWh/m<sup>2</sup>) para el NOA en junio.

Si bien estos mapas brindan información sobre la distribución espacial y temporal de la radiación solar en el NOA (Figura 2a y 2b), la poca cantidad de puntos geográficos con valores medidos y la distribución inhomogénea de las mismas, sumado al hecho que esta región es montañosa (lo que genera variaciones entre una parte y otra de la misma región), hacen que la misma posea errores en cuanto a la verdadera distribución del recurso (Salazar et al, 2013).

La falta de datos medidos puede paliarse utilizando bases de datos satelitales. Actualmente solo dos bases de datos están disponibles, de manera gratuita, en la Internet: SSE de la NASA (NASA, 2013) y SWERA de la UNEP (SWERA, 2013). La base de datos de SoDa (SoDa, 2013) también está disponible en internet pero esos datos corresponden solo a un año (2005) y no están corregidos por altura, es decir, considera que todos los sitios están a la misma altitud. SWERA utiliza 7 años de medidas (desde 1985 a 1991).

### METODOLOGIA UTILIZADA Y RESULTADOS

A continuación se muestran los mapas obtenidos aplicando kriging a los valores de irradiación de las celdas SWERA que abarcan los territorios de las provincias de Salta y Jujuy (Figura 3). Se usó esa base de datos porque el tamaño de sus celdas (celdas cuadradas de 40 km. de lado) es menor al de las SSE (celdas de 80 km. de lado).

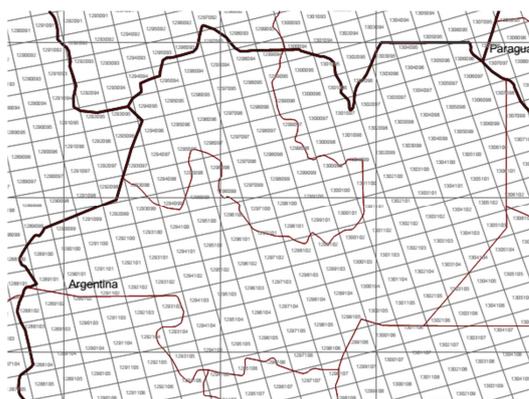


Figura 3. Mapa de las provincias de Salta y Jujuy donde se observan las celdas satelitales de SWERA. De cada una de estas celdas se dispone de información de radiación solar media mensual global, directa normal, difusa y Tilt.

Se han trazado los mapas de irradiación solar global, irradiación solar directa normal, irradiación solar difusa e irradiación solar Tilt (esta última se refiere a la energía recibida por un plano, orientado hacia el norte, inclinado un ángulo igual a la latitud del lugar) de las provincias argentina de Jujuy y Salta.

En total se consideraron 192 celdas satelitales, cubriendo un área de 307.200 km<sup>2</sup> (recuérdese que, por ser cada celda satelital un cuadrado de 40 km de lado, cada una abarca 1600 km<sup>2</sup>). Cada mapa presenta a su escala de valores en colores (amarillo=mínimo, rojo=máximo), que en cada caso se ha elegido para destacar los valores extremos. De haberse usado la misma escala para todos los mapas, solo aquellos en los que hubiera mayor rango de valores permitirían una resolución correcta: en el mapa de la difusa no habría podido resolver casi nada, teniendo en cuenta su escaso rango (0.6 a 2.4 kWh/m<sup>2</sup>). El valor de irradiación de cada celda se consideró en el centro de la misma.

Los valores de irradiación de la base satelital SWERA se suponen con un error del 10%. Este fue el valor estimado por los diseñadores del modelo (Maxwell et al, 1998) y es aproximadamente el error que se encontró al comparar datos medidos con estimados de SWERA en el norte de Chile (Checura et al, 2012).

