REVISTA BOLIVIANA DE FÍSICA **23**, 1–7, 2013
ISSN 1562–3823. INDEXADA EN: SCIELO, LATINDEX, PERIÓDICA

MODELOS DE ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR PARA EL ALTIPLANO CENTRAL DE BOLIVIA

MODELS ESTIMATING THE SOLAR RADIATION FOR BOLIVIA'S CENTRAL ALTIPLANO REGION

R. TORREZ, A. BURGOA, & E. RICALDI
Instituto de Investigaciones Físicas, Carrera de Física
Universidad Mayor de San Andrés
c. 27 Cota-Cota, Campus Universitario, Casilla de Correos 8635
La Paz – Bolivia
(*Recibido 13 de Abril de 2013; aceptado 15 de Mayo de 2013*)

En este trabajo se validan los modelos de estimación de radiación solar de Bristow Campbell (BC) y de Hargreaves-Samani (HS) con datos recientes obtenidos de una estación meteorológica automática instalada en la sub-sede de la Universidad Mayor de San Andrés en la localidad de Patacamaya ($17^o15'S$, $68^o48'W$ y $3890msnm$) durante el periodo agosto 2010 hasta julio 2012. Dicha validación tiene como objetivo aplicar estos métodos a la evaluación de nuestro recurso solar en la extensa geografía del altiplano central boliviano. Se eligió los modelos BC y HS por la simplicidad requerida en los datos de entrada, i.e., temperatura máxima y mínima diarias, que son dos de los datos que generalmente registran todas las estaciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología y otras instituciones públicas y privadas. Las constantes físicas que se emplean en estos métodos han sido evaluadas a partir de las expresiones generales de astronomía solar. Para fines de aplicación práctica se presenta un grafico para estimaciones inmediatas de la radiación solar extraterrestre para cada mes del año y para latitudes que delimitan aproximadamente la región altiplánica aplicable. Los resultados alcanzados en cuanto a la precisión del modelo están comprendidos entre los que se aceptan generalmente tomando en cuenta la reducida cantidad de datos. La transmitancia atmosférica evaluada de 0.166 para nuestra región altiplánica concuerda plenamente con los valores referidos en la extensa literatura técnica de aplicación de estos modelos.

Descriptores: Radiación Solar — Modelamiento atmosférico — Altiplano boliviano

Código(s) PACS: 92.60.Vb, 92.60.Aa, 93.30.Jg

ABSTRACT

We validate the Bristow Campbell (BC) y de Hargreaves-Samani (HS) estimation models for solar radiation with recent data obtained from the meteorological station located in the Universidad Mayor de San Andrés facilities at Patacamaya ($17^o15'S$, $68^o48'W$ y $3890a.s.l.$) for the August 2010 to July 2012 period. The purpose of this validation was to apply these methods to evaluate the solar resources in the central Bolivian Plateau. We chose the BC and HS methods because of the easiness in the input required data, i.e., maximum and minimum daily temperatures, which are the commonly registered data in all the stations of the Meteorology and Hydrology National Service, as well as in other public and private institutions. The physical constants used in these methods were evaluated from the general expressions of the solar astronomy. For a practical purpose we present a plot of the immediate extraterrestrial solar radiation for each month and for the relevant latitudes in the Plateau region. The results (considering the precision of the model) are among those that are commonly accepted given the scarce data. The result of this work for the atmosphere transmitance is 0.166, which is consistent with the referred values in the technical literature for the Bolivian Plateau region.

Subject headings: Solar radiation — Atmosphere models — Bolivian Plateau

1. INTRODUCCIÓN

Ante los elevados costos que significaba la evaluación de la radiación solar incidente en determinado lugar por el costo de los equipos de registro, y dada la urgencia de lograr la factibilidad del uso de otras fuentes de energía alternativa a los combustibles fósiles, en la década de los años setenta tras los episodios de crisis petrolera, diversos in-

vestigadores en ciencia y tecnología han ensayado la aplicación de métodos alternativos de evaluación de la radiación solar con instrumentos y métodos más económicos y sencillos, para lograr ello se ha profundizado el conocimiento sobre la dinámica de la radiación solar, de manera que con la obtención de tablas y ábacos de cálculo de la radiación solar teórica, más el conocimiento de las características de los otros parámetros meteorológicos y atmosféricos, se han logrado desarrollar modelos de estimación de la radiación solar.

