

# ESTUDIO DE LA RADIACIÓN SOLAR DIFUSA EN LA BÓVEDA CELESTE, UTILIZANDO KRIGING COMO MÉTODO ESTIMADOR

Germán A. Salazar – [salazarg@unsa.edu.ar](mailto:salazarg@unsa.edu.ar)

Alejandro. L. Hernández – [alejo@unsa.edu.ar](mailto:alejo@unsa.edu.ar)

Luis. R. Saravia – [saravia@unsa.edu.ar](mailto:saravia@unsa.edu.ar)

Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Exactas, Departamento de Física  
INENCO (Instituto de Investigación en Energías No Convencionales)

**Resumen.** En este trabajo se muestran los resultados obtenidos al usar kriging como método para estimar valores de irradiación difusa en la bóveda celeste. A partir de valores de irradiancia difusa registrados sistemáticamente en pocos puntos específicos de la esfera celeste, y luego de proyectar la superficie en un plano, se utiliza el kriging para estimar los valores de la irradiancia difusa en toda la superficie. Se comparan las características de los cielos de los sitios donde se tomaron los registros: Salta Capital (lat.  $-24.7^\circ$ , long  $-65.4^\circ$ , altitud 1200 metros s.n.m.) y El Rosal (lat.  $-24.4^\circ$ , long  $-65.7^\circ$ , altitud 3350 metros s.n.m.). Se comprueba que la radiación difusa registrada en El Rosal es menor que la registrada en Salta y que la distribución de la misma en la bóveda celeste es consistente con las premisa de "mayor dispersión en sitios a menor altitud".

**Palabras-clave:** Radiación solar difusa, bóveda celeste, kriging.

## 1. Introducción

La radiación solar que llega a la superficie de la Tierra se divide en dos partes: radiación difusa y radiación directa. Se considera radiación solar directa a la proveniente del disco solar, de aproximadamente  $0.5^\circ$  de tamaño angular, y de la región circunsolar, entre  $2^\circ$  y  $3.5^\circ$  de tamaño angular (D. Buie, A.G. Monger, C.J. Dey, 2003). La radiación solar que llega del resto de la bóveda celeste se denomina radiación solar difusa, y es generada por la dispersión y absorción de la radiación solar en moléculas y aerosoles. Se sabe que el color azul del cielo es debido a la dispersión de Rayleigh en las moléculas de oxígeno, variando el tono del color según sea la cantidad de aerosoles presente y el ángulo de incidencia de los rayos solares sobre las partículas ([http:// hyperphysics.phy-astr.gsu.edu](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)).

Diversos modelos consideran la distribución espacial de la radiación solar difusa distribuida en la bóveda celeste de dos maneras: isotrópica o anisotrópica (Duffie y Beckman, 2006). En el primer caso se considera que la distribución espacial de la radiación es constante para todas las direcciones, mientras que en el segundo caso se tienen en cuenta variaciones del valor de la misma según sea su posición en la bóveda celeste.

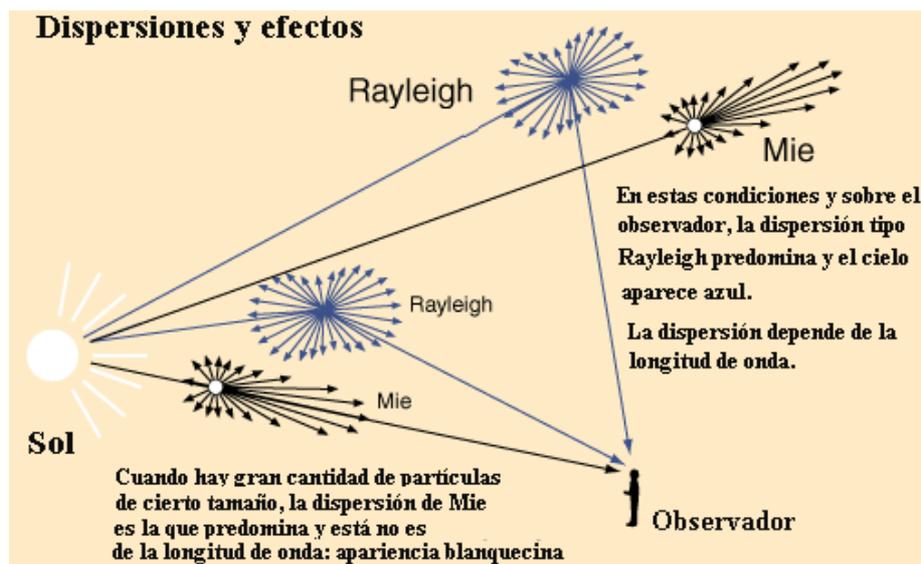


Figura 1 - Efectos angulares de la dispersión de Rayleigh y de Mie sobre un observador.

