

APLICACIÓN DE MÉTODOS PARA ESTIMAR IRRADIACIÓN SOLAR GLOBAL MEDIA MENSUAL A TRAVÉS DE VARIABLES METEOROLÓGICAS. CASO DE ESTUDIO: CIUDAD DE SALTA (ARGENTINA).

Germán A. Salazar, Alejandro L. Hernández, Luis. R. Saravia
Departamento de Física – Facultad de Ciencias Exactas – Universidad Nacional de Salta
INENCO (Instituto de Investigación en Energías No Convencionales) - CONICET
Avda. Bolivia 5150 – CP A4408FVY – Salta Capital - Salta - Argentina
e-mail: salazarg@unsa.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se comparan los resultados obtenidos al estimar valores medios mensuales de irradiación solar, \bar{H} entre mayo de 2007 y febrero de 2008, para la ciudad de Salta, mediante dos tipos de modelos lineales: el de la ecuación de Ångström-Prescott, que usa como única variable meteorológica a la heliofanía relativa \overline{HeR} , y los modelos de regresión lineal múltiple (R.L.M.), que agregan a la heliofanía relativa \overline{HeR} , la temperatura \bar{T} y la humedad relativa \overline{HR} como variables. Se detectaron variaciones en los valores de los parámetros meteorológicos respecto a valores del periodo 2006-2007, los que provocan que las estimaciones de \bar{H} (usando el modelo local presentado en este trabajo) tengan errores porcentuales mayores al 10%, respecto de valores medidos (mayo y agosto de 2007, febrero de 2008). En este trabajo además se presentan dos nuevos modelos lineales locales, que correlacionan mejor los valores de irradiación medidos con los estimados. Uno de esos modelos solo utiliza la temperatura \bar{T} y la humedad relativa \overline{HR} como variables meteorológicas de estimación.

Palabras clave: irradiación solar, parámetros meteorológicos, ecuación de Ångström-Prescott, regresión lineal múltiple.

INTRODUCCIÓN

La ecuación de Ångström-Prescott (ecuación A-P) se ha venido utilizado profusamente, ya que la misma permite estimar la irradiación solar a partir de valores de heliofanía relativa. Su expresión es

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \quad (1)$$

donde \bar{H} es la irradiación solar, \bar{H}_0 es la irradiación solar extraterrestre, \bar{n} es la cantidad de horas de sol registradas y \bar{N} es la cantidad de horas de Sol astronómicamente posibles (todos estos valores son medios mensuales). Este método permite utilizar la abundante información disponible sobre heliofanía, para estimar la irradiación solar en sitios donde o bien no se dispone de instrumentos para medirla directamente o bien donde ya no se tienen estaciones funcionando.

En nuestro país esta ecuación se utilizó para realizar el *Atlas de Energía Solar de la Republica Argentina* (H. Grossi Gallegos y R. Righini, 2007) a partir de la abundante información disponible de heliofanía suministrada por el Servicio Meteorológico Nacional y el I.N.T.A.

La desventaja que presenta este método es que los heliógrafos utilizados (tipo Campbell) presentan errores relacionados a su física (ángulos de incidencia) y sobre todo, en la calidad y tipo de fajas utilizadas. Otro método utilizado para estimar irradiación solar son los modelos matemáticos. Dichos modelos relacionan parámetros meteorológicos, como la temperatura, la humedad relativa, la heliofanía relativa, etc., para calcular la irradiación solar. Dichos modelos se pueden dividir en dos grupos principales:

- tipo fórmula Universal de Sayigh.
- tipo regresión lineal múltiple (R.L.M.).

Las primeras tienen la desventaja que las fórmulas no son tan “universales” como lo pregona su nombre: deben realizarse adaptaciones para ser representativas del clima de los sitios donde se aplican. Esta ecuación ha dado buenos resultados en países del sudeste asiático y en medio-oriente. Las segundas tienen la ventaja que son más fáciles de calcular, ya que el método de regresión lineal múltiple requiere solo de un sencillo cálculo matricial. El fin de este tipo de modelo es encontrar una ecuación lineal del tipo (Walpole *et al*, 2007)

$$\bar{H} = \beta_0 + \beta_1 \bar{T} + \beta_2 \overline{HR} + \beta_3 \overline{HeR} \quad (2)$$

donde \bar{T} es temperatura, \overline{HR} es humedad relativa, \overline{HeR} es heliofanía relativa (la que en la ecuación A-P se denotó como $\frac{\bar{n}}{\bar{N}}$) y los coeficientes β_i se calculan como