Uno de los primeros modelos fue el desarrollado por Angstrong y Prescot (Angstrom 1924; Prescott 1940), basado en datos de horas de sol diarias, denominado también heliofanía. Aunque los equipos de registro de horas de sol son menos costosos que los piranómetros, son igualmente onerosos para la generalidad de localidades de nuestro altiplano por su alto grado de depresión económica. Sin embargo este método también denominado AP, ha sido aplicado exitosamente en el Perú, habiendo contribuido a la elaboración de su mapa solar integral.

Para las condiciones de nuestro altiplano y la disponibilidad de datos de libre acceso en la WEB o en boletines periódicos de la principal institución meteorológica de nuestro país como es el SENAMHI, los modelos más apropiado resultan los planteados por Bristow y Campbell, conocidos también como correlación BC, y de Hargreaves y Samani, también conocido como correlación HS, estos modelo hacen uso de las temperaturas máxima y mínima diarias, o promedios mensuales de estas variables, mas valores teóricos de la radiación extraterrestre incidente que son fácilmente calculables. La oficina del SENAMHI publica en su sitio de Internet los valores de las temperaturas máximas y mínimas diarias para varias localidades altiplánicas a pocos meses de su registro.

El modelo de Bristow Campbell (Bristow & Campbell 1984), emplea las variables de entrada en una expresión exponencial típica de fenómenos físicos que limita sus valores, máximo y mínimo a los valores posibles en los límites de su variación. Esto es, que la máxima energía que se puede alcanzar, es la incidente extraterrestre, y cero en un día absolutamente cubierto

$$H = aH_o(1 - e^{-b(\Delta T)^c}). \tag{1}$$

Donde:

- a, es la denominada transmisividad de la atmosfera.
- b y c, son constantes específicas de la región.
- H_o, es la energía extraterrestre diaria dependiente de la latitud y día del año.
- $\Delta T = T_{max} - T_{min}$, es la diferencia de temperaturas entre la máxima y mínima diarias.

El otro modelo que consideramos en este artículo es el de Hargreaves Samani (Hargreaves & Samani 1982), en esta expresión la energía solar diaria es proporcional a la raíz cuadrada de la amplitud térmica diaria modulada por la variación diaria de la energía solar extraterrestre sobre el sitio en evaluación, es decir:

$$H = aH_o\sqrt{(T_{max} - T_{min})}. \tag{2}$$

Donde:

- H_o, es la radiación extraterrestre ya definida.
- T_{max}, es la temperatura máxima del día, o la promedio mensual.
- T_{min}, es la temperatura mínima del día, o la promedio mensual
- a, es una constante de ajuste.

La radiación extraterrestre H_o puede ser obtenida con varias expresiones aproximadas, aquí empleamos las siguientes:

$$\begin{aligned}
\Gamma &= 2\pi\left(\frac{N-1}{365}\right)\\
H_o &= \left(\frac{24}{\pi}\right) I_{SC}E_o\left[cos\lambda cos\delta sin\omega + \left(\frac{\pi}{180}\right)\omega sin\lambda sin\delta\right]\\
E_o &= 1.00011 + 0.034221cos\Gamma + 0.00128sin\Gamma +\\
&+ 0.000719cos2\Gamma + 0.000077sin2\Gamma\\
\delta &= \left(\frac{180}{\pi}\right)(0.006918 - 0.399912cos\Gamma +\\
&+ 0.070257sin\Gamma - 0.006758cos2\Gamma + 0.000907sin2\Gamma -\\
&- 0.002697cos3\Gamma + 0.00148sin3\Gamma)\\
\omega &= cos^{-1}(-tan\lambda tan\delta).
\end{aligned} \tag{3}$$

Donde:

- $I_{sc} = 1367W/m^2$, es la constante solar.
- E_o, la corrección por excentricidad de la órbita.
- δ, es la declinación solar que depende del día del año
- Γ, es el día de año expresado en radianes sobre un año normal.
- N, es el día del año.

2. LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA

El equipo seleccionado corresponde al tipo de una estación meteorológica profesional de procedencia alemana, con el sistema de adquisición de datos COMBILOG 2010, y dotada de sensores Fischer Barometric de humedad, temperatura, presión, velocidad y dirección de viento, a ello se ha añadido sensores de radiación solar global Kipp & Zonen, y un pluviómetro Davis. Completan la instrumentación un sensor de evaporación NovaLynk 255-100, y un sensor de temperatura del suelo CS109 de Campbell Scientific, entre los más importantes.

