

## **ANÁLISIS DE CINCO AÑOS DE MEDICIONES DE LA RADIACIÓN SOLAR EN LA CIUDAD DE SAN LUIS**

Amílcar Fasulo<sup>1</sup>, Jorge Adaro<sup>2</sup>, María Beatriz Nieto<sup>2</sup>

1: Dpto. de Física, Fac. de Cs. Físico Matemáticas y Naturales, Universidad Nacional de San Luis.  
Chacabuco y Pedernera. C.P.: 5700. San Luis. Argentina.

2 Grupo de Energía Solar Facultad de ingeniería Universidad Nacional de Río Cuarto  
Ruta Nac. 36 Km 601. C. P. 5800. Río Cuarto. Argentina e-mail: aadaro@ing.unrc.edu.ar

**RESUMEN:** En el presente trabajo se analiza la radiación solar medida en la ciudad de San Luis durante cinco años. Se obtienen los valores del índice de claridad y la fracción de días claros, verificando la relación de Suerhrcke, comparando los valores medidos con los obtenidos además por los modelos de Ångström-Prescott, de Reitel, y de Glover y McCulloch, y analizando los errores MBE y RMSE. Se analiza la fracción difusa de la radiación solar global, encontrando la correlación entre  $K_d$  y  $K_t$  propuesta por Page, y también se encuentra el porcentaje de días muy nublados, parcialmente nublados y de cielo claro, buscando encontrar una relación con el fenómeno de El Niño.

**Palabras claves:** radiación solar, índice de claridad, fracción de días claros.

### **INTRODUCCIÓN**

El conocimiento de la radiación solar en la superficie de la tierra se requiere para muchos usos. Los valores medios mensuales medidos de la irradiación diaria, son generalmente la mejor fuente de la información y proporcionan el punto de partida para muchos cálculos. La utilidad de promedios mensuales de radiación diaria se puede entender del hecho que en una localización particular estos promedios son relativamente constantes y brindan buena información para las aplicaciones en general.

Cuando no existen mediciones es posible estimar la radiación a partir de las horas de sol, dado que la radiación global está en relación directa con el brillo solar. Estas relaciones han sido tratadas desde el inicio del siglo XX por diferentes propuestas como han sido las conocidas ecuaciones de Ångström-Prescott (Black et al., 1954), y las derivadas de esta como la de Reitel (1978) y la de Glover y McCulloch (1958), y más recientemente la de Suerhrcke (2000).

La ecuación de Ångström-Prescott ha sido ampliamente utilizada en muchos campos de la ciencia y la ingeniería, dado la practicidad de la misma y la importante cantidad de información de horas de sol disponibles. Muchas publicaciones han divulgado los valores de las constantes para diferentes regiones quedando en claro que las constantes empíricas dependen del porcentaje de horas de sol de una determinada región o localidad.

En general la relación entre las horas de sol y la radiación se ha utilizado para estimar esta última, pero en una nueva visión permitiría dar la opción de poder encontrar la fracción de tiempo de cielo claro a partir de las mediciones de radiación. Además como la transmitancia media de las nubes varía con la radiación media, y como la transmitancia de las nubes no es constante, se ve que el carácter asumido en la ecuación de Ångstrom no se verifica, sugiriendo el análisis anterior una relación no lineal entre el brillo de sol y la radiación.

La aproximación establecida por Suerhrcke, entre el promedio mensual de la radiación solar diaria y el brillo solar (o fracción de días claros), es tomada en esta oportunidad de tal manera que la fracción de cielo claro  $n/N$  se define como  $f_{clear}$  a través de la siguiente expresión:

$$f_{clear} = \frac{\overline{H}_b}{\overline{H}_{b,clear}} \quad (1)$$

donde  $\overline{H}_b$  es el promedio mensual de la radiación directa diaria horizontal y  $\overline{H}_{b,clear}$  es el promedio mensual de la radiación directa horizontal de días claros. Se entiende por días claros aquellos en los cuales el cielo se encuentra libre de nubes.