La distribución de la radiación difusa dispersada por una partícula, como producto de la dispersión de Rayleigh, tiene por característica que presenta asimetría en la distribución espacial de la radiación dispersada, la cual es mayor en

la dirección de avance y retroceso que en la transversal, según se observa en la Fig. 1. Esta dispersión se da cuando el tamaño de la partícula es menor que un décimo de la longitud de onda de la radiación incidente. La cantidad de radiación dispersada es proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda incidente (H. Grossi Gallegos, 2004). Es decir, hay mayor dispersión a menor longitud de onda. Por ejemplo, para  $\lambda = 400$  nm la dispersión de Rayleigh es aproximadamente 10 veces mayor que para  $\lambda = 900$  nm.

La radiación circunsolar es producto de la dispersión de Mie, que ocurre cuando el tamaño de las partículas es del orden o mayor que la longitud de onda de la radiación incidente. La distribución espacial de la radiación dispersada tipo Mie no es simétrica, aunque presenta mayor intensidad hacia delante y menos hacia atrás (este efecto se incrementa con el tamaño de la partícula).

A medida que nos alejamos del disco solar dentro de la bóveda celeste, el color azul del cielo aparece más saturado (menos mezclado con luz blanca), por lo que es más “oscuro”. Cerca del horizonte, el cielo presenta un azul menos intenso. Cuando el sol tiene suficiente altura en el horizonte, y sus haces en su trayectoria deben atravesar zonas con gran cantidad de partículas (aerosoles) se observa como el horizonte se vuelve blanquecino (dispersión tipo Mie). Esto se ve sobre todo en la zona del horizonte. (<http://www.meteored.com>)

La distribución de la radiación difusa en la bóveda celeste depende, entonces, de la concentración de partículas existentes en la atmósfera, de la posición del Sol en la bóveda celeste y de los ángulos de incidencia sobre la misma.

En este trabajo se presenta la aplicación de una metodología que resulta útil para estudiar la distribución de la radiación difusa en la bóveda celeste, a partir de valores de dicha radiación tomados en puntos particulares del cielo.

## 2. Metodología de Medición

Los registros de radiación difusa se sensan, inicialmente, como espectros electromagnéticos. Para obtener el valor de la irradiancia difusa  $I_d$  correspondiente a un registro espectral realizado, se operó según lo descrito por Salazar *et al* (2006).

Los valores de irradiancia solar difusa  $I_d$  se registraron en dos lugares: la ciudad de Salta (lat.  $-24.7^\circ$ , long  $-65.4^\circ$ , altitud 1200 metros s.n.m.) y en el paraje El Rosal (lat.  $-24.4^\circ$ , long  $-65.7^\circ$ , altitud 3350 metros s.n.m.). Se utilizó un espectralradiómetro Licor LI-1800 al que se le adosó un telescopio de  $4^\circ$  de apertura. Dicho telescopio se montó sobre un trípode, que tenía un transportador de ángulos en su base. El ancho de banda sensado fue desde 400 nm a 1100 nm (VIS-NIR) con una resolución de 2 nm.

Se sensó la irradiancia difusa proveniente de puntos, de coordenadas  $(\alpha_T, \varphi_T)$ , sobre la bóveda celeste. El ángulo  $\alpha_T$  es la altura angular, cuyo valor es  $90^\circ$  para el cenit y  $0^\circ$  para el horizonte, y  $\varphi_T$  es el ángulo azimutal, definido como  $0^\circ$  en el Este,  $90^\circ$  en el Norte,  $180^\circ$  en el Oeste y  $270^\circ$  en el Sur. La posición del Sol también es conocida en cada momento de medición, teniendo coordenadas  $(\alpha_s, \varphi_s)$ .

Las alturas exploradas para Salta fueron  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $80^\circ$ , mientras que los ángulos azimutales fueron  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $270^\circ$ , es decir, uno por punto cardinal.

Para El Rosal, las alturas fueron las mismas, menos el horizonte ( $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $80^\circ$ ) y los ángulos azimutales fueron los mismos, más los intermedios ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$  y  $315^\circ$ ). Se considera que se ha realizado una medida *completa* cuando se han sensado todos los puntos  $(\alpha_T, \varphi_T)$  posibles: 24 puntos para Salta y 40 puntos para El Rosal. Las mediciones se realizaron apuntando la base del telescopio a una dirección cardinal para luego variar el ángulo cenital del telescopio (recordemos que altura  $\alpha = 90^\circ$  - ángulo cenital).

Se realizaron 8 medidas completas en El Rosal, en distintas épocas del año, y 2 en Salta. En este trabajo se analizan sólo 2 medidas completas, una para cada sitio.