- 1) **Mapa medio anual de Irradiación Solar Global:** este mapa (Fig. 4a) indica que los valores de la irradiación solar global están entre 4.8 y 6.7 kWh/m<sup>2</sup> (17.3 a 24.1 MJ/m<sup>2</sup>). La distribución de dicha radiación está directamente relacionada a cómo lo están las distribuciones orográficas y climáticas en las provincias, tal y como se aprecia en el mapa físico de ambas provincias (Fig. 4b). Las líneas de iso-irradiación global siguen bastante bien a las líneas de

altitud (no están dibujadas en el mapa Google Earth ®). Estas variaciones en altitud pueden observarse fácilmente a través del color del terreno: verde claro (al Oeste) es Parque Chaqueño, verde oscuro es selva Tucumano-boliviana y marrón claro es montes, pastizales y desierto de altura (INTA, 2013). También se aprecia que los cordones montañosos se correlacionan con los mayores gradientes de radiación solar global.

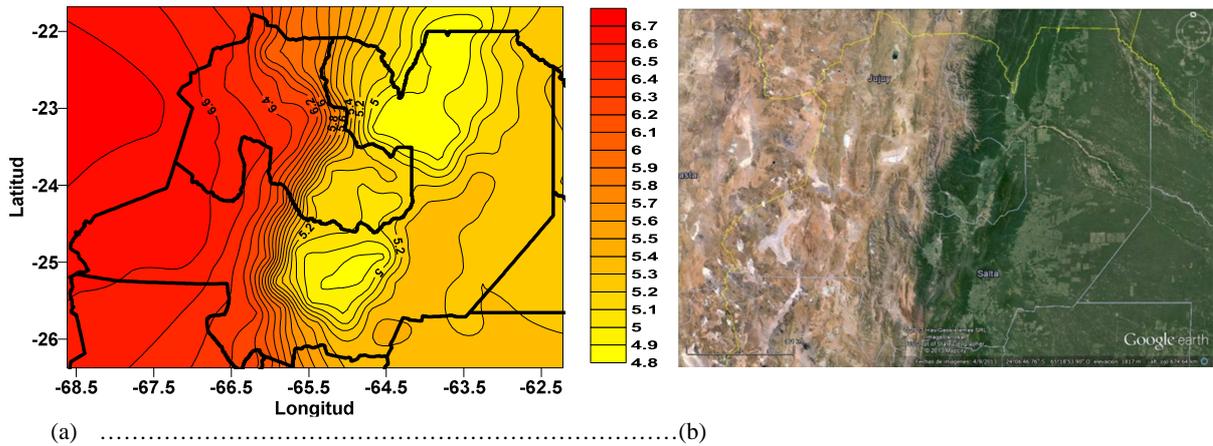


Figura 4a. Mapa de líneas de iso-irradiación solar *global* media anual para las provincias de Salta y Jujuy. La escala está en kWh/m<sup>2</sup>. Figura 4b. Mapa físico de las provincias de Salta y Jujuy donde se observan las características orográficas de la región (Google Earth ® 2013)

- 2) **Mapa medio anual de Irradiación Solar Directa Normal al Haz:** los valores medios anuales están entre 3.5 y 9.5 kWh/m<sup>2</sup> (12.6 a 34.2 MJ/m<sup>2</sup>). Esta radiación es la que se puede concentrar, por lo que su conocimiento es de importancia para dimensionar sistemas térmicos y fotovoltaicos. Esos sistemas de concentración utilizan trackeadores de un grado de libertad (eje longitudinal de espejos planos o parabólicos) o dos grados de libertad (heliostatos). Nuevamente se observa que la distribución espacial de la irradiación directa sigue a la orografía de la región (Figura 5), solo que los valores son mayores que para el caso de la radiación solar global.