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \dots \\ \beta_m \end{pmatrix} \quad (3)$$

donde las matrices X e Y son en este caso

$$Y = \begin{pmatrix} \bar{H}_1 \\ \bar{H}_2 \\ \dots \\ \bar{H}_n \end{pmatrix} \quad X = \begin{pmatrix} 1 & \bar{T}_1 & \overline{HR}_1 & \overline{HeR}_1 \\ 1 & \bar{T}_2 & \overline{HR}_2 & \overline{HeR}_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \bar{T}_n & \overline{HR}_n & \overline{HeR}_n \end{pmatrix} \quad (4)$$

Estos métodos se usaron para estimar la irradiación solar media mensual \bar{H} , sobre plano horizontal, en la ciudad de Salta (lat. -24.78°, long. -65.40°, altura 1190 m.s.n.m.) durante el período de tiempo comprendido entre el 1/05/2007 y el 29/2/2008.

PRESENTACIÓN DE DATOS Y APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ÅNGSTRÖM-PRESCOTT

A partir de los datos de irradiación solar global diaria H recogidos en el Departamento de Física de la Universidad Nacional de Salta, y los valores de heliofanía efectiva brindados por el S.M.N., se construyeron matrices de n x 2, donde n es la cantidad de días que tiene un mes. Para calcular el N diario, es decir la cantidad de horas astronómicamente posibles de existir, se utilizó la ecuación (Grossi Gallegos, 2004)

$$N = \frac{2}{15^{\circ/h}} |\omega_s| \quad (5)$$

donde ω_s es el ángulo horario de salida y puesta de Sol.

Dividiendo la heliofanía efectiva por N, se tiene la heliofanía relativa diaria HeR, que es un valor que esta acotado entre 0 y 1. Para obtener el valor diario de K_t se necesitó calcular primero H_0 . La ecuación se muestra en (6).

Con estos datos se hizo una regresión lineal entre los valores de heliofanía relativa HeR (eje de las abscisas) y los K_t (eje de las ordenadas) para los días de cada mes. De esta manera se obtuvieron los valores de a (ordenada al origen) y b (pendiente), además del índice de correlación R^2 . Los resultados se muestran en la Tabla 1.

	b	a	R^2 (%)
Mayo 07	0.62	0.17	90
Junio 07	0.43	0.33	72
Julio 07	0.55	0.23	80
Agosto 07	0.64	0.18	92
Septiembre 07	0.65	0.17	87
Octubre 07	0.61	0.15	91
Noviembre 07	0.61	0.17	93
Diciembre 07	0.64	0.16	92
Enero 08	0.61	0.21	92
Febrero 08	0.64	0.18	87

Tabla 1. Valores de los coeficientes a y b para la ciudad de Salta, para el periodo de mayo de 2007 a febrero de 2008.

Comparando los valores de a y b con sus correspondientes del año pasado (Salazar *et al* ,2007), que se calcularon de la misma manera, se observa que han ocurrido cambios, que se aprecian en la Tabla 2. Se observa que para los meses de mayo, agosto, septiembre, octubre, noviembre diciembre, enero y febrero, la pendiente b aumentó respecto al año pasado. El coeficiente a disminuyó en cada uno de esos meses.

	Δb	Δa
Mayo (2006 – 2007)	-0.09	0.06
Junio (2006 – 2007)	0.22	-0.15
Julio (2006 – 2007)	0.07	-0.06
Agosto (2006 – 2007)	-0.12	0.05
Septiembre (2006 – 2007)	-0.08	0.05
Octubre (2006 – 2007)	-0.04	0.03
Noviembre (2006 – 2007)	-0.12	0.05
Diciembre (2006 – 2007)	-0.09	0.06
Enero (2007 – 2008)	-0.03	0.02
Febrero (2007 – 2008)	-0.10	0.04

Tabla 2. Diferencias porcentuales entre valores de los coeficientes a y b entre los periodos 2006-2007 con 2007-2008

Para realizar la estimación de la irradiación \bar{H} en cada mes, usando la ecuación A-P, se realiza el siguiente procedimiento:

- Tomando los valores mensuales de heliofanía relativa media mensual \overline{HeR} del año pasado y de este año (primera columna de la Tabla 3), se calcula el \bar{K}_t correspondiente a cada mes (tercera columna Tabla 3), multiplicando la

\overline{HeR} por el coeficiente b más el coeficiente a, según la ecuación (1), con los datos de la Tabla 1, y con los valores de a y b, correspondientes al año pasado.