Para relacionar  $\overline{H}_b$  con la media mensual de la radiación diaria sobre superficie horizontal  $H$ , Suehrcke usa la expresión de fracción difusa (Page, 1961) y demuestra que

$$f_{clear} = \left( \frac{\overline{K}}{\overline{K}_{clear}} \right)^2 \quad (2)$$

donde  $\overline{K} = \frac{\overline{H}}{\overline{H}_0}$  es la media mensual del índice de claridad diario, y  $\overline{K}_{clear} = \frac{\overline{H}_{clear}}{\overline{H}_0}$  es la media mensual del índice de claridad para días de cielo limpio.

### ANÁLISIS DE LOS DATOS

Se tomaron como datos de partida las medidas de radiación solar horizontal y la radiación solar normal directa tomadas en intervalos de una hora en la ciudad de San Luis (33.27° S, 66.35° W, 730 msnm), a partir de los cuales se obtuvieron los valores de radiación difusa y la radiación directa sobre el plano horizontal. Los instrumentos utilizados para medir estas radiaciones fueron un piranómetro Eppley Precision Spectral Pyranometer (PSP) y un pirheliómetro Eppley normal-incidence pyrheliometer (NIP). Los valores de  $H_0$  fueron calculados usando las expresiones de la radiación extraterrestre diaria de Iqbal (1983). El valor de la constante solar utilizado fué 1367 W / m<sup>2</sup>. Luego se calcularon los promedios mensuales  $\overline{H}$ ,  $\overline{H}_b$ ,  $\overline{H}_{b,clear}$ ,  $\overline{K}$ ,  $\overline{K}_{clear}$ . Los valores medios mensuales de  $f_{clear}$  se encontraron a partir de la ecuación (2) utilizando los valores de  $\overline{H}_b$  y  $\overline{H}_{b,clear}$ .

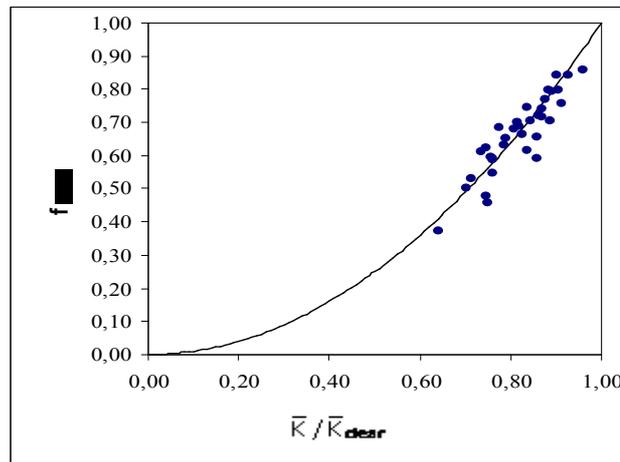


Figura 1. Ecuación de Suehrcke y datos experimentales para San Luis

Con los datos de origen y el período considerado, se encuentran los valores de  $H_0$ ,  $K_d$  y  $K_t$  diarios y los valores  $\overline{H}_0$ ,  $\overline{K}_d$  y  $\overline{K}_t$  mensuales. Se obtiene para  $K_t \phi 0,7$  los valores de  $\overline{K}_{clear}$ ,  $\overline{H}_{clear}$  y  $\overline{H}_{b,clear}$ , repitiendo los últimos cálculos para  $K_t \phi 0,65$  y  $K_t \phi 0,68$ .

Para el conjunto de datos analizados, que se corresponde a los cinco años de información de la ciudad de San Luis desde el año 2000 al 2004, donde se observó con  $K_t \phi 0,68$  una mejor aproximación dado que arroja el menor error, adoptando éste último para los cálculos siguientes.

