

ESTUDIO DE UN MODELO EMPÍRICO DE DESCOMPOSICIÓN HORARIA DE LA RADIACIÓN SOLAR MEDIA MENSUAL

F. Taddei, C. Raichijk

GERSolar, Instituto de Ecología y Desarrollo Sustentable (INEDES), Departamento de Ciencias Básicas,
Universidad Nacional de Luján, Ruta 5 y Avda. Constitución, (6700) Luján,
Buenos Aires, ARGENTINA, Tel. /Fax: (54-2323) 440241, E-mail: gersolar@mail.unlu.edu.ar

Recibido: 02/08/12; Aceptado: 03/10/12

RESUMEN: Se realizó un estudio de distintos modelos empíricos para calcular los valores horarios medios mensuales de la radiación solar global, difusa y directa a partir del dato de la radiación global diaria media mensual. Los valores horarios estimados mediante los modelos se contrastaron con los obtenidos de mediciones realizadas en la Estación Solarimétrica de la Universidad Nacional de Luján en el período enero 2011 - mayo 2012. Los coeficientes numéricos del modelo a su vez se ajustaron para minimizar los desvíos entre los resultados producidos y las mediciones, obteniéndose desvíos cuadráticos ponderados del orden del 5% para la radiación global horaria y del 13 % para la directa y difusa.

Palabras clave: Radiación solar media mensual y horaria, modelos de descomposición horaria.

INTRODUCCIÓN

La gran variabilidad a lo largo del año y del día de la radiación solar incidente en cada localidad de la superficie terrestre debe ser tenida en cuenta para el correcto dimensionamiento de muchas aplicaciones, en particular las térmicas, por lo que resulta importante conocer los valores esperados del recurso en base horaria. A su vez, para estimar la radiación solar recolectada tanto por planos inclinados u orientados en distintos ángulos como en superficies concentradoras, se debe contar con valores horarios de radiación global y de sus componentes difusa y directa. Sin embargo, esa información no existe en la mayoría de los sitios, lo que hace necesario desarrollar modelos que permitan estimarla a partir de otros valores más frecuentemente disponibles, tales como los de radiación global diaria media mensual.

Este tipo de descomposición horaria de la irradiación de largo plazo ha sido tratado por diversos autores (Collares-Pereira y Rabl, 1979; Jain, 1984; Baig et al., 1991; Iqbal, 1979; Aguiar y Collares-Pereira, 1992; Gueymard, 1993, 2000). En este trabajo se pone a prueba distintos modelos empíricos para producir series horarias de radiación solar global, difusa y directa sobre plano horizontal a partir del valor medido de la radiación global diaria media mensual en la localidad de Lujan, Argentina.

MATERIALES Y MÉTODO

Se contó con una base de datos simultáneos de radiación solar difusa, h_d , y radiación normal directa, h_{bn} , obtenidos en la Estación Solarimétrica de la Universidad Nacional de Luján ($34^{\circ} 35' S$, $59^{\circ} 03' W$, 20 msnm) durante el período enero 2011 – mayo 2012. Se utilizó un seguidor solar Kipp&Zonen SOLYS 2 controlado por GPS y dotado con una esfera sombreadora donde se monta un pirheliómetro Eppley NIP y un piranómetro Eppley 8-48 “Black and White” destinados a medir h_{bn} y h_d respectivamente. Las mediciones en los dos casos se efectuaron cada 1 minuto.

También se consideraron valores de radiación solar global, h_G , obtenidos mediante un piranómetro de primera clase (Kipp & Zonen CMP11) interrogado por un datalogger Campbell CR10x una vez por segundo, en el cual se almacenan las integrales de irradiación cada diez minutos. La base de datos integrados en base horaria ha sido depurada a fin de eliminar información dudosa. El control de calidad empleado es el que se describe en Raichijk (2012). Los valores horarios obtenidos de radiación global se contrastaron con la suma de sus componentes difusa y directa sobre plano horizontal, h_b , como una prueba de consistencia entre los mismos, observándose discrepancias del orden de 2%. Sólo se tuvieron en cuenta los datos correspondientes a alturas solares mayores que 5° .

Esta base de datos fue utilizada para analizar el desempeño de los modelos al comparar valores medidos y predichos en base horaria. El estimador estadístico usado para calificar el desempeño fue el desvío cuadrático medio ponderado, con un coeficiente de ponderación igual a la fracción horaria de energía respecto de la energía total diaria.