- b) Se calcula la irradiación extraterrestre \overline{H}_0 para cada mes, usando el H_0 diario, a partir de la siguiente ecuación (Grossi Gallegos, 2004)

$$H_0 = \frac{24}{\pi} \cdot 3600 \cdot 1367 \left(1 + (0.033) \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot (d-2)}{365}\right) \right) (\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + \omega_s \cdot \sin\phi \cdot \sin\delta) \quad (6)$$

donde d es el día del año (1 para el primero de enero), ϕ es la latitud, δ es la declinación y ω_s es el ángulo horario de salida y puesta del sol. Todos los ángulos están en radianes. Este valor de H_0 es diario, por lo que se hace un promedio sobre todos los días para obtener el del mes.

- c) Se multiplica el valor del \overline{H}_0 correspondiente a un mes, por el \overline{K}_t correspondiente al mismo mes y se obtiene el valor estimado de \overline{H} para ese mes.
d) Se comparan los valores estimados y medidos de \overline{H} y se calcula el error porcentual promedio mediante:

$$EP = \left(\frac{\overline{H}_m - \overline{H}_e}{\overline{H}_m} \right) \cdot 100 \quad (7)$$

donde \overline{H}_m es el valor medido y \overline{H}_e es el valor estimado. También se calcula el error cuadrático medio (RMSE, siglas en inglés) mediante:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i (\overline{H}_{mi} - \overline{H}_{ei})^2}{M}} \quad (8)$$

donde \overline{H}_{mi} es el i-ésimo valor medido y \overline{H}_{ei} es i-ésimo el valor estimado y M es la cantidad de datos.

	\overline{HeR}	\overline{H} medido (MJ/m ²)	\overline{K}_t	\overline{H} estimado (MJ/m ²)	EP en \overline{H} (%)
May-06	0.40	10.80	0.45	10.90	-0.96
May-07	0.47	11.30	0.47	11.40	-0.93
Jun-06	0.49	10.70	0.5	10.80	-1.21
Jun-07	0.60	12.45	0.59	12.80	-2.80
Jul-06	0.66	13.10	0.58	13.20	-0.64
Jul-07	0.77	14.68	0.65	14.80	-0.82
Ago-06	0.67	16.10	0.58	15.70	2.44
Ago-07	0.60	15.27	0.56	15.2	0.43
Sep-06	0.69	20.30	0.62	20.40	-0.54
Sep-07	0.58	18.27	0.55	18.10	0.92
Oct-06	0.54	18.80	0.49	18.70	0.38
Oct-07	0.56	19.11	0.49	18.70	2.02
Nov-06	0.49	19.30	0.47	19.60	-1.40
Nov-07	0.55	21.28	0.51	21.20	0.23
Dic-06	0.55	22.60	0.53	22.80	-0.86
Dic-07	0.50	21.21	0.48	20.60	2.64
Ene-07	0.36	18.6	0.44	18.70	-0.49
Ene-08	0.31	17.10	0.4	17.00	0.61
Feb-07	0.45	18.60	0.47	18.80	-1.15
Feb-08	0.49	20.14	0.5	20.00	0.61

Tabla 3. Cálculo de \overline{H} , a partir de valores de \overline{HeR} y \overline{K}_t .

El error porcentual E.P. promedio entre los valores estimados y medidos para el periodo 2006-2007 es de -0.44 %, mientras que para el periodo 2007-2008 es 0.29 %. Se observa además que los errores porcentuales EP mensuales entre los \overline{H} medidos y estimados no superan el 3 %, lo que indica una buena correlación entre ellos. El RMSE para los datos de 2006-2007 es de 0.04 MJ/m² (RMSE % promedio = 0.23 %) y para 2007-2008 es de 0.07 MJ/m² (RMSE % promedio = 0.41 %). Fig. 1.

Los valores de \overline{H} estimados en la Tabla 3 surgieron operando con coeficientes a y b para cada mes en particular. Dado que los mejores resultados de la ecuación de A-P ocurrirían para datos medios mensuales resulta interesante comprobar que resultados se obtienen usando coeficientes a y b calculados para esta consideración estadística. Los coeficientes a y b para los valores medios mensuales de \overline{K}_t y \overline{HeR} medidos en el periodo 2007-2008 son a = 0.2123 y b = 0.5719, y para el periodo 2006-2007 eran a = 0.228 y b = 0.5362.

