

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN EL DEPARTAMENTO DE COCHABAMBA  
UTILIZANDO MODELOS DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA E IMÁGENES SATELITALES  
EVALUATION OF THE GLOBAL SOLAR RADIATION POTENTIAL IN THE DEPARTMENT OF COCHABAMBA  
(BOLIVIA) USING MODELS OF GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS AND SATELLITE IMAGES

MARCELO J. LUCANO<sup>†</sup> & IVÁN E. FUENTES M.<sup>†</sup>

Departamento de Física  
Universidad Mayor de San Simón  
Cochabamba – Bolivia

RESUMEN

En este trabajo se estimaron los valores de la radiación solar global por medio de modelos de Sistemas de Información Geográfica e imágenes satelitales obtenidos a través de la metodología SSE de la NASA para un periodo de registros de 22 años. Con estos valores de radiación, se obtuvo la distribución temporal y espacial de la radiación solar para el Departamento de Cochabamba mediante un proceso de interpolación que utiliza el paquete de análisis geoestadístico ILWIS, considerando datos de una rejilla conformada por 16 casillas que abarcan el departamento; se utilizó el método de superficie móvil con distancia inversa, exponente de peso 1, distancia esférica y segundo grado parabólico. Se observó que los niveles de radiación más bajos corresponden a los meses de mayo a julio (invierno) y los niveles de radiación más altos corresponden a los meses de octubre a diciembre (primavera y verano). Asimismo, se observó que la parte noreste de Cochabamba presenta los valores más bajos de media anual de radiación global, entre  $4.2 - 4.5 \text{ kWh/m}^2$  al día, ya que ésta es una zona de baja altitud sobre el nivel del mar y se caracteriza por su clima tropical y alta humedad, generando una mayor dispersión de la radiación solar, en tanto que en la zona suroeste la radiación solar aumenta, ya que en ésta se localiza la Cordillera Oriental Central con un clima seco cuyos valores varían entre  $5.76.3 \text{ kWh/m}^2$  al día. También se distinguen siete regiones de niveles de radiación que van aumentando de noreste a suroeste, tal como se observó en estudios anteriores. Los valores de radiación obtenidos mediante la interpolación fueron validados con datos medidos en superficie con un error porcentual medio anual del 10 %.

*Descriptores:* radiación solar — tecnología con base satelital

Código(s) PACS: 92.60.Vb, 07.87.+v

ABSTRACT

Using Geographic Information Systems and satellite imaging, this study estimates the global solar radiation values using models generated from data recorded over a period of 22 years and applying NASAs SSE methodology. Using these radiation values and the geostatistical analysis software ILWIS the time and space distribution of solar radiation for the Department of Cochabamba was obtained. The analysis involved data from a grid made up of 16 squares that make up Cochabamba and used the method of moving surface with inverse distance, weight exponent 1, spherical distance and parabolic second order. It is observed that the lowest levels of radiation corresponded with the months May to July (winter) and the highest radiation levels with the period October to December (summer). In addition, it was noted that the northeast region of the Cochabamba showed the lowest annual radiation values ( $4.2 - 4.5 \text{ kWh/m}^2$  per day). This is due to the fact that the region is closer to sea level and characterised by a tropical and humid climate which leads to a greater dispersion of solar radiation. In the southwest region of Cochabamba which forms part of the Central Eastern Mountain Range and has a dry climate, the solar radiation is higher ( $5.7 - 6.3 \text{ kWh/m}^2$  per day). The study identifies seven regions of radiation levels with increasing radiation from northeast to southwest which agree with previous studies. The radiation values obtained through interpolation were validated with surface measurements with an average annual error of 10%.

*Subject headings:* solar radiation — satellite related technology

<sup>†</sup>Email: cclimaticos@fcyt.umss.edu.bo.

## 1. INTRODUCCIÓN

A medida que la demanda de energía renovable crece, así lo hace la necesidad de fuentes de datos más precisos de estas energías. Sin embargo, en Bolivia, así como en muchos otros países, relativamente pocas estaciones meteorológicas colectan datos de radiación solar requeridas para conocer el potencial y el desempeño de sistemas de energía solar y en particular de sistemas fotovoltaicos. Asimismo, las tecnologías de energía renovable están siendo usadas alrededor del mundo para suplir el uso de energía eléctrica y para desempeñar trabajo mecánico tal como: bombeo de agua, suministro de combustible para transporte, provisión de requerimientos de calentamiento y enfriamiento para el diseño de edificios, etc.