Obviamente, al considerar solo el ancho de banda mencionado, el valor de irradiancia difusa  $I_d$  calculado no es el total que procede de algún punto de la bóveda celeste pero, dado que las regiones monitoreadas sólo emiten difusa, puede considerarse que se abarcó prácticamente toda la información espectral emitida por un punto de la esfera celeste.

El error experimental en cada medida angular, tanto para  $\alpha_T$  como para  $\varphi_T$  fue de  $\pm 2^\circ$ . Los puntos cardinales se determinaron usando GPS y las alturas usando un transportador.

## 3. Primer Análisis

Un primer análisis de los valores de irradiancia difusa obtenidos muestra resultados esperados:

**En los espectros de las mediciones realizadas, los picos máximos se dan dentro del rango espectral correspondiente al violeta - azul (400 nm a 498 nm).** Esto indica que la radiación procedente de estas regiones tiene características de radiación dispersada por efecto Rayleigh.

**En promedio, los valores de radiación difusa  $I_d$  registrados en Salta son mayores que los de El Rosal.** Esto era de esperarse ya que la diferencia en altura de los dos sitios (aproximadamente 2150 metros) indica una mayor cantidad de atmósfera, que genera una dispersión más importante en Salta que en El Rosal. En el caso de El Rosal se disponen de 8 medidas completas, realizadas en distintos meses del año, cerca del mediodía solar. El promedio de dichas medidas se muestra en la Tab. 1, junto a los valores promedios para Salta.

**La región del horizonte, o la más cercana a la misma, presentan valores de irradiancia mayores (zonas más claras) que las de altura mayor en la bóveda celeste.** Esto indica que la radiación dispersada en esa zona presenta más aporte de dispersión tipo Mie que tipo Rayleigh, tal y como se esperaba.

**Las zonas cercanas al disco solar presentan mayor intensidad de radiación que las demás.** En el caso de Salta el efecto es muy notorio, por tener mayor cantidad de aerosoles para incrementar la dispersión tipo Mie y por tener mayor masa de aire. Esto se discutirá más profundamente.

Tabla 1. Valores máximos y mínimos de radiación difusa  $I_d$ , en  $W/m^2$ , según altura angular  $\alpha_T$ , para Salta y El Rosal.

Sitio	$\alpha_T$	$I_d$ máximos ( $W/m^2$ )	$I_d$ mínimos ( $W/m^2$ )
El Rosal	15°	23	9
	30°	29	5
	45°	30	4
	60°	13	4
	80°	8	5
Salta	0°	56	22
	15°	37	12
	30°	33	7
	45°	20	5
	60°	14	4
	80°	8	5

#### 4. El método de Kriging

A partir de la poca información disponible se plantea la posibilidad de estimar los valores de radiación difusa del resto de los puntos de la bóveda celeste. Los valores de los puntos sensados originariamente indican tendencias, más no caracterizan completamente el estado “luminoso” de la bóveda celeste. Para esta tarea se analizaron las posibilidades que brinda la técnica del “kriging”.

Según Aguiar (2000), entre los métodos de interpolación lineal se encuentra el “krigaje” o “kriging”, que es un método optimal. El método surgió con el nombre de “geoestadístico” porque comenzó siendo utilizado en el ámbito de la estadística minera, generalmente para la resolución de problemas de estimación de parámetros geofísicos tales como la distribución espacial de la riqueza en minerales en un yacimiento, a partir de un pequeño número de muestras de suelo. No obstante, este tipo de método sobrepasó rápidamente los alcances de la minería y actualmente es utilizado en los más variados problemas que involucren datos distribuidos en el espacio (e inclusive series temporales).

Dado un conjunto de muestras de cierto parámetro  $z$  en  $n$  lugares del espacio localizados por los vectores  $s_i$ , digamos  $z(s_i) \equiv z_i$ , con  $i = 1 \dots n$ , ¿cómo estimar los valores de  $z$  en los lugares en donde no hay muestras?, ¿cómo hacer la interpolación o extrapolación de datos, digamos  $z_0^* \equiv z^*(s_0)$ ? Así, en la versión llamada “krigaje ordinario” o “krigaje normal”, se supone que el campo de valores de  $z$  se puede escribir

$$z(s) = \mu + \delta(s) \tag{1}$$

donde  $\mu$  es una constante desconocida y  $\delta(s)$  es un proceso estocástico, con propiedades comunes de continuidad y estacionariedad, con cierta autocorrelación espacial que sólo depende de la distancia  $h$  entre los puntos considerados. El método busca el mejor valor para el estimador  $z_0^*$  de tal manera que el error de estimación sea mínimo. El estimador utilizado puede ser cambiado, según sea el tipo de problema.