La relación (2) entre  $f_{clear}$  y  $\frac{\overline{K}}{\overline{K}_{clear}}$  se puede ver en la figura 1, en la que se agregan los valores experimentales para la ciudad de San Luis, mostrando que dicha relación es un buen ajuste en los datos considerados en esta ocasión. En el análisis de la relación (2) en términos de  $\overline{K} = \overline{K}_{clear}(f_{clear})^{1/2}$ , se pudo observar que el ajuste se da para valores de  $\overline{K}_{clear}$  entre 0,63 y 0,73, siendo el valor de  $\overline{K}_{clear} = 0,68$  el mejor para las mediciones de los cinco años para San Luis. Este valor es más ajustado que el dado por Torre Deluysi y Fasulo (2002), que publicaban un valor de  $\overline{K}_{clear} = 0,7$ .

La ecuación de Suehrcke (2) es interesante dado que a partir de  $\overline{K}_{clear}$  se puede obtener el valor de  $\overline{H}$  a partir de la expresión:

$$\bar{H} = \bar{H}_o \bar{K}_{clear} (f_{clear})^{1/2} \quad (3)$$

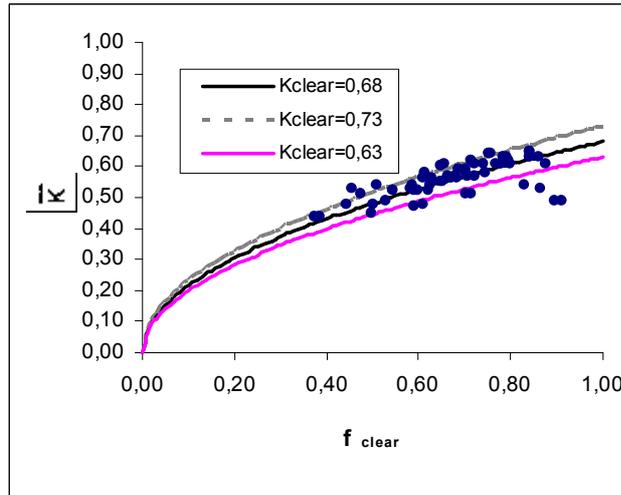


Figura 2. Datos experimentales de San Luis y la relación de entre  $f_{clear}$  y  $\bar{K}$  para diferentes valores de  $K_{clear}$ .

A partir de la expresión (3) se obtienen los valores de  $\bar{H}$ , de igual modo se obtienen los valores al aplicar los modelos Ångström-Prescott, Reitel, y la de Glover y McCulloch y se los compara con los valores medidos. En el modelo de Ångström-Prescott se utilizan como constantes  $A = 2,28$  y  $B = 0,42$ , valores esto encontrados por Torre Deluisi y Fasulo (2002).

Se muestran los resultados en la Tabla 1 en la que se incluyen los errores RMSE y MBE y en la Figura 3 se muestran la comparación entre el promedio mensual de la radiación global diaria medida y la de los modelos para el año 2002.

En la figura 3 se observa que para el mes de noviembre todos los modelos sobreestiman los valores de  $\bar{H}$ , encontrando su explicación en el hecho que para ese mes el valor de  $\frac{\bar{K}}{K_{clear}}$  es equivalente a 0,93, siendo este muy elevado ya que muestra un alto valor del índice de claridad para los días de cielo claro.

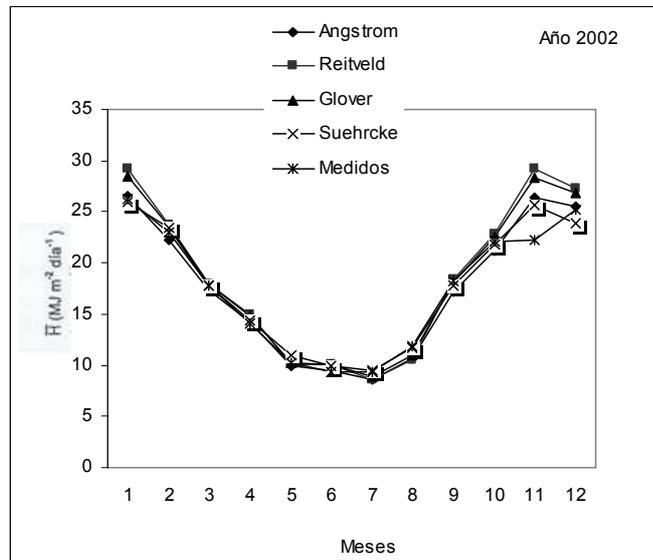


Figura 3 Comparación entre los valores medidos de la radiación global diaria y los obtenidos por los diferentes modelos.