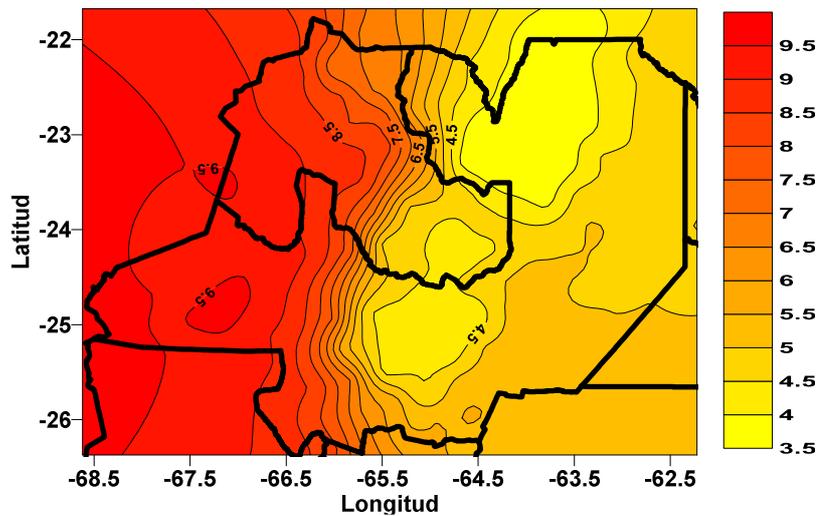


Figura 5: Mapa de líneas de iso-irradiación solar *directa* - normal al haz - media anual para las provincias de Salta y Jujuy. La escala está en kWh/m<sup>2</sup>.

- 3) **Mapa medio anual de Irradiación Solar Difusa:** los valores medios anuales están entre 0.6 y 2.4 kWh/m<sup>2</sup> (2.2 a 8.6 MJ/m<sup>2</sup>). Esta componente es la que complementa a la global y a la directa, ya que la radiación difusa + la directa es igual a la radiación global, aunque no en un sentido literal. Por definición, la irradiancia global  $I_g$  es igual a la irradiancia directa horizontal  $I_{bn}$  (que es la irradiancia solar directa normal al haz multiplicada por el coseno del ángulo cenital  $\theta_z$ ) + la irradiancia difusa  $I_d$ .

$$I_g = I_{bn} \cdot \cos \theta_z + I_d \quad (1)$$

Los valores de  $I_g$  se integran temporalmente en base diaria para calcular la irradiación  $H_g$ . Sucede lo mismo con las irradiancias  $I_{bn}$  e  $I_d$  para calcular los valores de las irradiaciones  $H_{bn}$  y  $H_d$ .

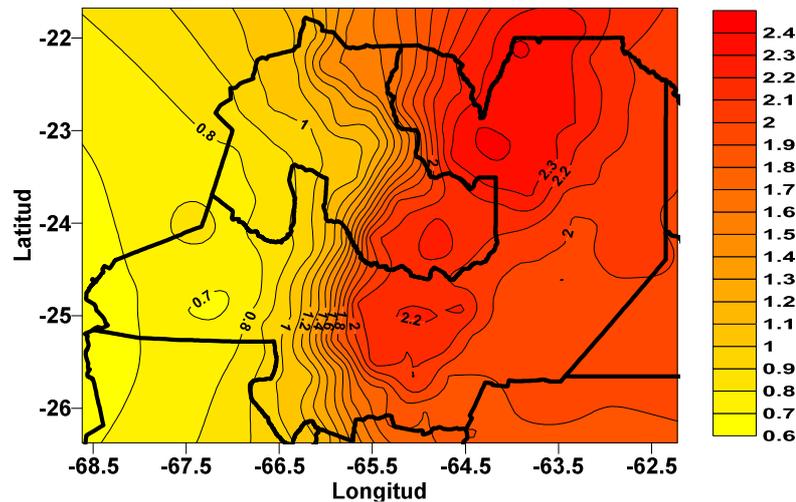


Figura 6. Mapa de líneas de iso-irradiación solar *difusa* media anual para las provincias de Salta y Jujuy. La escala está en kWh/m<sup>2</sup>.

- 4) **Mapa medio anual de Irradiación Solar “Tilt” (inclinación plano = latitud del lugar):** los valores medios anuales están entre 5 y 7.2 kWh/m<sup>2</sup> (18 a 25.9 MJ/m<sup>2</sup>). Esta radiación corresponde al valor de la radiación solar directa que se recibe normal a un plano cuya inclinación, respecto del plano del suelo, es igual a la latitud del lugar donde está. Esta información es aplicable a sistemas colectores –cuyo fluido caloportador puede ser agua o aire– y a sistemas fotovoltaicos estáticos.