FIG. 1.— (Color online) La estación meteorológica de Patacamaya, en primer plano los sensores de evaporación y precipitación. Al fondo la torre con los sensores principales, la caja de control y la caseta de monitoreo.

La estación meteorológica está instalada a 10 metros de altura, a este nivel están instalados un primer conjunto de sensores constituido por un termohigrómetro digital para tener las mediciones de temperatura en grados centígrados y la humedad relativa porcentual. Sobre ambos brazos de una barra de soporte orientado en dirección E-O están instalados los medidores de velocidad y dirección de viento, y en frente en dirección norte está instalado el medidor de radiación solar. Por encima de este arreglo de sensores en cruz, se halla dispuesto un sistema pararrayos. Inmediatamente más abajo se encuentra el panel solar para la alimentación de todo los sistemas de la estación, algunos metros más abajo se encuentra el segundo conjunto de sensores que están constituidos por medidores de temperatura y humedad, velocidad de viento y dirección, presión atmosférica, precipitación, evaporación y temperatura del suelo. Y finalmente a poco más de un metro del suelo está instalado el panel de control central de la estación. Finalmente, a nivel del suelo y adecuadamente protegidos se hallan otro conjunto de sensores, como los sensores de precipitación pluvial, temperatura del suelo y evaporación, además de otro termohigrómetro, anemómetro y veleta. Las figura 1 muestra en primer plano el conjunto se sensores en tierra, y al fondo la torre con su caja de control y sensores. Se observa también la pequeña caseta de monitoreo y procesamiento.

Adicionalmente, la estación de Patacamaya cuenta con otras estaciones meteorológicas para fines de comparación, prueba de sensores y desarrollo de software, además de instrumentos y equipos para fines de laboratorio y ensayos.

3. LOS REGISTROS DE DATOS

Los datos analizados comprenden todos los adquiridos desde la fecha de instalación hasta julio del presente año, que por razones administrativas no es una serie continua en varios parámetros meteorológicos, fueron adquiridos a una tasa de registro de 1 por cada cinco minutos, y han sido procesados y presentados en varios informes de avance y estado de proyecto en su fase de instalación (Torrez 2007). A la fecha la estación se halla completamente operativa y con un 95% de operación en sus sensores. De la base de datos obtenida se han seleccionado los registros de temperatura y radiación solar, con el objeto específico de emplearlos en la validación de los modelos planteados. Esta base de datos consta de 168768 registros, equivalentes a 586 días. De este conjunto se han eliminado una determinada cantidad de datos erróneos que se han introducido probablemente en los procesos de descarga de datos y reinicialización de su sistema, quedando 580 registros diarios, sin embargo discontinuos. Finalmente, para lograr una serie temporal continua de datos, se han realizado promedios de los datos existentes en los tres años de registro para los mismos días. Finalmente con el objeto de suavizar las variaciones introducidas por eventos extremos principalmente en la temporada húmeda, se ha procedido a obtener un registro final suavizado por medias móviles de 5 días.

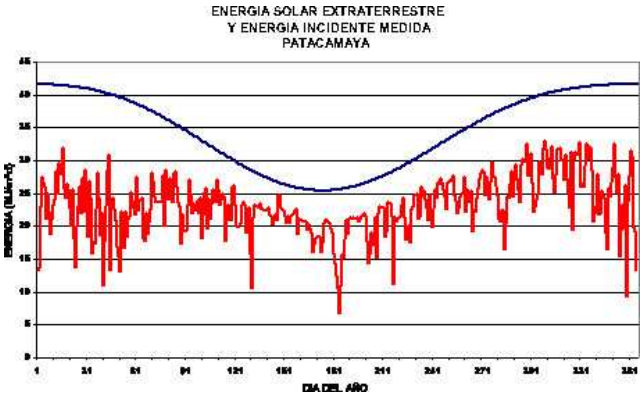

FIG. 2.— (Color online) El registro muestra la radiación extraterrestre incidente en el año 2011, comparada con la radiación registrada en el mismo año. Se puede observar una gran aproximación de las curvas durante el invierno, así como también los menores valores promedio en este periodo.