Desde la simple comparación visual de los valores que predicen los modelos no se puede juzgar la mejor aproximación de un modelo sobre otro. El tratamiento estadístico de las diferencias relativas porcentuales entre los valores estimados y los medidos, los modelos de Ångström-Prescott y el propuesto por Suehrcke son los que presentan menores valores de MBE y de RMSE, con una ligera ventaja para el de Suehrcke. El RMSE es un valor bajo para todos los modelos y siendo un poco mayor al 1% para los modelos que mejor aproximan.

Los modelos en general son una buena aproximación y particularmente el más reciente de Suehrcke, ya que una aplicación de éste último resultaría en una predicción de la radiación solar media para San Luis con una precisión del orden del 1 al 2%.

Mes	Dif. Rel. % Ångström	Dif. Rel. % Reitvel	Dif. Rel. % Glover	Dif. Rel. % Suehrcke
1	-1,25	-11,09	-8,22	1,30
2	3,10	-3,28	-2,21	-2,10
3	2,43	-0,77	-1,48	-0,63
4	-0,69	-6,22	-5,72	-2,30
5	3,29	1,53	0,04	-6,39
6	-1,37	-7,93	-6,88	-6,14
7	7,21	8,11	5,25	-1,44
8	10,00	11,68	8,46	2,29
9	6,18	-0,78	0,68	2,85
10	3,92	-3,39	-1,79	1,66
11	-18,62	-31,38	-27,33	-15,45
12	-1,24	-8,48	-7,05	5,30
MBE	-0,03	1,09	0,92	0,24
RMSE	1,36	2,36	1,99	1,13

Tabla 1 Diferencias relativas porcentuales de los valores de  $\bar{H}$  obtenidos por los modelos y los valores medidos, junto a los valores de MBE y RMSE.

## RADIACIÓN DIFUSA

El conocimiento cuantitativo de la fracción difusa de la radiación solar global, en una localidad en particular, puede ser importante en el diseño de sistemas solares.

Desarrollar el concepto de fracción de tiempo de cielo claro, se derivar de la relación entre las horas de sol y la radiación, y esta fracción se expresar en términos de cantidades globales de la radiación. Las cantidades medias mensuales de radiación difusa se pueden relacionar con las cantidades globales de la radiación (directa +difusa) usando la fracción de radiación difusa de Page (1961):

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1 - c\bar{K} \quad (4)$$

donde  $\bar{H}_d$  es la radiación difusa de la superficie horizontal diaria mensual del promedio, y  $\bar{H}$  es la radiación global diaria del promedio mensual (directa +difusa), c es una constante y  $\bar{K}$  es el índice diario de la claridad del promedio mensual.

En una comparación estadística de las varias relaciones difusas de la fracción, la relación (3) antedicha se ha encontrado para ser simple y exacta. La relación también ha sido verificada por el autor y una constante empírica virtualmente idéntica a la constante de la página de c=1.11 fue obtenida para Perth, Australia (Suehrcke y McCormick, 1988).

La figura 4 muestra la relación con c = 1,13 propuesta por Page (1961) y los datos experimentales con su respectiva línea de tendencia para la Ciudad de San Luis.