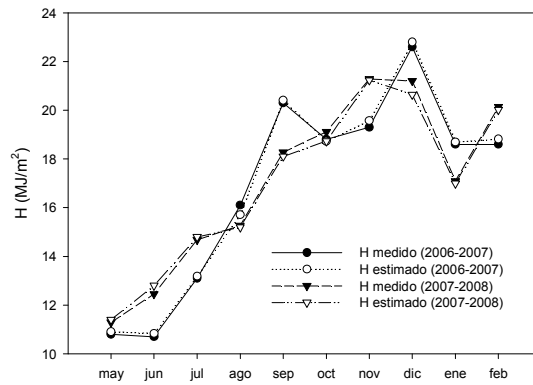


Figura 1. Comparación de \bar{H} estimado y \bar{H} medido con la ecuación A-P con coeficientes a y b calculados para cada mes.

En la Fig. 2 se muestran los resultados obtenidos al comparar los valores de \bar{H} medidos con los estimados usando los coeficientes a y b calculados por regresión lineal de \bar{K}_t y \bar{H}_eR medios mensuales para los periodos 2006-2007 y 2007-2008, como así también los estimados con coeficientes a y b cuyos valores son el promedio de los valores de a y b de cada mes de los periodos 2006-2007 y 2007-2008. Los valores promedio de los coeficientes para el primer periodo (2006-2007) son $a = 0.21$ y $b = 0.56$, mientras que para el segundo periodo (2007-2008) son $a = 0.20$ y $b = 0.60$. En la Fig. 3 se muestra lo mismo que en la Fig. 2 pero para los datos del periodo 2007-2008.

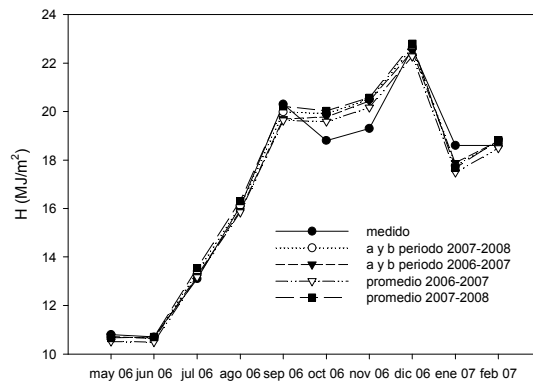


Figura 2. Comparación entre los valores medidos de H con los estimados para el periodo 2006-2007

Las diferencias porcentuales EP promedios entre el valor medido de \bar{H} y el estimado a partir de las distintas consideraciones estadísticas de a y b se muestran en la Tabla 4. Los coeficientes a y b calculados mediante valores medios mensuales de \bar{K}_t y \bar{H}_eR están denotados como a y b periodo 2006-2007 y a y b periodo 2007-2008 en la Tabla 4.

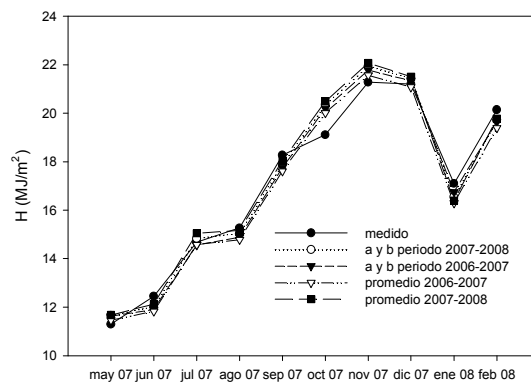


Figura 3. Comparación entre los valores medidos de H con los estimados para el periodo 2007-2008

Observando la Tabla 4 se aprecia que los coeficientes a y b surgidos de una regresión lineal de datos diarios es la que mejores resultados ofrece, como era de esperarse, ya que los coeficientes de la ecuación de A-P surgieron de los datos diarios del mes

que analiza y se lo prueba con valores que son el promedio de los valores diarios de la heliofanía relativa. No se puede apreciar que los mejores resultados se obtengan con los coeficientes de los valores promedios mensuales de irradiación y heliofanía relativa porque para calcular el EP promedio de los *a* y *b* por meses se utilizaron 20 pares de coeficientes (uno para cada mes y para cada periodo) mientras que para *a* y *b* periodo 200X-200Y se utilizaron solo dos pares de coeficientes.

	EP promedio				
	a y b periodo 2007-2008	a y b periodo 2006-2007	Promedios de a y b 2006-2007	Promedios de a y b 2007-2008	a y b por meses
datos 2006-2007	-0.86	-0.31	0.82	-1.31	-0.44
datos 2007-2008	-0.27	0.36	1.41	-0.77	0.29
EP promedio (valores absolutos)					
datos 2006-2007	2.34	2.30	2.67	2.65	1.01
datos 2007-2008	2.70	2.65	2.91	2.86	1.18

Tabla 4. Error porcentual promedio entre los valores medidos de \bar{H} y los estimados según cada tratamiento de los datos.