La figura 2 muestra el registro de la radiación como energía diaria acumulada para cada día del año 2011 en comparación con la energía de la radiación extraterrestre incidente en el mismo periodo.

En cuanto a los registros de temperatura en el mismo periodo, la figura 3 muestra el comportamiento anual en promedios diarios. Se puede observar en este grafico que las temperaturas mínima extremas se alcanzan alrededor del medio año, en la gestión analizada estos valores se sitúan alrededor de -10^oC, y los máximos extremos en el verano con valores entre 20^oC y 25^oC.

El gráfico permite apreciar también que la amplitud térmica diaria se incrementa durante el invierno, y se acorta durante el verano, como efectivamente establecen las condiciones teóricas por el efecto de la nubosidad.

Los registros meteorológicos de Patacamaya presentan los días más tranquilos durante el invierno que durante el verano. En estos se puede apreciar

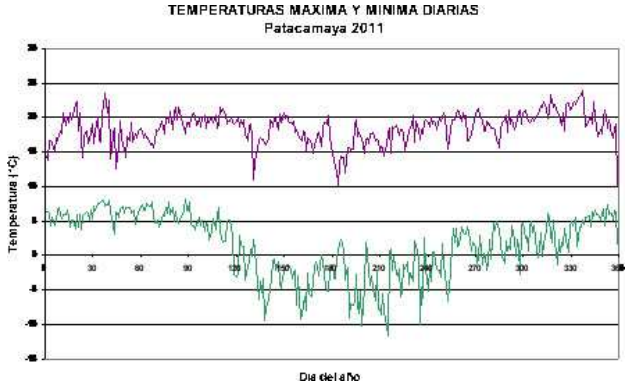

FIG. 3.— (Color online) Variación de las temperaturas máxima y mínima diarias durante el periodo de observación. Se puede observar una mayor amplitud térmica durante el invierno que durante el verano.

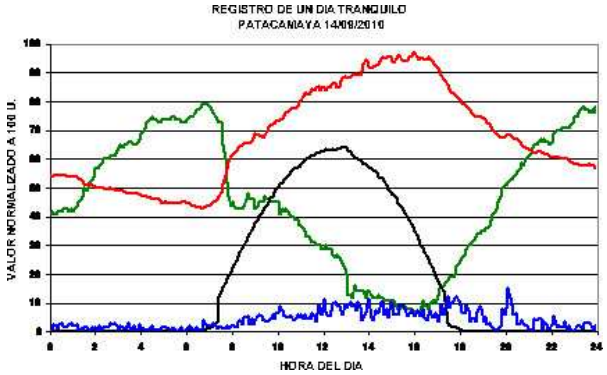

FIG. 4.— (Color online) Perfil de las variables meteorológicas en Patacamaya en un día muy tranquilo, se puede observar como la temperatura tiene un comportamiento inverso a la humedad relativa.

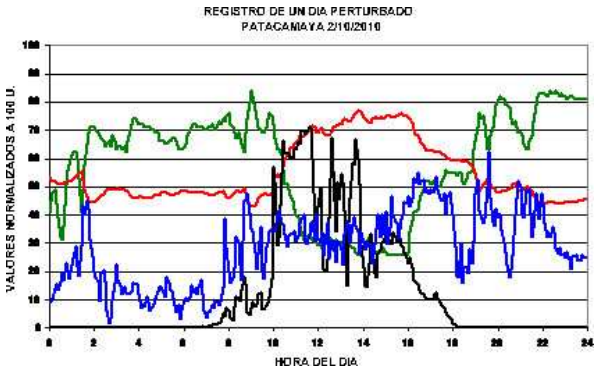

FIG. 5.— (Color online) Las variables meteorológicas en un día perturbado se muestran muy afectadas aunque conservan su perfil principal en alguna medida.

como la curva de la radiación solar (trazo negro) captada sigue a la típica forma de la radiación solar ideal, dado que la topografía de la localidad de Patacamaya por la característica plana y libre de obstáculos así lo permite. En la misma forma la evolución de la temperatura (trazo rojo) a lo largo del día es perfectamente suave hasta la hora del ocaso en el cual alcanza su valor máximo, de acuerdo con el artículo de Torrez (2007). Concomitantemente la velocidad del viento (trazo azul) también evoluciona suavemente alcanzando valores ligeramente altos hacia el extremo de la tarde, al mismo tiempo que la humedad (trazo verde) alcanza sus valores mínimo extremos del día para luego incrementarse paulatinamente hasta el amanecer.