Las fuentes de energía renovable, particularmente para tecnologías solares, son fuertemente dependientes de las condiciones y fenómenos climatológicos y están también afectadas por procesos microclimáticos. Debido a la ausencia de una red meteorológica de monitoreo densa y extensa, se deben utilizar modelos numéricos, conocimiento empírico de las características microclimáticas y observaciones indirectas derivadas del análisis y observaciones de datos provenientes de sensores remotos localizados en satélites para desarrollar un conocimiento de las características geoespaciales así como de la extensión de estos recursos.

Ya que una red de estaciones para caracterizar el régimen de radiación solar en todo el país resultaría muy costosa, se han utilizado métodos indirectos para estimarla, tales como mediciones de insolación o nubosidad; pero aún la red de estaciones heliográficas y meteorológicas tiene grandes zonas con una cobertura deficiente, particularmente en regiones donde la radiación solar tiene un régimen muy diferenciado, como las regiones montañosas y los llanos. Desde la aparición de los satélites meteorológicos se abrió una nueva perspectiva para estimar parámetros de radiación y se han realizado estudios encaminados a ello. En los últimos 30 años la literatura especializada reporta diversos métodos de cálculo de la radiación solar, con distintos grados de complejidad.

En este trabajo, con base en la implementación de técnicas de interpolación, se estiman los niveles de radiación solar en el Departamento de Cochabamba a partir de datos de irradiación solar obtenidos de imágenes satelitales procesadas con la metodología SSE (*Surface Meteorology and Solar Energy*) de la NASA.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. *Estimación de la radiación solar a partir de imágenes satelitales*

Desde que se hicieron disponibles las imágenes de satélite de alta resolución en formato digital, comenzaron a aparecer estudios sobre la estimación de la radiación solar a partir de éstas. La gran ventaja de los métodos de estimación de radiación basados en imágenes satelitales es precisamente su resolución espacial. Con ellas es posible generar mapas de radiación solar con una resolución muy detallada (de 2 a 10  $km^2$ ) sobre regiones específicas. Esto los convierte en una

f fuente de información muy adecuada, por ejemplo, para ser integrada en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El trabajo de Gautier et al. (1980) da una pauta de la metodología general seguida hasta la actualidad. En el trabajo mencionado se incorpora un modelo de cálculo de cierta complejidad, que requiere información del contenido de agua precipitable y al mismo tiempo incorpora el efecto de la nubosidad aplicando una relación lineal simple entre la brillantez de la nube en la imagen de satélite y su factor de absorción. El método se aplica a imágenes de alta resolución (1 – 2  $km/pixel$ ) y puede calcular la distribución de la radiación sobre grandes áreas.

Mosser & Raschke (1984) utilizan las imágenes del METEOSAT, cuyas características son algo diferentes de las del GOES y aplican una normalización de los valores de píxel llevándolos de su valor original al intervalo definido por los valores máximo y mínimo observados para cada píxel de la imagen en dependencia de la hora y la época del año. A partir de mediciones terrestres se calcula una relación entre los valores de píxel normalizados y el cociente entre la radiación incidente y la radiación máxima (ante cielo despejado), esta relación depende además del ángulo cenital del sol y también presenta un estudio acerca del efecto que tiene el número de imágenes empleadas a lo largo del día sobre la exactitud de las sumas diarias calculadas.

Según Rigollier et al. (2002) en la serie de métodos publicados en los años 90 como HELIOSAT, se aplica un modelo normalizado tanto para los valores de píxel ante cielo despejado como para los de zonas nubladas. Se aplica una relación lineal al índice normalizado de los valores para las zonas nubladas, para obtener el índice de transparencia de la nubosidad. De esta manera se calcula la radiación tanto para las áreas de cielo despejado como para cielo nublado. Este método fue inicialmente publicado como HELIOSAT 1. En la segunda versión, HELIOSAT 2 se toma en cuenta el estado óptico de la atmósfera y se introduce un método de calibración de imágenes que permitiría trabajar con distintos sensores.