Se encuentra para diferentes intervalos de tiempos la cantidad de día muy nublados (valores de  $K_t \leq 0,3$ ), parcialmente nublados (valores de  $0,3 < K_t < 0,7$ ) y con cielo claro (valores de  $K_t \geq 0,7$ ). Se obtiene las gráficas de  $K_d$  respecto a  $K_t$ , para cada uno de los intervalos tomados. Durante los días muy nublados la radiación difusa es igual a la radiación global, durante los días parcialmente nublados la radiación difusa oscila entre un 20 y 35 % de los valores de la radiación extraterrestre.

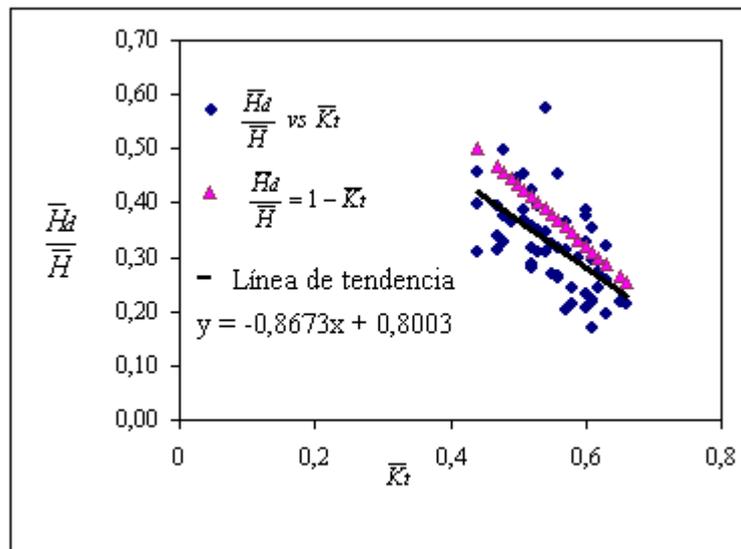


Figura 4: Datos de la fracción difusa en relación con el índice de claridad.

En la Figura 5 se muestra la gráfica de  $K_d$  vs.  $K_t$  donde se observa la distribución para el trimestre febrero-marzo-abril del año 2002, pudiendo distinguir las proporciones de puntos que se encuentran con valores de  $K_t \leq 0,3$ ,  $0,3 < K_t < 0,7$ , y  $K_t \geq 0,7$ , esta distribución es típica según la variación de la radiación difusa diaria como función del índice de claridad propuesta por Iqbal (1983).

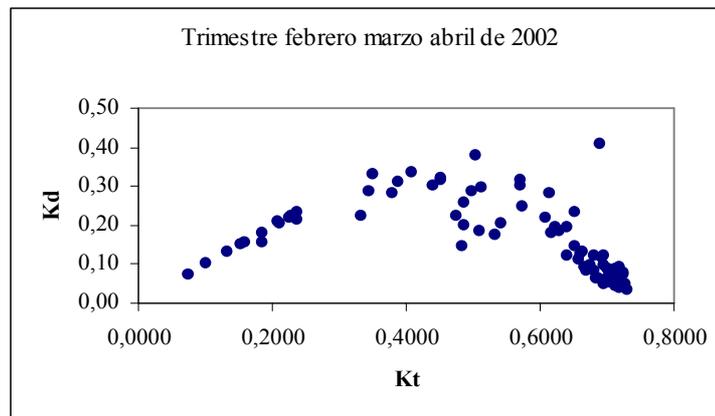


Figura 5: Distribución de la radiación difusa como una función del índice de claridad.

Para cada mes de los cinco años se contaron la cantidad de día muy nublados, parcialmente nublados y con cielo claro, obteniendo los valores porcentuales para cada mes, los que son mostrados en la Tabla 2, en la cual también se da el valor de MEI (Multivariate ENSO Index) que es un índice del ENSO (El Niño Southern Oscillation), fenómeno comúnmente conocido como El Niño, que se refiere a los cambios de temperatura de la superficie del mar en la zona este del Océano Pacífico en la región ecuatorial (Wolker 1987).