Por otra parte durante el verano, la alta presencia de nubes perturba el medio provocando enfriamientos súbitos, por consiguiente gradientes de presión, luego precipitación y vientos, aumento de la humedad y mayor enfriamiento, o cualquier otra variación no relacionada producto de las masas de aire en movimiento.

Las figuras 4 y 5 muestran dos días característicos de la temporada seca y húmeda, es decir invierno y verano en el que se reflejan sus comportamientos característicos, -donde los valores de las variables meteorológicas están normalizados a los valores máximos registrados en el periodo-. Así por ejemplo observando la radiación solar en el día tranquilo se deduce que el día es claro, la temperatura evoluciona suavemente hasta alcanzar su valor máximo cerca del ocaso, al mismo tiempo que la humedad disminuye suavemente hasta ese momento, y el viento sopla suavemente, significando que todas las variables están relacionadas. Por el contrario en un día perturbado el perfil de las variables se conserva en alguna medida, sin embargo sus valores se observan significativamente reducidos.

4. VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

4.1. *Correlación de Bristow Campbell*

La expresión de Bristow Campbell (Bristow & Campbell 1984) de tipo exponencial es desde el punto de vista teórico, de tipo asintótico hacia la energía extraterrestre, y con una tasa de incremento muy reducida a temperaturas altas, mientras que a bajas temperaturas la tasa de variación es alta y su límite inferior en la energía captada nulo.

Para la determinación de las constantes del modelo BC, se ha procedido a linealizar la ecuación en términos de las constantes que afectan a ΔT, y por procedimientos combinados de mínimos cuadrados e iteración se llega a obtener las constantes a, b y c, los que respectivamente tienen los siguientes valores: 1.001, 0.077, y 0.964.

El gráfico de dispersión de valores medidos en función de los estimados se muestra en la figura 6, se puede observar en este una ligera mayor concentración de valores en la región de 20 a $25MJ/m^2d$. Se observa también unos cuantos valores dispersos en el extremo de bajas amplitudes térmicas, los que no han sido mayormente investigados.

4.2. *Correlación de Hargreaves Samani*

Como se ha expresado en los párrafos precedentes, la correlación HS es función de la raíz cuadrada de la amplitud térmica diaria, modulada por el valor de la energía solar extraterrestre en el sitio en evaluación, la constante de proporcionalidad de esta relación se conoce como la transmisividad de la atmósfera. El grafico de dispersión de la radiación medida contra la radiación estimada nos permite calcular esta constante de manera directa, y así mismo determinar el

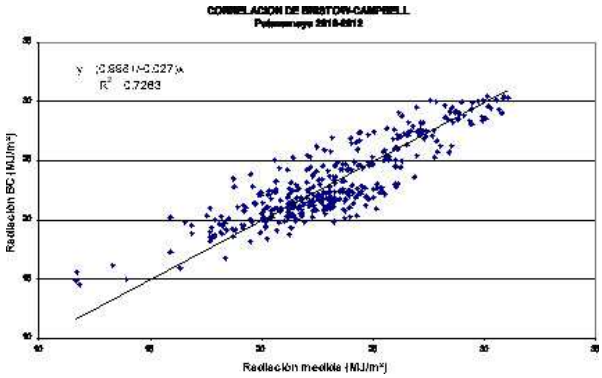

FIG. 6.— (Color online) Gráfica de dispersión de datos estimados contra datos medidos en el modelo de Bristow Campbell.

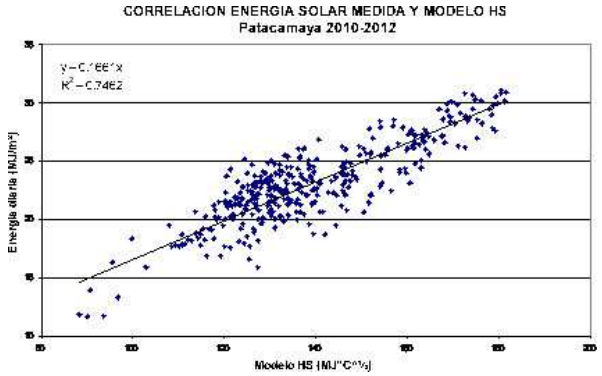

FIG. 7.— (Color online) Correlación entre la energía solar diaria medida y la raíz cuadrada de la amplitud térmica diaria modulada por la radiación extraterrestre.