El método propuesto para determinar los valores horarios promedio de radiación global, difusa y directa consiste en: determinar a partir de las mediciones el valor de la radiación global diaria media mensual \bar{H}_G . Con este valor, deducir el de la radiación difusa diaria media mensual \bar{H}_d . Para esto se debe usar alguna correlación funcional entre \bar{H}_G y \bar{H}_d . En este trabajo se usaron dos diferentes, una propuesta por Page (1961) y otra por Collares Pereira y Rabl (1979), que se detallan más adelante.

Una vez provistos los valores diarios medios mensuales \bar{H}_G y \bar{H}_d se calculan los factores r_G y r_d que relacionan los promedios diarios con los horarios \bar{h}_G y \bar{h}_d según:

$$\bar{h}_G = r_G * \bar{H}_G \quad (1)$$

$$\bar{h}_d = r_d * \bar{H}_d \quad (2)$$

Este tipo de descomposición para la radiación fue introducida por Hottel y Whillier (1955) de manera cualitativa y mejorada poco después por Liu y Jordan (1960). En su aproximación consideran que la radiación se distribuye temporalmente como si no hubiera atmósfera, de manera que los factores r_G y r_d pueden calcularse como el cociente entre la radiación horaria y la diaria promedio a tope de atmósfera. Así, dichos factores dependen solamente de dos variables: la hora del día t (expresada mediante el ángulo horario $\omega = \frac{2\pi t}{T}$, donde $T = 24$ h) y la hora de puesta del sol t_s (expresada mediante el ángulo horario de salida o puesta del sol $\omega_s = \frac{2\pi t_s}{T}$) y resultan:

$$r_G(\omega, \omega_s) = r_d(\omega, \omega_s) = \frac{\pi}{T} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\text{sen} \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \quad (3)$$

Collares Pereira y Rabl (1979) reformularon el planteo de Hottel/Whillier y Liu/Jordan, pues se percataron que la atenuación atmosférica de la radiación directa y global depende del ángulo horario. Usaron una base de datos combinando 2 años de mediciones horarias de estaciones de Estados Unidos junto con los datos de Liu y Jordan y propusieron una ecuación corregida para el factor de atenuación de la radiación global, que incluye efectos atmosféricos:

$$r_G(\omega, \omega_s) = \frac{\pi}{T} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\text{sen} \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \quad (4)$$

con los coeficientes a y b dados por las expresiones

$$\begin{aligned} a &= 0,409 + 0,5016 * \text{sen}(\omega_s - 60^\circ) \\ b &= 0,6609 - 0,4767 * \text{sen}(\omega_s - 60^\circ) \end{aligned} \quad (5)$$

En el presente trabajo se utilizaron la ecuación (3) para el cálculo de r_d , y las expresiones (4) y (5) para calcular r_G , para luego, mediante (1) y (2) determinar las medias mensuales horarias de radiación global y difusa \bar{h}_G y \bar{h}_d . La radiación horaria media mensual directa sobre plano horizontal, \bar{h}_b , se obtiene como

$$\bar{h}_b = \bar{h}_G - \bar{h}_d \quad (6)$$

Los valores de radiación horaria media mensual calculados mediante las ecuaciones antes mencionadas (designados de aquí en adelante mediante la letra p) se compararon con los correspondientes valores determinados a partir de las mediciones (a los que designaremos de aquí en adelante mediante la letra h).

Se dividió el día en franjas temporales horarias de extensión 1 hora (t_i ; $t_i + 1$ h) con $0 \leq t_i \leq 23$ h cada una de las cuales se le asignaron dos valores de radiación horaria:

- el medido en esa franja, promediado a lo largo de todo un mes (\bar{h}_i)
- el calculado, usando el valor de ω_s del día medio de cada mes y el valor del ω central de cada franja, junto a valores medios mensuales medidos de \bar{H}_G y estimados mediante correlaciones que luego se detallan de \bar{H}_d (\bar{p}_i)

Para cada franja horaria de cada mes se produjeron tres pares de valores, correspondientes a radiación media mensual horaria global, difusa y directa sobre plano horizontal, medidas y calculadas:

	medida	calculada
global	\bar{h}_{Gi}	\bar{p}_{Gi}
difusa	\bar{h}_{di}	\bar{p}_{di}
directa	\bar{h}_{bi}	\bar{p}_{bi}

Tabla 1: Nomenclatura utilizada para valores horarios medios mensuales medidos y calculados de radiación global, difusa y directa sobre plano horizontal.