#### 5. Metodología de Análisis

Es importante la preparación de los datos para aplicarles kriging. El método trabaja con los datos presentados en matrices  $n \times 3$ , o sea  $n$  filas del tipo  $(x, y, z)$ , donde  $x$  e  $y$  indican la posición en el plano y  $z$  es el valor asignado a cada par  $(x, y)$ . Para nuestro problema podemos usar tres métodos para presentar los datos:

- a) **proyectar perpendicularmente los puntos  $(\alpha_T, \varphi_T)$  sobre un plano,**
- b) **realizar una proyección cilíndrica,**
- c) **realizar una proyección tipo gnomónica.**

En el primer caso, se pierde información, ya que la zona cercana al horizonte se deformará en casi una línea, como puede observarse en la Carta Solar que realiza el programa GEOSOL, desarrollado por Hernández (2003). En el segundo caso la proyección cilíndrica ofrece interesantes posibilidades, ya que puede usarse para incrementar la información disponible de un problema al unirse a gráficas de desplazamiento del Sol en el cielo. La tercera opción toma todos los puntos de la esfera celeste, al igual que la proyección cilíndrica, y permite tener una vista superior de la bóveda celeste. Analizaremos los dos últimos casos.

Para realizar la proyección tipo gnomónica se deforma la mitad de una superficie esférica en un círculo manteniendo la relación de distancias entre puntos con datos, y se representa en coordenadas polares. Para ello se hace lo siguiente:

- Se transforman las coordenadas  $(\alpha_T, \varphi_T)$  en  $(R, \phi)$ , donde  $R$  representa la altura angular y  $\phi$  el ángulo azimutal.

- Cada coordenada R se calcula como

$$R = \frac{1}{1.57} \left( 1.57 - \left( \alpha_T \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right) \quad (2)$$

De esta manera los puntos ( $\alpha_T, \varphi_T$ ) en el horizonte tendrán  $R = 1$ , y el valor de los demás R será proporcional a la longitud del arco desde el cenit hasta cada valor de  $\alpha_T$ , de los puntos sensados sobre cada meridiano, en la esfera celeste.

- Se transforma de coordenadas polares a cartesianas utilizando las ecuaciones

$$x = R \cdot \cos(\varphi) \quad (3)$$

$$y = R \cdot \text{seno}(\varphi) \quad (4)$$

Cabe aclarar que la proyección tipo gnomónica que realizamos no cumple completamente con la definición de la misma, ya que no se proyectan los puntos de la superficie esférica sobre el plano a partir del punto central de la esfera, debido a que esto no permitiría proyectar la región del horizonte.

Los datos medidos en cada serie se ordenan, entonces, según ternas (x, y, z) donde las dos primeras son posiciones en una grilla y la última es el valor de la radiación difusa en dicho punto. Tanto x como y se circunscriben a un espacio acotado entre [-1, 1]. A partir de esta matriz se puede estimar la distribución de la irradiancia difusa en todo el cielo.

Para el caso de la proyección cilíndrica, los ángulos azimutales  $\varphi_T$  pueden colocarse directamente en la columna x y las alturas angulares  $\alpha_T$  en la columna y. Esto se hizo para los dos sitios estudiados al momento de preparar los datos para generar proyecciones cilíndricas.

## 6. Resultados

Se seleccionaron los datos medidos los días 12 de mayo de 2005 en Salta y 7 de julio de 2005 en El Rosal. La preparación de estos valores para disponerlos como una matriz de n x 3, siguiendo la metodología ya descrita, se aprecia para Salta en la Tab. 2. En la Tab. 3 se muestra el arreglo de datos para realizar la proyección cilíndrica. Ambos arreglos se aplicaron, también, a los datos de El Rosal.

El procesamiento de los datos se efectuó mediante el programa SURFER 7.0. En este trabajo no se realizó un exhaustivo análisis de variogramas (gráficas que relacionan valores de covarianza con las distancias  $h$  y de los que se puede deducir el mejor estimador). Se utilizó la función *Autofit* para obtener el mejor estimador para los variogramas de los datos de Salta y El Rosal, resultando ser ambos lineales. Los datos de Salta arrojaron una desviación estándar en los valores de irradiancia difusa de 12.54 W/m<sup>2</sup>, mientras que para El Rosal este valor fue de 5.11 W/m<sup>2</sup>.

Tabla 2. Preparación de los datos de Salta, para la aplicación del kriging, usando proyección gnomónica.