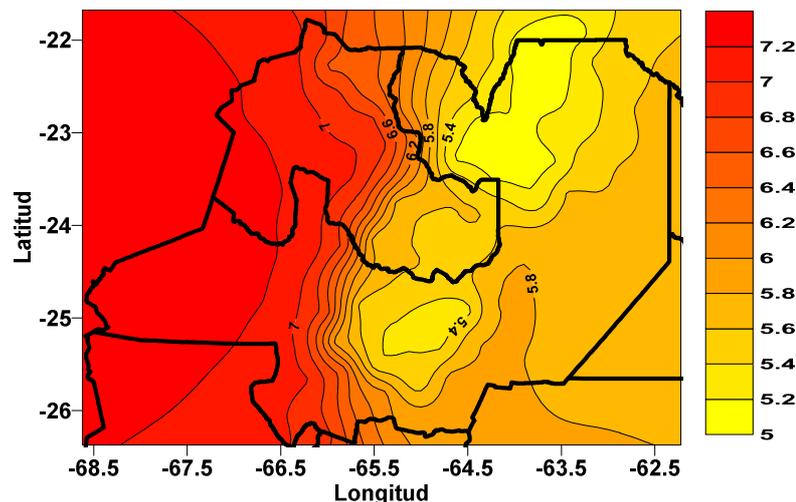


Figura 7. Mapa de líneas de iso-irradiación solar *Tilt* media anual para las provincias de Salta y Jujuy. La escala está en kWh/m<sup>2</sup>.

#### ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

De observar los cuatro mapas se puede inferir que:

- i) Los valores más altos de global/directa/Tilt se dan aproximadamente en las mismas regiones, al igual que los valores más chicos.
- ii) Los valores más grandes de la difusa se dan aproximadamente donde están los valores más grandes de la directa.
- iii) Los datos de radiación Tilt medios mensuales resultan ser ligeramente mayores a los de radiación solar global media mensual (ver Figuras 4a y 7). Esta situación puede deberse a varios factores entre los que se destacan:
  - La posición geográfica: el Trópico de Capricornio atraviesa la región (el Trópico de Capricornio es el Paralelo de latitud -23° 26' 16''). Un observador parado sobre él notará que el Sol alcanza el cenit al mediodía solar durante el solsticio del verano austral (21 de diciembre) y que en los demás días del año la altura solar es menor, aumentando así la cantidad de radiación que se puede coleccionar sobre un plano inclinado hacia el Norte.
  - El modelo utilizado: la radiación Tilt es la suma de tres componentes: la radiación solar directa normal al plano inclinado hacia el Norte, más la radiación difusa, más la radiación directa que llega al plano inclinado reflejada por el suelo.

Estos factores, entre otros, hacen que la radiación solar Tilt sea mayor, en base media mensual, a la radiación solar Global.

- iv) Entre la distribución de las provincias fitogeográficas y de la precipitación media anual (INTA, 2013) es la primera la que mejor correlaciona con la distribución de irradiación (Figura 8). Es decir, las regiones con menor disponibilidad de energía solar global/directa/Tilt son las correspondientes a regiones selváticas, mientras que los desiertos de altura son las que presentan mejor disponibilidad del recurso.

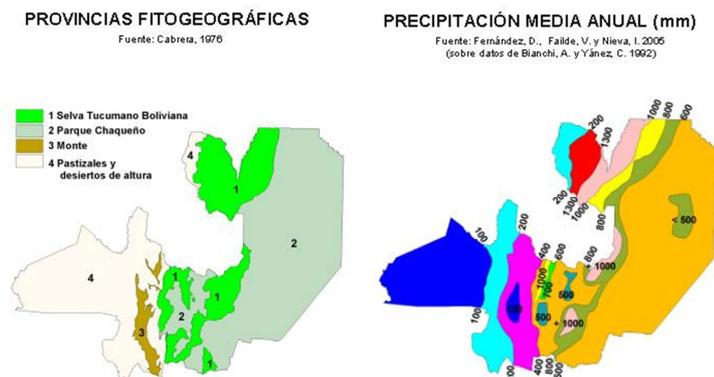


Figura 8. Distribución de las provincias fitogeográficas y de la precipitación anual en la provincia de Salta (INTA.2013)

- v) La determinación de los errores reales cometidos en cada uno de los mapas requeriría de datos medidos de cada magnitud en al menos tres sitios críticos. Los datos que se disponen de radiación solar global abarcan muy pocos puntos en las dos provincias. No se disponen de datos medidos de radiación solar directa (salvo para Salta Capital) ni difusa para las provincias estudiadas. Es decir, los mapas presentados son indicativos de los probables valores de radiación solar global, directa, difusa y Tilt. Análisis estadísticos para extrapolar errores se están realizando actualmente.