Para cada una de las tres componentes de la radiación, los valores calculados \bar{p}_i fueron comparados con los correspondientes medidos \bar{h}_i y se evaluaron los desvíos porcentuales $100 * \frac{\bar{p}_i - \bar{h}_i}{\bar{h}_i}$ en cada franja horaria. Como estimador estadístico de la

calidad de la predicción de la descomposición horaria del día promedio se usó C , definido como el valor cuadrático medio de los desvíos pesados con el factor $\frac{\bar{h}_i}{\bar{H}}$, donde \bar{H} representa el valor de la radiación diaria media mensual

$$C = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\bar{h}_i}{\bar{H}} \left(100 * \frac{\bar{p}_i - \bar{h}_i}{\bar{h}_i}\right)^2} \quad (7)$$

El factor de peso $\frac{\bar{h}_i}{\bar{H}}$ es la proporción de la radiación diaria que corresponde a cada franja horaria. Así en el valor de C tienen menor influencia las franjas horarias en las que se detectó una menor proporción de la radiación diaria (por lo general, estas franjas corresponden a los extremos del día).

Dado que los coeficientes a y b usados en esta descomposición fueron obtenidos por los autores mencionados usando una base de datos particular, se estudió ajustarlos a nuestra propia base de datos, minimizando el valor de C mediante un programa de minimización, llamando a este procedimiento modelo Collares y Rabl+. Los resultados obtenidos (Tabla 2) producen mejoras, aunque no muy notables en el valor de \bar{p}_G lo que sugiere un posible carácter genérico de la modelización, que debe ser estudiado en mayor profundidad con estadísticas más abundantes en datos.

Descomposición horaria de la radiación solar difusa

La descomposición horaria de la radiación solar difusa mediante los modelos estudiados implica como primer paso la determinación de su valor promedio mensual diario \bar{H}_d . Si se persigue el objetivo de poder determinarlo contando como único dato el valor promedio mensual diario de la radiación global \bar{H}_G , se debe establecer en primera instancia alguna correlación entre estos valores. Esta relación ha sido estudiada y se han formulado para ella diferentes propuestas (Erbs et al., 1982, Gopinathan y Soler, 1995), de las cuales hemos escogido la de Page (1961) y la de Collares Pereira y Rabl (1979).

La primera establece una relación lineal entre la fracción difusa media mensual $\bar{K}_d = \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}_G}$ en función del índice de claridad medio mensual $\bar{K}_T = \frac{\bar{H}_G}{\bar{H}_0}$ que no tiene en cuenta efectos estacionales

$$\bar{K}_d = 1,00 - 1,13 \bar{K}_T \quad (8)$$

La segunda correlación considera efectos estacionales (a través de la variable ω_S):

$$\bar{K}_d = 0,775 + 0,347 \left(\omega_S - \frac{\pi}{2}\right) - \left[0,505 + 0,261 \left(\omega_S - \frac{\pi}{2}\right)\right] \cos[2(\bar{K}_T - 0,9)] \quad (9)$$

Al aplicar esta correlación a su base de datos, Collares Pereira-Rabl (1979), obtienen una mejora en el ajuste de los datos respecto de la correlación propuesta por Page (1961).

En nuestro trabajo, probamos ambas correlaciones para obtener el valor medio mensual diario de la radiación difusa y posteriormente efectuar su descomposición horaria por medio de la relación (3). Las descomposiciones resultantes fueron calificadas por medio del estimador estadístico C , que produjo valores del orden del 15 % en la radiación difusa para la correlación de Page y algo mayores para la de Collares y Rabl (Tabla 2).

Para estudiar una posible mejora de la correlación (8) de Page, se llevó a cabo una ajuste lineal por cuadrados mínimos de los valores experimentales de promedios mensuales de \bar{K}_T y \bar{K}_d , llamándolo modelo Page+ o Page optimizado. El ajuste arrojó coeficientes muy próximos a los originales (Figura 2)

$$\bar{K}_d = 1,0237 - 1,1942 \bar{K}_T \quad (10)$$

y la descomposición horaria obtenida al usarlos no produjo mejoras sustanciales (Tabla 2).

Descomposición horaria de la radiación solar directa sobre plano horizontal

El valor medio mensual de la radiación directa horaria, \bar{h}_b , se calculó en este trabajo mediante (6) como la diferencia entre los valores calculados de la radiación global y la difusa. Por esta razón, los desvíos en las predicciones asociadas a la radiación directa son del orden de las asociadas a la difusa.