$\alpha_T$	Punto Cardinal	R	$\varphi$	X	Y	Valor (W/m <sup>2</sup> )
0°	N	1.00	90°	0.00	1.00	31
15°	N	0.83	90°	0.00	0.83	17
30°	N	0.67	90°	0.00	0.67	13
45°	N	0.50	90°	0.00	0.50	11
60°	N	0.33	90°	0.00	0.33	9
80°	N	0.11	90°	0.00	0.11	7
0°	E	1.00	0°	1.00	0.00	56
15°	E	0.83	0°	0.83	0.00	37
30°	E	0.67	0°	0.67	0.00	33
45°	E	0.50	0°	0.50	0.00	20
60°	E	0.33	0°	0.33	0.00	14
80°	E	0.11	0°	0.11	0.00	8
0°	S	1.00	270°	0.00	-1.00	24
15°	S	0.83	270°	0.00	-0.83	12
30°	S	0.67	270°	0.00	-0.67	8
45°	S	0.50	270°	0.00	-0.50	6
60°	S	0.33	270°	0.00	-0.33	5
80°	S	0.11	270°	0.00	-0.11	7
0°	O	1.00	180°	-1.00	0.00	22
15°	O	0.83	180°	-0.83	0.00	12
30°	O	0.67	180°	-0.67	0.00	7
45°	O	0.50	180°	-0.50	0.00	5
60°	O	0.33	180°	-0.33	0.00	4
80°	O	0.11	180°	-0.11	0.00	5

Tabla 3. Datos de Salta preparados para aplicar kriging en proyección cilíndrica.

X	Y	Valor (W/m <sup>2</sup> )
270	0	31
270	15	17
270	30	13
270	45	11
270	60	9
270	80	7
180	0	56
180	15	37
180	30	33
180	45	20
180	60	14
180	80	8
90	0	24
90	15	12
90	30	8
90	45	6
90	60	5
90	80	7
0	0	22
0	15	12
0	30	7
0	45	5
0	60	4
0	80	5

Las últimas tres columnas se guardan en un archivo y con ellas se genera una grilla de puntos (*grid*) con los valores estimados. Luego, a partir de la grilla, se grafican isóneas en la superficie de trabajo mediante la opción *contour maps*.

Los resultados se presentan en forma de *contour maps*, con escala de colores, con el objeto de apreciar visualmente las variaciones de tonos en la bóveda celeste. Para la escala de colores se usaron tonos celestes. Se tomó el color *azul cielo* (brindado por el SURFER) para valores entre 4 y 22 W/m<sup>2</sup> y el color *celeste* para los valores entre 22 y 56 W/m<sup>2</sup> (se define un degradé en la escala). Se aplicó la misma escala para ambos sitios. Los resultados se aprecian en las Fig. 2, 3, 4 y 5. En las Fig. 2 y 4 se agregaron círculos, que representan el horizonte.

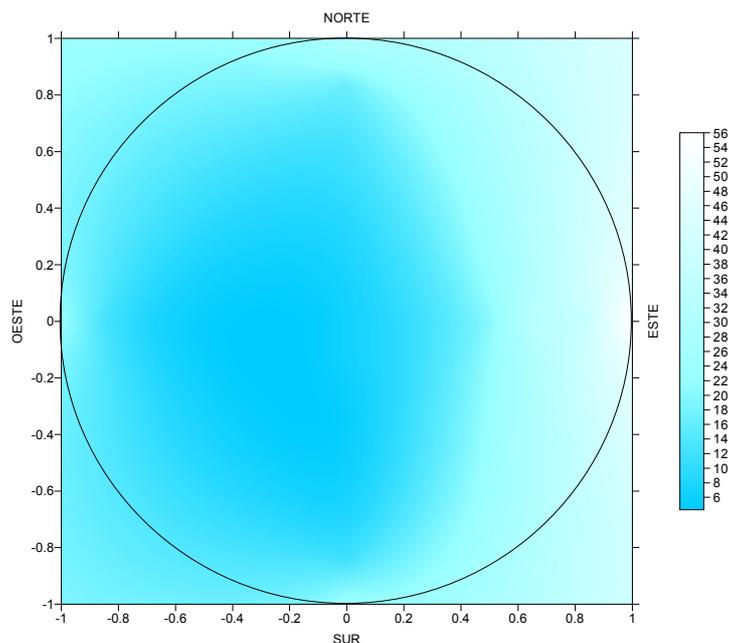


Figura 2 - Gráfica de distribución de radiación difusa para Salta, utilizando proyección gnomónica. El círculo marca el horizonte.

En el caso de Salta, la medición completa (24 puntos) se efectuó entre las 9:52 y las 10:26, hora oficial argentina, que equivalen a las 8:34 y las 9:08, hora solar. La posición más cercana del Sol a un punto sentido ( $\alpha_T, \varphi_T$ ) ocurrió para  $\alpha_T = 15^\circ$  y  $\varphi_T = 90^\circ$ , durante las mediciones para el Norte. En promedio el Sol estuvo, cuando se midió en esa dirección cardinal, en  $\alpha_S = 24.7^\circ$  y  $\varphi_S = 35.8^\circ$ . La mínima distancia angular entre ( $\alpha_T, \varphi_T$ ) y ( $\alpha_S, \varphi_S$ ) fue  $16^\circ$ .