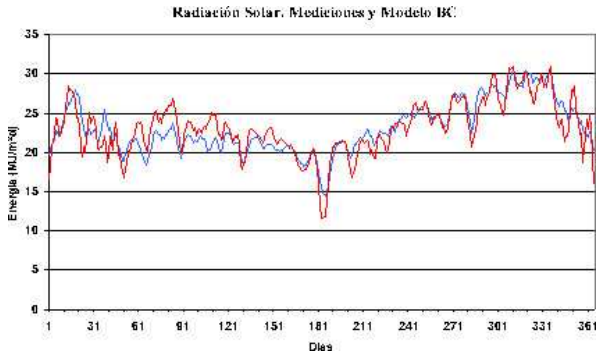

FIG. 8.— (Color online) Comparación de los registros de radiación solar medido (trazo en rojo) y modelado según BC (trazo en azul).

grado de correlación existente entre estas dos variables (Fig.6).

El coeficiente de correlación en este es caso es de 0.86 significando una aceptabilidad moderada teniendo en cuenta que la serie temporal es reducida comparada con otros casos de validación por ejemplo en Baigorria et al. (2004), de la Casa et al. (2003), Almorox (2011), Ugwu & Ugwuanyi (2011), Richardson & Reddy (2004), Gallegos et al. (2005), Coops et al. (2000), Bechini et al. (2000) y otros. Y el valor de la transmitancia obtenida ésta en plena concordancia con los valores ampliamente aceptados de 0.16 para sitios en el interior de continente y 0.19 para sitios sobre la costa.

TABLA 1
VALORES ESTADÍSTICOS

Estadísticos	Valor $[MJ/m^2]$	Valor [%]
Valor medio datos medidos	23.1	
Error cuadrtico medio	3.425	
Valor medio en el modelo BC	23.137	
Valor medio en el modelo HS	23.082	
Coef. correlacin modelo BC		87.5
Coef. correlacin modelo HS		86.4
Error medio MBE, modelo BC	-0.037	-0.16
Error medio MBE, modelo HS	0.019	0.082
Error medio abs. MABE, BC	1.343	5.815
Error medio abs. MABE, HS	1.356	5.87
Error cuadr. medio, RMSE BC	1.697	7.347
Error cuadr. medio, RMSE HS	1.723	7.45

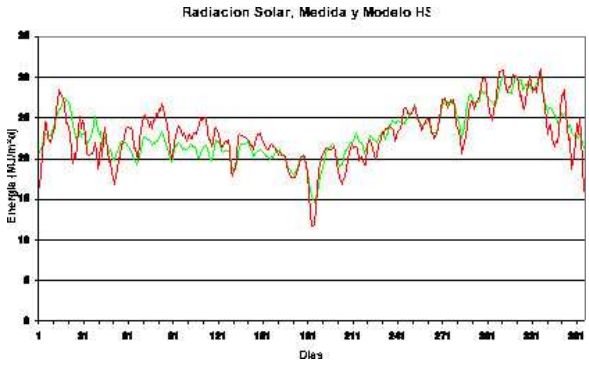

FIG. 9.— (Color online) Comparación de los registros de radiación solar medido (trazo en rojo) y modelado según HS (trazo en verde).

5. CONSIDERACIÓN DE ERRORES

Para completar la validación de los modelos se han evaluado adicionalmente los principales parámetros estadísticos de las series temporales medida y estimada para ambos, con el objeto de compararlos y analizarlos. Entre los estadísticos considerados tenemos a:

La desviación media MBE; que es el valor medio de las diferencias entre los valores medido y estimado, La desviación absoluta media MABE; que representa el valor medio de todas las desviaciones sin considerar su signo. Y la desviación cuadrática media RMSE, que significa el valor medio de la raíz cuadrada de las desviaciones cuadráticas de todos los datos. El cuadro 1 muestra el valor de estos indicadores estadísticos así como sus expresiones porcentuales.