RESULTADOS

El desempeño de las diferentes versiones de los modelos usados en el trabajo se pueden evaluar mediante el análisis de los valores del estimador estadístico C mostrados en la Tabla 2.

A su vez, se muestran a modo de ejemplo en la Figura 1 las diferencias relativas porcentuales entre los valores de radiación horaria global, difusa y directa calculados mediante el modelo Collares y Rabl y los medidos, $100(p_i - h_i)/h_i$, en función de la hora central del intervalo horario para meses característicos de las distintas estaciones del año.

Ano	mes	\bar{K}_T	C				
			modelo				
			Coll/Pa	Coll+/Pa	Coll/Pa+	Coll/Coll	
2011	1	0,591	4,51	4,33			G
			13,28	13,28	9,95	22,58	D
			10,19	10,71	9,73	12,46	B
	2	0,595	6,14	5,86			G
			20,93	20,93	16,18	52,99	D
			10,53	10,52	9,22	21,48	B
	3	0,607	4,81	4,88			G
			8,50	8,50	7,83	21,15	D
			15,18	14,14	16,04	10,09	B
	4	0,553	4,38	4,16			G
			16,04	16,04	12,93	15,00	D
			10,08	9,36	8,79	9,64	B
	5	0,545	5,75	5,33			G
			7,91	7,91	9,26	10,66	D
			10,35	7,88	11,17	11,95	B
	6	0,437	3,13	3,00			G
			6,50	6,50	7,15	22,83	D
			6,80	8,45	7,63	26,75	B
	7	0,540	4,61	4,33			G
			10,58	10,58	10,48	13,03	D
			11,53	8,99	12,01	14,13	B
	8	0,498	7,63	7,11			G
			11,37	11,37	10,47	10,63	D
			11,65	10,57	11,14	10,92	B
	9	0,592	4,72	4,27			G
			10,62	10,62	10,58	12,06	D
			11,47	13,93	11,81	11,52	B
	10	0,537	4,40	4,34			G
			6,54	6,54	6,38	9,35	D
			8,24	9,63	8,22	9,26	B
	11	0,601	4,57	4,43			G
			10,35	10,35	12,10	19,80	D
			10,47	11,68	11,34	12,04	B
	12	0,624	4,93	4,35			G
			10,27	10,27	11,89	53,20	D
			12,24	14,24	13,03	23,45	B
2012	1	0,634	4,69	4,44			G
			17,90	17,90	15,32	43,31	D
			11,89	13,47	12,02	16,73	B
	2	0,557	3,81	2,64			G
			7,12	7,12	5,67	18,77	D
			9,64	6,72	9,71	12,76	B
	3	0,568	3,75	3,39			G
			13,15	13,15	10,24	14,16	D
			11,05	12,03	10,54	11,27	B
	4	0,313	9,33	7,63			G
			66,91	66,91	67,82	13,71	D
			48,37	48,98	48,91	19,21	B
	5	0,439	24,78	21,46			G
			11,53	11,53	10,99	24,43	D
			50,28	68,10	69,04	102,35	B

Tabla 2: Desvíos estadísticos de la radiación global (G), difusa (D) y directa (B) producidos por la descomposición horaria según los modelos utilizados, identificados según la siguiente notación: Collares y Rabl, con cálculo de \bar{K}_d según Page: Coll/Pa; Collares y Rabl, con coeficientes optimizados y cálculo de \bar{K}_d según Page: Coll+/Pa; Collares y Rabl, con cálculo de \bar{K}_d según Page optimizado: Coll/Pa+; Collares y Rabl, con cálculo de \bar{K}_d según Collares y Rabl: Coll/Coll.