MODELO LINEAL LOCAL OBTENIDO POR REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE DE VARIABLES METEOROLÓGICAS DE FÁCIL OBTENCIÓN.

En el trabajo de Salazar, Hernández y Saravia (2008) y en otro que se encuentra en revisión (RENE-D-08-429), se construyeron y estudiaron varios modelos matemáticos lineales que relacionan variables meteorológicas de fácil disposición (temperatura, humedad relativa y heliofanía relativa) con el valor de la irradiación global \bar{H} media mensual, todo esto para la región de la ciudad de Salta (fondo del Valle de Lerma). Estos modelos surgieron de valores medios mensuales (de enero a diciembre) de irradiación \bar{H} , temperatura \bar{T} , humedad relativa \overline{HR} y heliofanía relativa \overline{HeR} acomodados en 5 series de datos. La primera contenía datos del periodo comprendido entre los años 1968 a 1976, la segunda de 1982 a 1990, la tercera de 1991 a 2000, la cuarta de 2006 a 2007 y la última de todos los anteriores juntos. Aplicando R.L.M.(ecuaciones 3 y 4) se calcularon los coeficientes β_i que se muestran en la ecuación 9, que es la que surge de toda la información disponible.

$$\bar{H} = 0.89\bar{T} - 0.09\overline{HR} + 10.79\overline{HeR} + 1.67 \quad (9)$$

$$R^2 = 90.7$$

Este es el modelo llamado *Completo*, por haber surgido de toda la información de las series antes mencionadas. El RMSE calculado oportunamente para este modelo fue de 1.03 MJ/m². (RENE-D-08-429).

Los datos de irradiación \bar{H} medida y de las variables meteorológicas, para el periodo de mayo de 2007 a febrero de 2008, se presentan en la Tabla 5. En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos al aplicar la ecuación 9 para estimar la irradiación \bar{H} .

	\bar{H} (MJ/m ²)	\bar{T} (°C)	\overline{HR} (%)	\overline{HeR}
Mayo 07	11.30	11.05	80	0.47
Junio 07	12.45	10.67	71	0.60
Julio 07	14.68	9.23	58	0.77
Agosto 07	15.27	9.47	56	0.60
Septiembre 07	18.27	16.95	55	0.58
Octubre 07	19.11	20.44	62	0.56
Noviembre 07	21.28	19.86	66	0.55
Diciembre 07	21.21	21.29	72	0.5
Enero 08	17.10	20.70	83	0.31
Febrero 08	20.14	20.14	79	0.49

Tabla 5. Datos de irradiación y meteorológicos mensuales para la ciudad de Salta, entre mayo de 2007 y febrero de 2008.

	\bar{H} medido (MJ/m ²)	\bar{H} estimado(MJ/m ²)
May 07	11.30	9.37
Jun 07	12.45	11.27
Jul 07	14.68	12.98
Ago 07	15.27	11.56
Sep 07	18.27	18.03
Oct 07	19.11	20.27
Nov 07	21.28	19.36
Dic 07	21.21	19.55
Ene 08	17.10	16.00
Feb 08	20.14	17.79
EP promedio (%)		9.26
RMSE (MJ/m ²)		1.91

Tabla 6. Resultados obtenidos de aplicar el modelo a los datos actuales, y sus errores.

Se observa en la tabla que el RMSE de los valores de \bar{H} estimados por el modelo para los meses consignados es mayor al RMSE calculado para el modelo original (1.03 MJ/m²). Si se aplica este modelo a los datos de mayo de 2006 a febrero de 2007 se obtiene un EP promedio de 1.51 % y un RMSE de 1.11 MJ/m², es decir, el RMSE es menor que el calculado para los datos actuales. Los resultados tienen una diferencia, en RMSE, de 85 % para el caso de los datos 2007-2008 y de 8 % para los datos 2006-2007 tomando como referencia a 1.03 MJ/m².

Para entender el porqué de esta discrepancia se debe observar primero cuáles y cuánto variaron los valores de la irradiación medida y de las variables meteorológicas entre los periodos estudiados en este trabajo, lo que se aprecia en la Tabla 7 y la incidencia de cada variable meteorológica en el valor final del \bar{H} estimado.