Analizando los errores se observa una ligera mayor asimetría de la serie temporal del modelo BC, que la correspondiente al modelo HS, sin embargo ambas son en valor porcentual menor que 2 unidades en 1000, prácticamente despreciables. Por otro lado la desviación absoluta media de alrededor de $1.35MJ/m^2d$ en ambos modelos son relativamente significativos, sin embargo en valor porcentual resultan aproximadamente 6 en 100 unidades, que consideramos aceptables, lo mismo que el error cuadrático medio de alrededor de 7.4 unidades en 100 lo consideramos aún aceptable tomando en cuenta que la se-

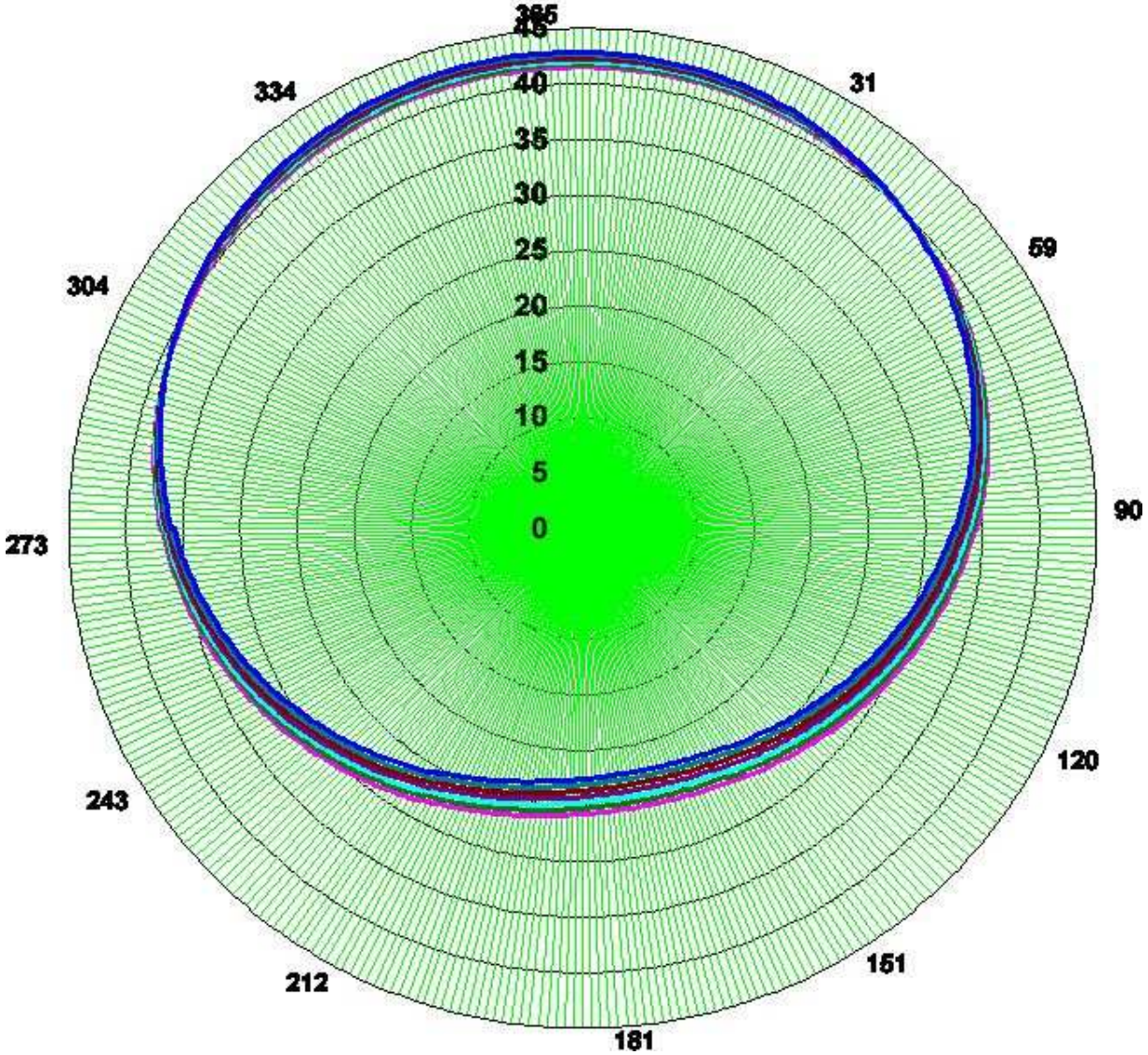

FIG. 10.— (Color online) Radiación solar extraterrestre anual en Bolivia, en MJ/m^2 entre las latitudes 17° S (azul) y 23° S (rosado).

rie temporal es reducida.