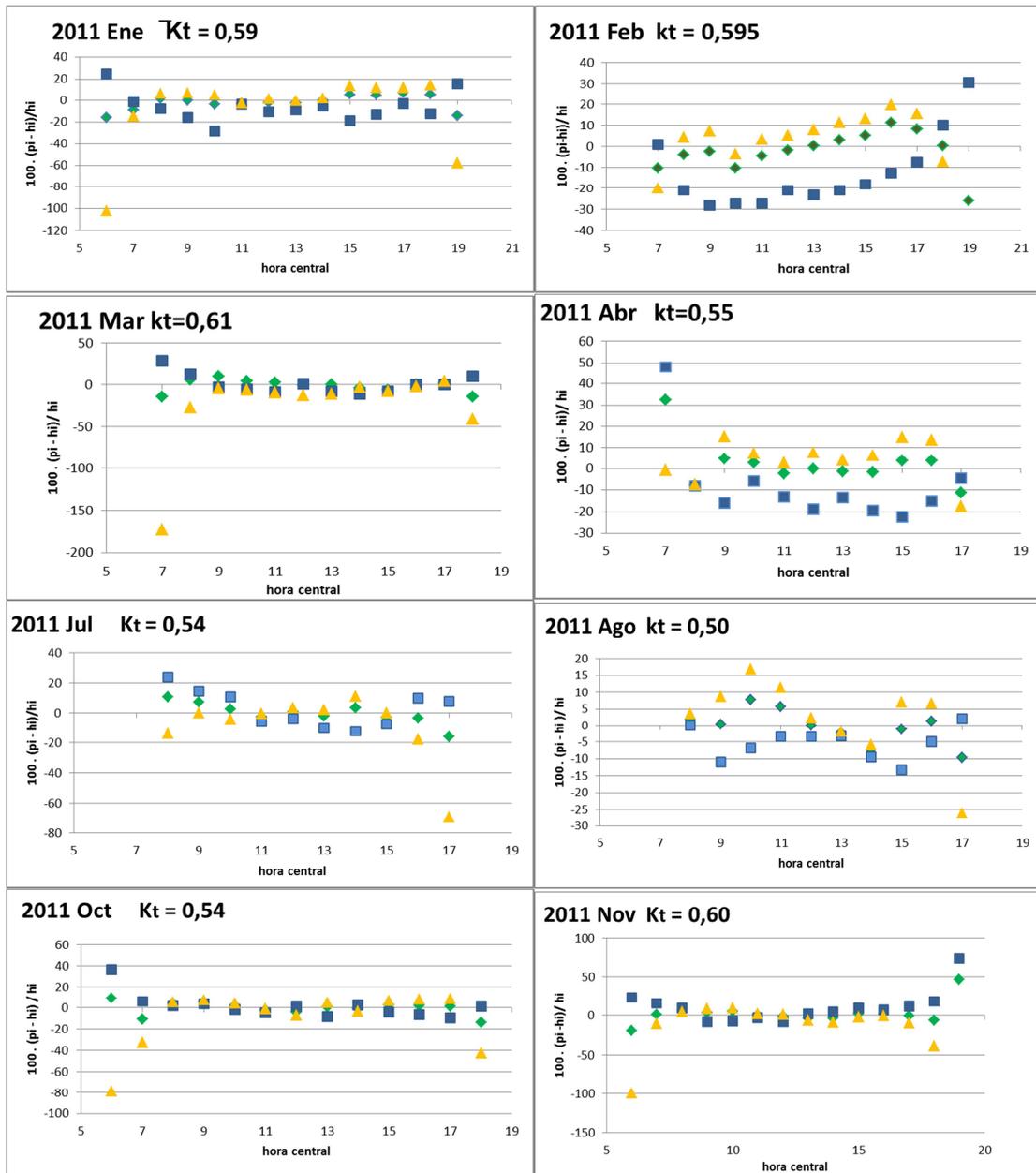


Figura 1: Diferencias relativas porcentuales entre la radiación horaria calculada mediante el modelo Collares y Rabl y la medida, en función de la hora central del intervalo horario para meses característicos de las distintas estaciones del año. Verde = global; Azul = difusa; Amarillo = directa.

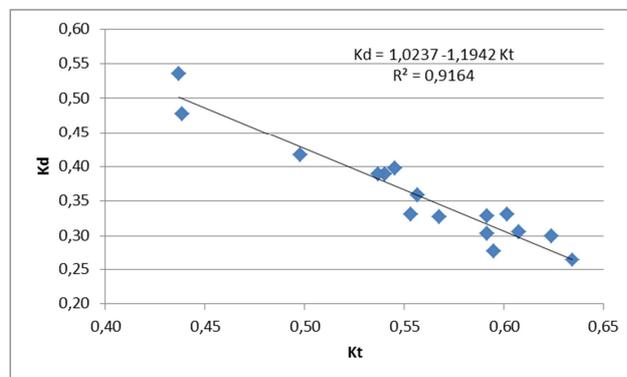


Figura 2: Valores de la fracción difusa media mensual \bar{K}_d vs índice de claridad medio mensual \bar{K}_T . La recta resulta del ajuste de los datos por cuadrados mínimos.