Pérez et al. (2002a) presentan un método de cálculo que estima los valores de radiación ante cielo despejado mediante el uso de un modelo simplificado y a continuación determinan un índice de nubosidad tomado a partir de las imágenes visibles, mediante el cual se modifican los valores calculados para obtener los valores definitivos de radiación. El modelo GL 1.0 del Centro de Prevención del Tiempo y Estudios Climáticos y del INPE en Brasil parte de una ecuación simplificada de transferencia radiactiva en las zonas de entre 400 – 700  $nm$  y 700 – 4000  $nm$ . Se toma como hipótesis que en este rango espectral casi no hay absorción en la atmósfera, por lo tanto el término de absorción por aerosoles se puede despreciar, de manera que la radiación se puede obtener conociendo el valor de la radiación extraterrestre. Hoyos et al. (2000) utilizan un método que emplea el mismo modelo de transferencia (GL 1.0) del INPE, las diferencias fundamentales consisten en una implementación acabada que facilita su utilización para puntos seleccionados de la imagen. Es-

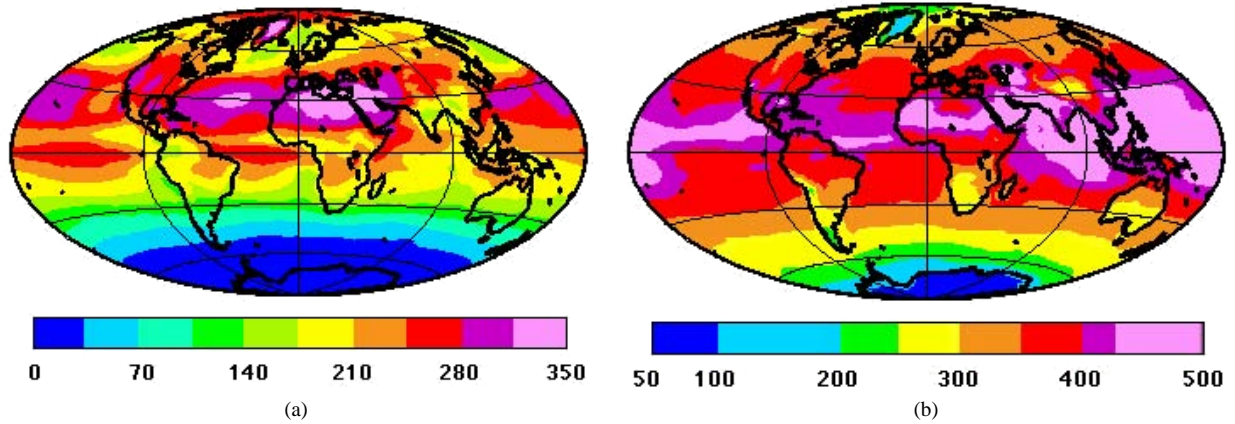


FIG. 1.— (a) Distribución geográfica de la radiación de onda corta (SW) en un periodo de 8 años para el mes de julio ( $W/m^2$ ). (b) Distribución geográfica de la radiación de onda larga (LW) en un periodo de 8 años para el mes de julio ( $W/m^2$ ) (color online; Darnell et al. —).

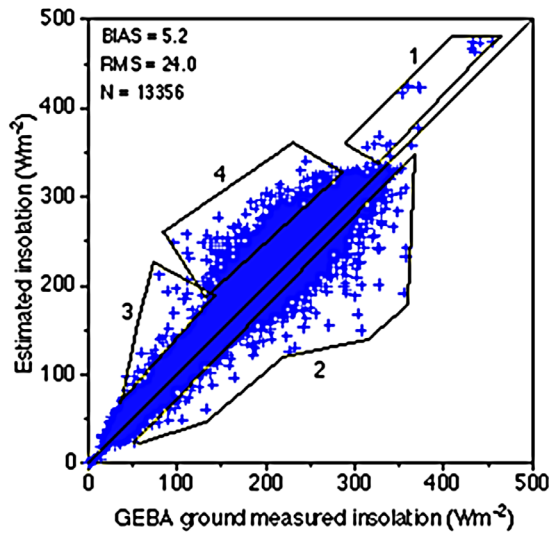


FIG. 2.— Comparación de los valores de radiación del archivo GEBA y los valores obtenidos del análisis de imágenes satelitales (Darnell et al. —).

tos dos métodos no contemplan el efecto de la nubosidad ni permiten el cálculo para áreas grandes.