De cualquier manera, los parámetros anteriores serán mucho más óptimos cuanto más larga sean las series temporales.

Finalmente terminamos este artículo con una comparación de los registros observados y los modelados según Bristow Campbell y Hargreaves Samani. En las figuras 7 y 8 se muestran estas comparaciones para el periodo de tiempo considerado.

Como se puede observar las diferencias entre ellas son porcentualmente pequeñas, de manera que para todos los fines prácticos, en especial los de aprovechamiento de la energía solar, las diferencias quedan enmascarados en los márgenes de seguridad de los diseños de ingeniería, que en algunos casos alcanzan hasta el 100%, dependiendo de los niveles de confiabilidad establecidos.

Se puede observar en ambos gráficos la similitud que presentan los dos modelos, las diferencias entre ellos son casi imperceptibles, y se puede establecer que de manera general presentan un comportamiento hacia el valor medio de la radiación solar en todo el periodo.

6. CONCLUSIONES

Este artículo fue planteado con la finalidad de posibilitar una alternativa factible de realizar una evaluación de la energía solar en cualquier punto de nuestra geografía altiplánica de manera de ser inmediata, real, y confiable.

Para este propósito se eligió de manera previa que las entradas de este modelo fueran únicamente temperaturas, en particular las máximas y mínimas diarias en vista de la facilidad de obtenerlas en los servicios meteorológicos locales o en otras instituciones técnicas, científicas, o servicios de salud en los lugares de interés.

Dos modelos han sido analizados, y por los resultados encontrados, se puede afirmar que ambos presentan las mismas características, sin embargo, por la simplicidad e inmediatez se puede trabajar perfectamente con el modelo de Hargreaves Samani, sin

sacrificar precisión. Por estas consideraciones se concluye que: a) la aplicación de los modelos considerados es perfectamente posible, b) los errores son mínimos y fácilmente superables, y: c) la transmitancia atmosférica evaluada en el modelo de Hargreaves Samani es ligeramente superior a la recomendada por los autores del método: es decir: 0.1661.

Como complemento, y para fines de aplicación práctica se presenta un gráfico de estimación inmediata de los valores de la radiación extraterrestre para cada día del año y para latitudes comprendidas entre los 17° y 23^oS, de manera que con ellos, más los promedios de las temperaturas máxima y mínima obtenidas en los servicios meteorológicos, puedan estimar la energía solar diaria en el lugar de su interés (Figura 10).

AGRADECIMIENTOS

Con mucha frecuencia se olvida al personal que realiza el mantenimiento de las estaciones meteorológicas, y al personal administrativo que hace posible que los proyectos culminen. En esta oportunidad hacemos patente nuestro reconocimiento a los Sres. V. Mamani, H. Monasterios, y M. Zuazo, por el apoyo brindado en que nuestros proyectos de investigación alcancen sus metas en los tiempos establecidos. Gracias por su colaboración.

REFERENCIAS

Almorox J. (2011), *Turk J. Physics* **35**, 53.
Angstrom A. (1924), *QJR Met. Soc.* **50**, 121.
Baigorria G. A. et al. (2004), *International Journal of Climatology* **24**, 9, 1121.
Bechini L., Ducco G., Donatelli M. & Stein A. (2000), *Agriculture, Ecosystems and Environment* **81**, 29.
Bristow K. L. & Campbell G. S. (1984), *Agric. For. Meteorol.* **31**, 159.
Coops N. C., Waring R. H. & Moncrieff J. (2000), *International Journal of Biometeorology* **44**, 4, 204.
de la Casa A., Ovando G. & Rodríguez A. (2003), *Revista de Investigacin Agropecuaria INTA* **32**, 2, 45.
Gallegos H. G., Righini R. & Raichijk C. (2005), *S. C. de Bariloche*, Argentina.
Hargreaves G. H. & Samani Z. A. (1982), *J. Irrig. and Drain Engr.* **108**, 223.
Prescott J. A. (1940), *Trans. R. Soc Sci. Austr.* **64**, 114.
Richardson A. G. & Reddy K. R. (2004), *Clim. Res.* **27**, 85.
Torrez R. (2007), IIF-UMSA, Bolivia.
Ugwu A. I. & Ugwuanyi J. U. (2011), *International Journal of the Physical Sciences* **6**, 31, 7285.