CONCLUSIONES

La descomposición horaria de la radiación diaria media mensual mediante el modelo de Collares Pereira y Rabl/ Page produce buenos resultados, con desvíos cuadráticos promedio menores al 20 % para las componentes difusa y directa y al 5 % para la global. La optimización de los coeficientes del modelo produce mejoras en los desvíos de la radiación global horaria, pero no en todos los casos, en la difusa y directa. Queda por estudiar si existe una relación funcional que permita calcular los coeficientes óptimos en función del día medio mensual.

Es posible suponer que la calidad de la descomposición horaria de la radiación difusa dependa fuertemente de la calidad de la predicción inicial del valor medio diario mensual \bar{H}_d , pero el análisis de los valores muestra que tal dependencia no es tan marcada. Más aun, hay meses en los cuales el valor promedio de \bar{H}_d que proporciona el ajuste es muy próximo al valor medido y, no obstante, los valores producidos por la descomposición horaria proporcionan un valor de C del orden del 10%, comparable al de meses en que el valor de partida de \bar{H}_d difiere bastante del valor medido. Esto hace suponer que es el método de descomposición el que ofrece limitaciones y que debe ser revisado si se quiere producir resultados más fieles. Un análisis más detallado de estos aspectos queda por efectuarse para sacar conclusiones más definitivas al respecto. Estas conclusiones deberán ser revisadas en el futuro a la luz de una estadística de datos más abundante (en este trabajo solo se analizaron 17 meses).

REFERENCIAS

- Aguar, R. y Collares-Pereira, M. (1992) Statistical properties of hourly global solar radiation. *Solar Energy* 48, 157–167.
- Baig A., Akhter P. and Muffi A. (1991) A novel approach to estimate the clear day global radiation. *Renew. Energy* 1, 119-123.
- Collares Pereira, M. y Rabl, A. (1979) The average distribution of solar radiation. Correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values, *Solar Energy* 22, 155 – 164
- Erbs D., Klein S., Duffie J. (1982) Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation. *Solar Energy* 28, 4, 293-302.
- Gopinathan K. y Soler A. (1995) Diffuse radiation models and monthly-average, daily, diffuse data for a wide latitude range. *Energy* 20, 7, 657-667.
- Gueymard, C. (1993) Critical analysis and performance assessment of clear solar sky irradiance models using theoretical and measured data. *Solar Energy* 51, 121–138.
- Gueymard, C. (2000) Prediction and performance assessment of mean hourly solar radiation. *Solar Energy* 68, 285–303.
- Hottel H. y Whillier A. (1955) Evaluation of flat plate solar collector performance. *Trans. Conf. on the use of solar energy, The scientific basis 2, part 1, section A, 74 – 104*
- Iqbal M. (1979) A study of Canadian diffuse and total solar radiation data – II Monthly average hourly horizontal radiation.. *Solar Energy* 22, 87–90.
- Jain P. C. (1984) Comparison of techniques for the estimation of daily global irradiation and a new technique for the estimation of hourly global irradiation. *Solar wind technology* 1, 123 - 134
- Liu B. y Jordan R. (1960) The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy* 4, 3, 1 – 19.
- Page, J. (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, *Proc. U.N. Conf. on New Sources of Energy*, paper S98, vol 4, 378 -388
- Raichijk C. (2012) Control de calidad de mediciones de radiación solar. Presentado en XXXV Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES), Rosario, Argentina.
- Soler A. (1990) Dependence on latitude of the relation between the diffuse fraction of solar radiation and the ratio of global-to-extraterrestrial radiations for monthly average daily values. *Solar Energy*; 44:297–302.

STUDY OF EMPIRICAL MODEL FOR GENERATING HOURLY SERIES OF GLOBAL, DIFFUSE AND DIRECT SOLAR RADIATION

ABSTRACT: A study of empirical models for producing hourly series of global, diffuse and direct insolation from the only data of monthly mean daily global irradiation was carried out for the location of Lujan, Argentina. Calculated values were contrasted with experimental data obtained at the Estación Solarimétrica de la Universidad Nacional de Luján from January 2011 to May 2012. Numerical coefficients of the model were adjusted in order to minimize differences between measured and calculated values, resulting mean quadratic deviations of 5 % for hourly mean global and 13 % for diffuse and direct insolation.

Keywords: mean monthly and hourly solar radiation, hourly decomposition models.