Figura 3. Gráfica de distribución de radiación difusa para Salta, utilizando proyección cilíndrica.

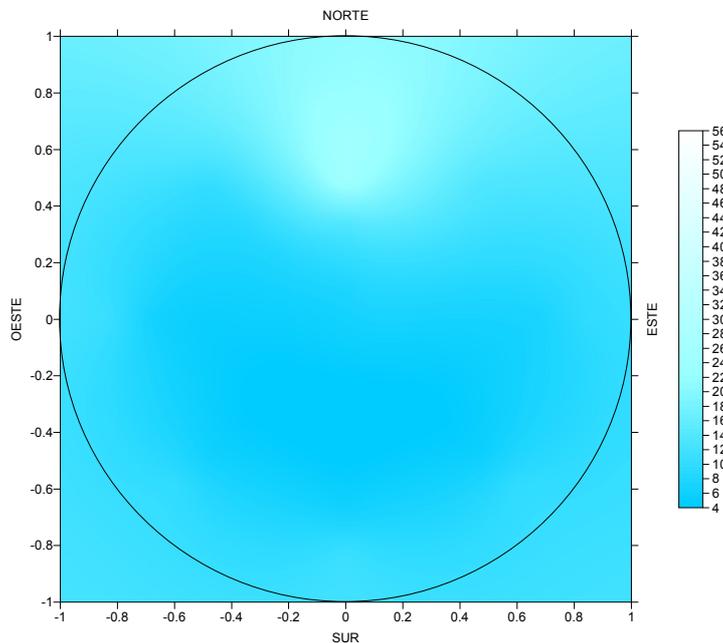


Figura 4: Gráfica de distribución de radiación difusa para El Rosal, utilizando proyección gnomónica. El círculo marca el horizonte.

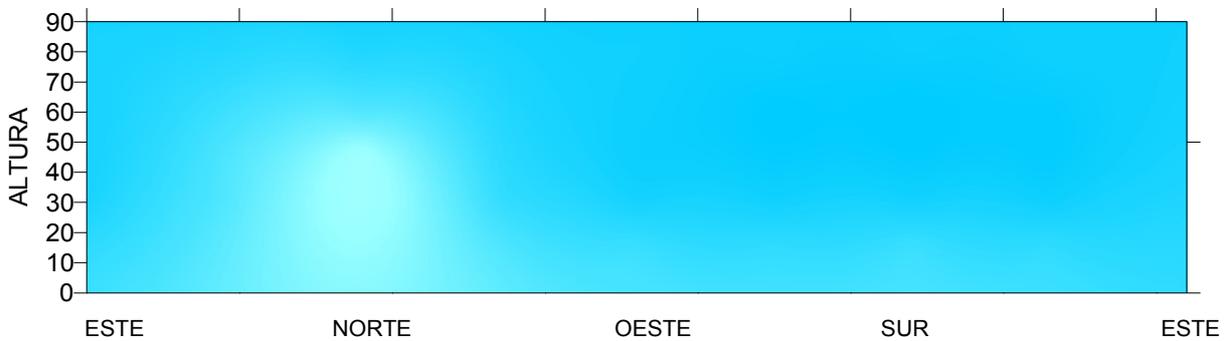


Figura 5. Gráfica de distribución de radiación difusa para El Rosal, utilizando proyección cilíndrica.

En el caso de El Rosal, la medición completa (40 puntos) se efectuó entre las horas 12:57 y las 13:47, hora oficial argentina, que equivalen a las 11:29 y 12:19, hora solar.

La posición más cercana del Sol a un punto ( $\alpha_T, \varphi_T$ ) ocurrió para  $\alpha_T = 45^\circ$  y  $\varphi_T = 90^\circ$ , durante las mediciones en la dirección Norte. En promedio el Sol estuvo, durante el lapso de tiempo ocupado para medir en el Norte, en  $\alpha = 42.4^\circ$  y  $\varphi_S = 80.1^\circ$ .

La mínima distancia angular entre  $(\alpha_T, \phi_T)$  y  $(\alpha_S, \phi_S)$  fue de  $3^\circ$ . A pesar de la cercanía entre esos puntos, no se aprecia un aporte de radiación circunsolar, al ser los valores menores a la máxima registrada para Salta.

## 7. Discusión

Existen algunos aspectos dentro de este trabajo que pueden discutirse:

**Tamaño de área sensada:** cuando se presentan los datos para hacer kriging, se está considerando que la radiación difusa proviene de un punto de la bóveda celeste, y eso no es correcto. Realizando un rápido cálculo se determina que el área sensada en cada medida corresponde al 0.06 % del área total de la semiesfera que representa la bóveda celeste. Entonces los 24 puntos tomados en Salta representan el 1.46 % del área total y los 40 puntos tomados en El Rosal representan el 2.44 %. Ante estas cifras podemos considerar que la irradiancia difusa calculada dentro del área de apertura de  $4^\circ$  proviene de un punto.