### CONCLUSIONES

En este trabajo se trazaron los mapas de energía solar global, directa normal al haz, difusa y Tilt de las provincias de Salta y Jujuy. Para ellos se usaron los datos de la base satelital de SWERA. Usando los datos de las 192 celdas satelitales SWERA que contienen a las dos provincias se aplicó el método del kriging para generar líneas de iso-irradiación. Los valores de la Tilt resultan ser algo superiores a los de la Global, muy posiblemente debido a la posición geográfica de la región y a la definición de la radiación Tilt. Se encontró una correlación entre los valores de cada tipo de radiación y factores climáticos de la región. Estos mapas se presentan como una herramienta para realizar estimaciones rápidas del recurso pero también servirán para determinar los sitios donde la colocación de estaciones de medición de radiación solar resultaría óptima desde el punto de vista de coste/beneficio.

### REFERENCIAS

- Mills D. (2004). Advances in solar thermal electricity technology. *Solar Energy* 76, 19-31.
- Righini R., Grossi Gallegos H. (2007) Atlas de Energía Solar de la República Argentina. Ed. Universidad de Lujan.
- Righini R. , Grossi Gallegos H., Raichijk C. (2005) Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina. *Renewable Energy*, Volume 30, Issue 8, pp 1241-1255.
- Aguiar, R. (2000) Cartografía de la Radiación Solar por Métodos Geoestadísticos II Curso Regional de Solarimetría. Red Temática IV, CYTED. Tarapacá, Chile
- Aristegui Rosana, Righini Raúl, Taddei Federico (2011) Influencia de la frontera marítima en trazado de isolineas representativas de la distribución de la radiación solar en el sur de Sudamerica. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 15.
- NASA (2010). eosweb.larc.nasa.gov/sse/.
- SWERA (2010). swera.unep.net/.
- SoDA (2010). [www.soda-is.com/](http://www.soda-is.com/).
- Salazar G. A., Hernández A. L., Echazú R., Saravia L. R., Romero G. G. (2013) Comparison between measured mean monthly solar insolation data and estimates from SWERA database for Salta City (Northwestern Argentina). *Electronic Journal of Energy and Environment*. (in press). ISSN: 0719-269X. DOI 10.7770/EJEE-V0N0-Art531.
- Maxwell E., George R., Wilcox S. (1998). A climatological Solar Radiation model. Proceedings of the 1998 American Solar Energy Society Annual Conference. Albuquerque, NM.
- Checura Díaz M. S., Salazar G. A., Laspiur R., Correa T. G., Gutiérrez J. (2012) Análisis de la radiación solar en el norte de Chile. Comparación entre datos medidos y estimados por modelos de día claro ARG-P y base de datos SWERA. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Volumen 16 Año 2012, pp. 11.101-11.106. ISSN 0329-5184
- Suelos y Ambiente – Salta – Argentina. INTA. <http://inta.gob.ar/imagenes/salta.JPG/view>

**ABSTRACT**

In this paper we present the maps of annual average solar energy corresponding to the global solar radiation, beam normal, diffuse and Tilt, for the provinces of Salta and Jujuy. The maps were plotted using the satellite-based database SWERA, whose cells are squares of 40 km. long side, through the geostatistical method of kriging and linear variogram. We compared the distributions of solar radiation (energy) with the phytogeographic provinces and distribution of annual rainfall in the province of Salta, and a fast correlation was found with one of them. The maps are presented as an initial screening tool to study the distribution of solar radiation in northern Argentina.

**Keywords:** map ,solar , Salta, Jujuy, SWERA.