	$\Delta \bar{H}$ (MJ/m ²)	$\Delta \bar{T}$ (°C)	$\Delta \overline{HR}$ (%)	$\Delta \overline{HeR}$
Mayo (2006 – 2007)	-0.50	1.46	-0.10	-0.07
Junio (2006 – 2007)	-1.75	1.89	8.04	-0.11
Julio (2006 – 2007)	-1.58	4.09	8.58	-0.11
Agosto (2006 – 2007)	0.83	3.77	2.53	0.07
Septiembre (2006 – 2007)	2.03	-1.42	-9.14	0.11
Octubre (2006 – 2007)	-0.31	0.11	1.94	-0.02
Noviembre (2006 – 2007)	-1.98	0.85	0.27	-0.06
Diciembre (2006 – 2007)	1.39	1.25	1.72	0.05
Enero (2007 – 2008)	1.50	0.54	-2.43	0.05
Febrero (2007 – 2008)	-1.54	0.85	1.11	-0.04

Tabla 7. Variaciones de los parámetros entre datos del año pasado y los actuales

Siguiendo la línea de investigación iniciada en el trabajo de Salazar, Hernández y Saravia (2008) se determinó que para el *Modelo Completo* es el valor de la temperatura \bar{T} el más importante para la determinación del valor de \bar{H} . Esto se nota porque el coeficiente de correlación R^2 del modelo original es 90.7, mientras que un modelo similar al *Completo* pero que solo utiliza como variable meteorológica la temperatura tiene como coeficiente de correlación 72.6, indicando que la variabilidad de los valores estimados de \bar{H} es atribuible mayormente a la variabilidad de la temperatura (por definición de coeficiente de correlación).

Si se presentan valores mensuales de \bar{T} , \overline{HR} y \overline{HeR} que exhiban marcadas diferencias para los que se podrían esperar para un cierto mes, es altamente probable que el modelo estime un valor de \bar{H} que sea muy distinto al valor medido para ese mes. Dicho de otra manera, el modelo *Completo* es más sensible a variaciones de la variable Temperatura que a las de las otras dos.

PLANTEO DE DOS NUEVOS MODELOS LINEALES

El *Modelo Completo* (ecuación 9) se obtuvo a partir de una regresión lineal múltiple con datos de temperatura \bar{T} , humedad relativa \overline{HR} , heliofanía relativa \overline{HeR} y valores medidos de irradiación \bar{H} , de donde se obtuvo una serie de coeficientes β_i . La idea es, en base a la relación entre los valores empíricos de \bar{H} con \bar{T} , \overline{HR} y \overline{HeR} , estimar valores de \bar{H} a partir de valores de variables meteorológicas.

En este trabajo el *Modelo Completo* original ha sido mejorado, agregándole información promediada correspondiente a los meses de mayo a febrero de 2006 – 2007 y 2007 – 2008, además de correcciones menores en los valores de temperatura y humedad relativa en otras series. El nuevo modelo surgido de estas mejoras es

$$\bar{H} = 0.88 \bar{T} - 0.07 \overline{HR} + 12.34 \overline{HeR} + 0.28 \quad (10)$$

$$R^2 = 92.71$$

Llamaremos a este el *Nuevo Modelo Completo*. Aplicando este modelo a los datos actuales (mayo de 2007 a febrero de 2008) se obtuvo un RMSE de 1.49 MJ/m², menor a los 1.91 MJ/m² del *Modelo Completo*.

La heliofanía puede llegar a ser considerada una variable difícil de conseguir, sobre todo para personas no especializadas, ya que requiere de un instrumento muy específico (un heliógrafo) y no se puede automatizar el registro de sus valores. Por esta razón se exploró la posibilidad de construir un modelo lineal que solo dependa de la temperatura \bar{T} y la humedad relativa \overline{HR} , que son variables más fáciles de conseguir, mediante instrumentos relativamente baratos y con precisión suficiente, y entonces la estimación de la irradiación \bar{H} podría ser calculada por personas que necesiten esta información (productores agrícolas, escuelas, etc.).

Realizado el cálculo de la R.L.M. aplicado a todos los datos disponibles (incluyendo los actuales) usados para calcular el modelo de la ecuación 10, el nuevo modelo que llamaremos *Modelo Completo sin HeR* se presenta como

$$\bar{H} = 0.79 \bar{T} - 0.15 \overline{HR} + 13.32 \quad (11)$$

$$R^2 = 89.48$$

Aplicando este modelo a los datos actuales de temperatura y humedad relativa (mayo de 2007 a febrero de 2008) se obtiene un RMSE de 1.75 MJ/m², que si bien es mayor al del modelo de la ecuación (10), es menor que el del modelo completo original. En la Tabla 8 se aprecian los valores estimados de \bar{H} utilizando los tres modelos.