**Inclusión del Sol en el cálculo estimativo:** dado que se conoce la posición del Sol en cada medición completa realizada, se podría introducir dentro de las ternas  $(x, y, z)$  de una medición completa un punto que represente al Sol, asignándole al mismo un valor de irradiancia muy alto. Esto se hizo y se encontró que el alto valor de la radiación solar directa distorsiona completamente los valores estimados de radiación difusa para el cielo.

**Efectos de tener pocos puntos de referencia:** en el caso de Salta se tienen solo cuatro direcciones cardinales con datos, mientras que en El Rosal se tienen ocho. A fin de determinar la influencia del número de orientaciones en el resultado final del kriging se compararon dos *contour maps* correspondientes a los datos de El Rosal (Fig. 6), uno con todas las direcciones (rojo) y otro donde se quitaron las direcciones cardinales NO, SO, NE y SE (negro). Las diferencias son notables en la distribución de las isolíneas, sobre todo en las zonas donde se quitaron datos. Sin embargo, es evidente una tendencia para los valores de irradiancia en los cuadrantes comprendidos entre los puntos cardinales considerados, por lo que se concluye que la gráfica para Salta es representativa, aunque lo sería mucho más de contar con los valores en las orientaciones intermedias.

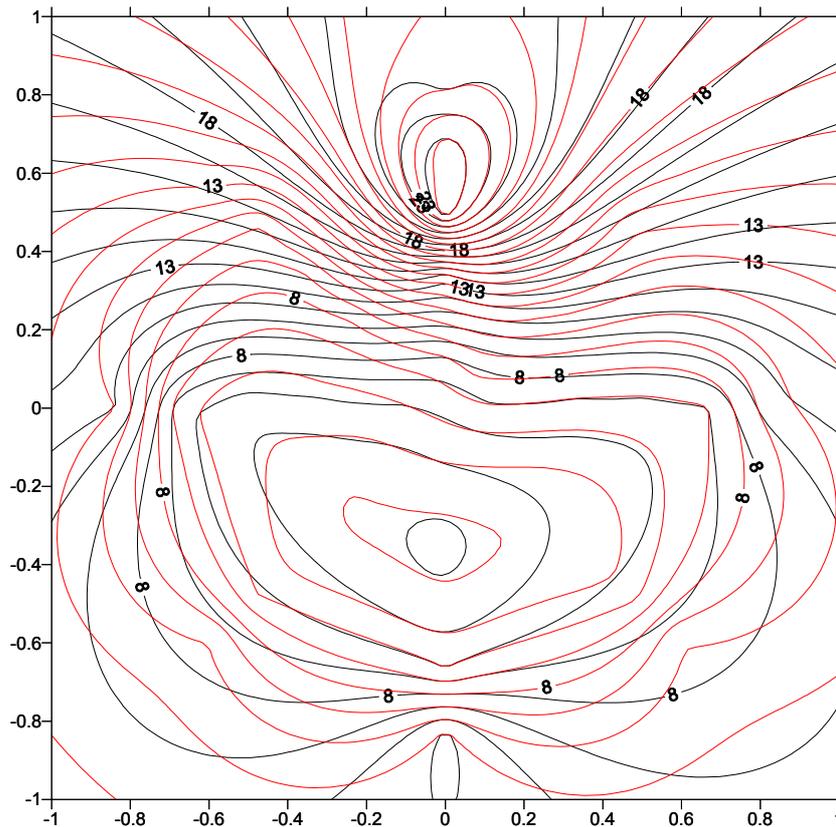


Figura 6 - Comparación de mapas de isolíneas (negro, solo 4 direcciones; rojo, todas las direcciones).

**Horas a las que se tomaron las medidas:** Los datos de  $I_d$  para Salta se tomaron tres horas antes del mediodía solar mientras que los de El Rosal se tomaron alrededor del mediodía solar. Podría considerarse que los valores de radiación difusa observados en Salta son debidos a la mayor masa de aire que se tiene a esa hora y que al llegar al mediodía la radiación difusa podría llegar a distribuirse de manera de generar valores inferiores o similares a los registrados para El Rosal. Si bien la masa de aire, corregida por presión, para las mediciones en

Salta (en las que la distancia angular entre  $(\alpha_T, \phi_T)$  y  $(\alpha_S, \phi_S)$  es mínima) resulta ser, en promedio, de 2.76 mientras que en idéntica situación para El Rosal es de 1.54, y que efectivamente la mayor masa de aire produce un mayor aporte de dispersión tipo Mie cerca del disco solar (Fig.2 y 3), al llegar al mediodía solar la difusa no disminuirá sino que se incrementará (en condiciones de cielo claro), ya que la radiación global es mayor a esa hora. Por lo tanto, se deduce que los efectos apreciados son debidos a la diferencia de espesor atmosférico, originado en la diferencia de altura sobre el nivel del mar entre los dos sitios.