Este fenómeno tiene efectos que se pueden apreciar en todo el planeta, en Sud América las señales del El Niño se manifiestan con clara incidencia en las variables climáticas. El MEI con valores positivos es indicativo de temperaturas del mar positivas o sea de la presencia de El Niño, para valores negativos de MEI el resultado es en sentido contrario llamando La Niña, y en caso de no registrarse variaciones significativas se considera la no presencia del fenómeno.

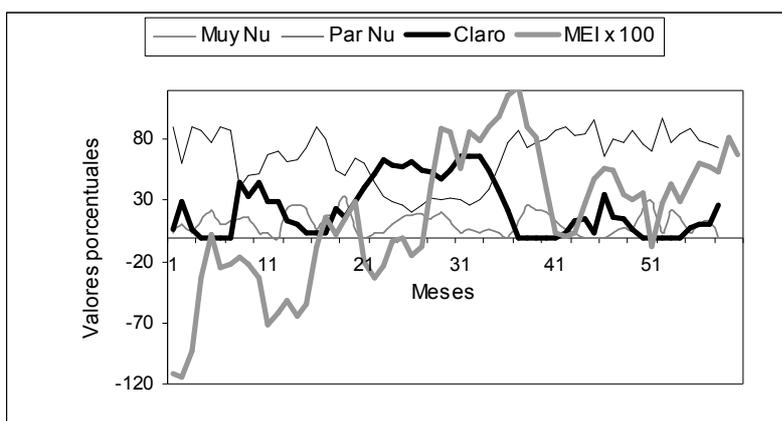


Figura 6 : Valores porcentuales de días muy nublados, parcialmente nublados y de cielo claro, junto al índice MEI multiplicado por 100.

Meses	Días Muy Nublados (%)	Días Parcialmente Nublados (%)	Días de Cielo Claro (%)	Índice MEI	Meses	Días Muy Nublados (%)	Días Parcialmente Nublados (%)	Días de Cielo Claro (%)	Índice MEI
1	3,23	90,32	6,45	-1,118	32	12,9	32,26	54,84	0,853
2	10,71	60,71	28,57	-0,339	33	3,33	30	66,67	0,795
3	3,45	89,66	6,9	0,028	34	6,67	26,67	66,67	0,907
4	13,33	86,67	0	-0,25	35	3,45	31,03	65,52	0,987
5	22,58	77,42	0	-0,221	36	6,45	38,71	54,84	1,151
6	10	90	0	-0,161	37	3,7	59,26	37,04	1,227
7	12,9	87,1	0	-0,224	38	0	77,78	22,22	0,907
10	15	40	45	-0,333	39	12,9	87,1	0	0,812
11	16,67	50	33,33	-0,712	40	26,67	73,33	0	0,385
12	3,23	51,61	45,16	-0,611	41	22,58	77,42	0	0,035
13	3,57	67,86	28,57	-0,521	42	20	80	0	0,01
14	0	70,37	29,63	-0,641	43	12,9	87,1	0	0,039
15	24,14	62,07	13,79	-0,552	44	6,45	90,32	3,23	0,27
16	26,67	63,33	10	-0,08	45	3,45	82,76	13,79	0,473
17	23,33	73,33	3,33	0,159	46	0	84,62	15,38	0,561
18	6,9	89,66	3,45	0,025	47	0	96,3	3,7	0,544
19	16,13	80,65	3,23	0,146	48	0	65,38	34,62	0,344
20	20,69	55,17	24,14	0,289	49	3,23	80,65	16,13	0,309
21	33,33	50	16,67	-0,21	50	7,69	76,92	15,38	0,369
22	6,45	64,52	29,03	-0,328	51	6,45	87,1	6,45	-0,083
23	0	60	40	-0,24	52	23,33	76,67	0	0,271
24	3,23	45,16	51,61	-0,032	53	29,03	70,97	0	0,439
25	3,33	33,33	63,33	-0,011	54	3,33	96,67	0	0,289
26	11,11	29,63	59,26	-0,147	55	22,58	77,42	0	0,458
27	16,13	25,81	58,06	-0,081	56	16,13	83,87	0	0,604
28	17,24	20,69	62,07	0,414	57	3,57	89,29	7,14	0,58
29	19,35	25,81	54,84	0,882	58	10,71	78,57	10,71	0,532
30	14,29	32,14	53,57	0,853	59	13,33	76,67	10	0,82
31	20,69	31,03	48,28	0,558	60	0	73,08	26,92	0,678