	\bar{H} medido (MJ/m ²)	\bar{H} est. M. C. (MJ/m ²)	\bar{H} estimado N.M.C. (MJ/m ²)	\bar{H} estimado M.C.s.HeR(MJ/m ²)
May 07	11.30	9.37	10.08	10.27
Jun 07	12.45	11.27	12.02	11.33
Jul 07	14.68	12.98	13.77	12.09
Ago 07	15.27	11.56	12.05	12.54
Sep 07	18.27	18.03	18.39	18.62
Oct 07	19.11	20.27	20.70	20.37
Nov 07	21.28	19.36	19.86	19.35
Dic 07	21.21	19.55	20.06	19.60
Ene 08	17.10	16.00	16.43	17.53
Feb 08	20.14	17.79	18.43	17.66

Tabla 8. Valores de \bar{H} medidos y estimados con el Modelo Completo (M.C.), el Nuevo Modelo Completo (N.M.C.) y el Modelo Completo sin HeR (M.C.s.HeR).

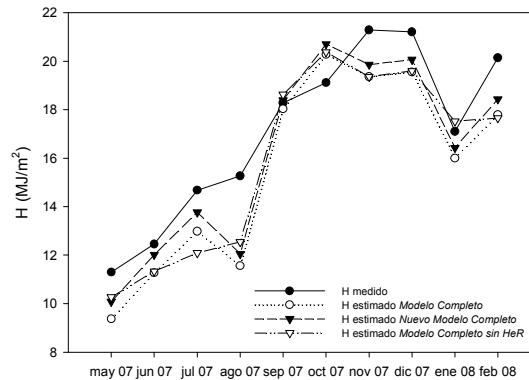


Figura 3. Comparación de los valores medidos y estimados de \bar{H} usando modelos de regresión lineal múltiple.

En la Fig. 3 se observa una fuerte discrepancia para el mes de agosto entre el valor medido de \bar{H} y los estimados por los distintos modelos. Se analiza el porqué de esta situación.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Dando una rápida lectura a la Tabla 7 se nota que:

- 1) Los meses que presentan una mayor heliofanía relativa en el periodo 2007-2008 respecto del periodo 2006-2007, presentan también una mayor irradiación \bar{H} para esos mismos meses. Estos meses son mayo, junio, julio, octubre, noviembre y febrero. Es decir, existe una relación directamente proporcional entre la irradiación \bar{H} y la heliofanía relativa \overline{HeR} , lo que ya se sabía por la ecuación A-P.
- 2) Las temperaturas medias \bar{T} de los meses del periodo mostrado en la Tabla 5 fueron siempre inferiores, salvo en septiembre, a las del periodo anterior. En junio, julio y agosto de 2007 hubieron grandes diferencias de temperatura media (3.25 °C en promedio) respecto de los mismos meses de 2006.(Tabla 7)
- 3) Se aprecia también una disminución de la humedad relativa \overline{HR} para el periodo estudiado, respecto de sus valores del año pasado, salvo en tres meses (mayo, septiembre y enero). En junio y julio de 2007 hubo un descenso marcado de la \overline{HR} respecto de los mismos meses de 2006, mientras que en septiembre la \overline{HR} subió considerablemente comparado con igual mes de 2006.
- 4) En junio y julio de 2007 la heliofanía relativa \overline{HeR} aumentó considerablemente respecto de iguales meses de 2006, mientras que en septiembre disminuyó considerablemente.
- 5) Agosto de 2007 es el mes que mayor desviación presenta entre su valor medido y sus valores estimados, los cuales son muy inferiores a los medidos. La disminución en \bar{T} , \overline{HeR} y \overline{HR} , pero *sobre todo de la temperatura*, se refleja en un valor estimado de \bar{H} que no es consistente con el medido.
- 6) Junio y Julio: los modelos, movidos por la fuerte disminución de \overline{HR} , \bar{T} y el aumento en \overline{HeR} , estiman irradiaciones \bar{H} que difieren con el valor medido.
- 7) Mayo: la disminución en la \bar{T} provoca que los modelos estimen un valor de \bar{H} que subestima el valor medido, llegando a tener una diferencia de 17 % (modelo original).

Se advierte algo que era de suponerse: los modelos calculados son el reflejo de la relación entre los valores numéricos de \bar{T} , \overline{HR} y \overline{HeR} con el valor de \bar{H} . Los coeficientes β_i resultan ser indicadores de cuál será el valor de \bar{H} en función de las variaciones de las variables. Si los valores de las variables meteorológicas se alejan marcadamente del comportamiento de los datos con los que se construyó el modelo, éste no puede responder correctamente a esos valores anómalos y brindará estimaciones pobres en cuanto a correlación se refiere. Para evitar esto se debe actualizar continuamente los datos del modelo a fin de mejorar su respuesta.