## 8. Conclusiones

En este trabajo se muestran los resultados obtenidos al estimar y graficar valores de radiación solar difusa provenientes de la bóveda celeste, para dos sitios que tienen una diferencia en altitud de 2,160 metros, utilizando el método de kriging. Se partió de unos pocos valores de radiación solar difusa  $I_d$  ubicados en puntos de la bóveda celeste, que se calcularon a partir de espectros tomados con un espectroradiómetro y un telescopio de 4° de apertura.

Los resultados gráficos muestran comportamientos que fueron observados visualmente en los cielos de ambos sitios. La serie registrada en Salta presenta valores más altos de radiación difusa que la de El Rosal, por estar a menos altitud y contar, por lo tanto, con una mayor cantidad de atmósfera para dispersar la radiación solar.

Tanto la proyección tipo gnomónica como la cilíndrica dan resultados consistentes en cuanto a la distribución angular de la radiación difusa para las horas y sitios estudiados y la elección de una u otra técnica de visualización dependerá de la aplicación particular y/o de la familiarización con el método de generación de las mismas. Sin dudas, la proyección cilíndrica es más fácil de generar que la tipo gnomónica, pero su interpretación visual puede resultar menos intuitiva o “agradable” debido a su considerable deformación respecto de la curvatura propia de la bóveda celeste.

A fin de obtener distribuciones de irradiancia difusa más cercanas a la realidad al estimar sus valores mediante la técnica de kriging, resulta necesario realizar las mediciones sobre 8 meridianos u orientaciones como mínimo. Cada serie completa de medidas deberá realizarse en el lapso de tiempo más corto posible a fin de disminuir la influencia del movimiento aparente del sol a razón de 15°/h.

El método propuesto puede ser útil para muchas investigaciones, por ejemplo, corroborar resultados del modelo de Pérez sobre estimación de radiación difusa, reconstruir la distribución de radiación solar difusa a partir de pocos datos, estudiar el cielo desde la óptica atmosférica, etc.

## REFERENCIAS

- A. Hernández. 2003. Geosol: una herramienta computacional para el cálculo de coordenadas solares y la estimación de irradiancia solar horaria. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente .Vol.7 N° 2.
- D. Buie, A.G. Monger, C.J. Dey .2003. Sunshape distributions for terrestrial solar simulations. Solar Energy, Vol. 74, pp. 113 – 122
- G. A. Salazar, L. A. Hernández, G. G. Romero, L. R. Saravia. 2006. Medición de radiación solar difusa en Salta: Determinación cualitativa de anisotropía de cielo. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 10
- H. Grossi Gallegos. 2004. Notas sobre Radiación Solar. Universidad Nacional de Lujan – Departamentos de Ciencias Básicas.  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/atmos/blusky.html>  
<http://www.meteored.com/ram/224/mirando-al-cielo-fenomenos-opticos-atmosfericos-y-ii/>
- J. Duffie y W. Beckman. 2006. Solar Engineering of the Thermal Processes. John Wiley & Sons. pp 85-97.
- R. Aguiar. 2000. Cartografía de la Radiación Solar por Métodos Geoestadísticos. II Curso Regional de Solarimetría. Universidad de Tarapacá, Arica, Chile.
- R. Bird y C. Riordan.1986.Simple Solar Spectral Model for Direct and Diffuse Irradiance on Horizontal and Tilted Planes at the Earth's Surface for Cloudless Atmospheres. Am. Met. Soc. Vol.25. pp. 87-97.

## STUDY OF SOLAR DIFFUSE RADIATION IN THE CELESTIAL VAULT, USING KRIGING AS ESTIMATION METHOD

**Abstract.** *In this paper, the results obtained using kriging as estimation method to consider values of diffuse irradiation in the celestial vault, are shown. From few irradiation values registered systematically in specific points of the celestial sphere, and after to project the surface in a plane, kriging is used to consider the values of the diffuse irradiation in the entire surface. The characteristics of skies of the two sites, where the registries were taken, are compared: Salta city (lat. -24.7°, long -65.4°, altitude 1200 meters) and El Rosal (lat. -24.4°, long -65.7°, altitude 3350 meters). It is verified that the registered diffuse radiation in El Rosal is minor than the registered in Salta city, and the distribution of the diffuse radiation in the celestial vault is consistent with the premise “smaller altitude greater dispersion”.*

**Key words:** solar diffuse radiation, celestial vault, kriging