Tabla 2: Porcentaje de días muy nublados, parcialmente nublados y de cielo claro, junto al índice MEI.

## CONCLUSIONES

Se verifican las relaciones propuestas por Suehrcke entre la fracción de cielo claro y el índice claridad, y su aproximación con los valores experimentales cinco años de medición para la ciudad de San Luis.

Con los datos de radiación registrados en San Luis, se encuentra que los modelos de Ångström-Prescott, Reitvel, Glover-McCulloch y Suehrcke ajustan bien. Distinguiendo entre ellos el de menor error al modelo de Suehrcke considerando un valor de  $K_{clear} = 0,68$ .

Se encuentra la correlación entre  $\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}}$  y  $\overline{K}$ , verificando su relación lineal con pendiente negativa y su semejanza con la relación de Page.

Se obtienen los valores porcentuales de días muy nublados, parcialmente nublados y de cielo claro, y se observa la influencia del fenómeno ENSO sobre éstos, concluyendo que dicho fenómeno se manifiesta sobre los días de cielo claro. Esta conclusión se fundamenta en que la correlación de Pearson entre días muy nublados y parcialmente nublados con el índice MEI da valores negativos, y dicha correlación entre los días de cielo claro y el índice MEI da positivo.

## REFERENCIAS

- Black J. N., Bonython C. W. and Prescott J. A. (1954) Solar radiation and the duration of sunshine. Q. J. R. Met. Soc. 80, 231- 235.
- Glover J. and McCulloch J. S. G. (1958) The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. Q. J. R. Meteorol. Soc. 84, 172-175.
- Iqbal M. (1983). An Introduction to Solar Radiation, Academic Press, New York.
- Page J. K. (1961) The estimation of monthly mean values of daily total short wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N-40°S. In Proceedings of United Nations Conference on New Sources of Energy, Paper S/98, Vol. 4, pp. 378-390, Rome.
- Reitvel M. R. (1978) A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. Agr. Meteorol. 19, 243-252.
- Suehrcke H. (2000) On the relationship between duration of sunshine and solar radiation on the earth's surface: Ångström's equation revisited. Solar Energy 68(5), 417-425.
- Suehrcke H. and McCormick, P. (1988). The diffuse fraction of instantaneous solar radiation. Solar Energy 40, p423.
- Torres Deluigi M. y Fasulo A. (2002) Aplicación y evaluación experimental de la ecuación de Suehrcke para calcular la fracción de días claros a través del índice de claridad. Avance en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 6 N° 2, pp 11.19-11.24.
- Walker K. (1987). The Southern Oscillation in surface circulation and climate over tropical Atlantic, Eastern Pacific, and Indian Oceans as captured by cluster analysis. J. Climate Appl. Meteor., 26, 540-558.

**ABSTRACT:** In the present paper the measured solar radiation in the city of San Luis during five years is analyzed. The values of the clarity index and the fraction of clear days are obtained, verifying the Suerhrhcke relation, comparing the measured values with the obtained by the Ångström-Prescott, Reitvel, and Glover and McCulloch models, and analyzing the MBE and RMSE errors. The diffuse fraction of the global solar radiation is analyzed, finding the correlation between  $\overline{K_d}$  and  $\overline{K_t}$  and the one proposed by Page, and the percentage of very cloudy, partially cloudy and clear days are found, looking forward to find a relation with the El Niño Southern Oscillation

**Key words:** solar radiation, clearness index, fraction of clear sky.