CONCLUSIONES.

En este trabajo se han aplicaron dos métodos para estimar irradiación global \bar{H} comparando datos mensuales registrados, para la ciudad de Salta, durante el periodo comprendido entre mayo de 2007 y febrero de 2008 (10 meses).

El método de Ångström-Prescott presenta resultados donde se destacan una buena correlación y errores pequeños. Se observa un incremento en el valor del coeficiente b (pendiente de la recta) con los valores actuales de heliofanía relativa, acompañado de un descenso del valor en el coeficiente a (ordenada al origen). Se observa también que los coeficientes a y b estimados para datos medios mensuales resultan ser menos precisos en cuanto a la estimación de \bar{H} , que los coeficientes calculados con datos diarios. Sin embargo, los coeficientes calculados para meses particulares solo pueden estimar valores de irradiación \bar{H} para ese mes en particular. Los valores de \bar{H} calculados con los coeficientes de cada mes fueron realizados con valores promedios de HeR diarios, considerando a esos promedios $\overline{\text{HeR}}$ como una cifra indicativa del comportamiento de la heliofanía de ese mes.

El método de modelo lineal local presenta resultados que se ven afectados por la variación de los valores de los parámetros meteorológicos, como la temperatura, la humedad relativa y la heliofanía relativa, presentando errores mayores a los obtenidos con la ecuación de Ångström-Prescott. Esto es el resultado de tener dos variables más en juego que en el caso de la ecuación de A-P. Se planteó un nuevo modelo mejorado que da mejores resultados que el anterior (RMSE 22% menor que con modelo original). También se planteó un modelo que solo contempla a la temperatura y la humedad relativa como variables, obteniéndose resultados aceptables (RMSE 8% menor que con modelo original).

NOMENCLATURA

H: Irradiación diaria (MJ/m^2)

\bar{H} : Irradiación media mensual (MJ/m^2).

H_0 : Irradiación extraterrestre diaria (MJ/m^2)

\bar{H}_0 : Irradiación extraterrestre media mensual (MJ/m^2)

\bar{T} : Temperatura media mensual ($^{\circ}\text{C}$)

HR: Humedad Relativa media mensual (%)

HeR: Heliofanía Relativa media Mensual

RMSE: Error cuadrático medio.

EP: Error Porcentual

REFERENCIAS

- Salazar G. A., L. A. Hernández, L. R. Saravia y G. G. Romero (2007). Determinación de los coeficientes de Ångström-Prescott, para la ciudad de Salta (Argentina) a partir de datos tomados durante un año. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 11, pp 11.17-11.24
- Grossi Gallegos H. y R. Righini (2007) Atlas de energía solar de la República Argentina. Ed. SECYT-UNLu. pp. 45-67
- Walpole R., R. Myers, S. Myers, K. Ye. (2007) Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias. Ed. México. Pearson- Prentice Hall.
- Grossi Gallegos H. (2004). Notas sobre radiación solar. Editado por la U.N.Lu y el CYTED.
- R. Righini, H. Grossi Gallegos y C. Raichijk (2004). Trazado de nuevas cartas de irradiación global para Argentina a partir de horas de brillo solar (heliofanía). *Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 14 pp 23-31.
- Salazar G. A., A. L. Hernández, L. Saravia (2008). Evaluación de modelos de regresión lineal que relacionan parámetros meteorológicos con radiación solar, para la región de Salta Capital. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 21 (en prensa).
- Salazar G. A., L. A. Hernández, L. R. Saravia, G. G. Romero, R. Echazú. Global solar irradiation and meteorological parameters in the northwest of Argentina. *Renewable Energy*. paper RENE-D-08-0429 (En revision)

ABSTRACT: In this paper, monthly average values of solar irradiation H are compared with estimated values obtained by means of two types of linear models. Important variations in the values of the meteorological parameters, respect to values of the 2006-2007 period, were detected. Those variations were the cause that, in some months, the percentage error of the H estimations, using the local model presented, was greater than 10%, with respect to the measured values (May and August of 2007, February of 2008). In addition, two new local linear models appear, correlating better the measured values of irradiation with the considered ones. One of those models only uses the temperature and the relative humidity like meteorological variables of estimation.

Keywords: Solar irradiance, meteorological parameters, Angstrom-Prescott equation, multiple linear regression.