Como cualquier estimación a partir de modelos, aquellas basadas en datos de satélite tienen una exactitud limitada. Convencionalmente se considera un error cuadrático medio entre 15 y 20 % para estas estimaciones, cuando se las compara con mediciones llevadas a cabo por estaciones localizadas en sitios específicos (ver por ejemplo, Beyer et al. 1996). Hay estudios que ubican este error en un valor menor. Por ejemplo, Zelenka et al. (1999) llevaron a cabo un estudio en el que llegan a la conclusión de que el error real de los métodos para obtener irradiancias a partir de datos de satélite es de alrededor del 12%. El resto del error es atribuido por los autores al hecho de que a través de las imágenes satélites se estiman promedios sobre grandes áreas de varios kilómetros cuadrados. Cuando se compara estos valores con mediciones en estaciones específicas, de manera natural ocurre un error cuadrático medio de alrededor del 15%, ya que los valores medidos por una estación no proveen un promedio de la región sino una medición en un punto con un clima específico.

A pesar de las ventajas que presenta la estimación de la irradiancia solar a partir de información satelital, no se debe menospreciar la importancia de una red terrestre que provea información de un número grande de puntos de monitoreo bien distribuidos sobre un territorio dado. Para que los métodos satelitales den resultados más precisos, es necesario calibrarlos (sintonizarlos) con datos de superficie, lo cual requiere de una buena cobertura de una red terrestre constituida por estaciones situadas estratégicamente.

En Bolivia no se tiene referencia sobre algún trabajo que utilice la metodología de las imágenes satelitales para estimar los niveles de radiación solar, sin embargo, se han realizado varios estudios de la distribución de la radiación solar, basados fundamentalmente en la dependencia de ésta con otras variables que se miden en un número grande de estaciones, como el número de horas con brillo solar, aplicando fórmulas empíricas de tipo Ångström (Birhuett 1993; PROPER-Bolivia et al. 1998).

### 2.2. Estimación de la radiación solar a partir de imágenes satelitales aplicando la metodología SSE de la NASA

El proyecto ESE (Earth Science Enterprise) de la NASA ha proporcionado un sistema de satélites de investigación para proveer datos importantes para el estudio del clima y procesos climáticos. Estos datos incluyen estimaciones en un periodo largo de tiempo de cantidades meteorológicas y energía solar en la superficie de la tierra. La base de datos basados en imágenes satelitales ha mostrado ser lo suficientemente precisa para proporcionar datos de radiación solar confiables en regiones en las cuales las mediciones en superficies son muy dispersas o no existen (Whitlock et al. 2001; Pérez et al. 2002b).

Como resultado del proyecto ESE surge el banco de datos de radiación SSE de la NASA (NASA-LARC —) que reúne un conjunto de datos que engloban parámetros meteorológicos usados para diseñar sistemas de energías renovables. No está diseñado como un sustituto a las mediciones en superficie, sino como un estimado de datos de radiación para lugares en los que no existen redes de monitoreo densas (ej. áreas rurales). Debido a la resolución de las imágenes

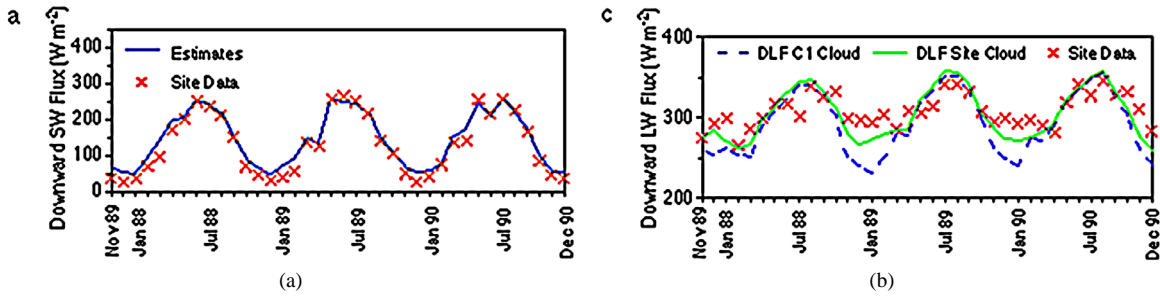


FIG. 3.— Comparación entre los valores de radiación medidos en superficie y valores estimados a partir de imágenes satelitales para la estación de Payerne, Suiza: (a) onda corta SW y (b) onda larga. (color online; Darnell et al. —).

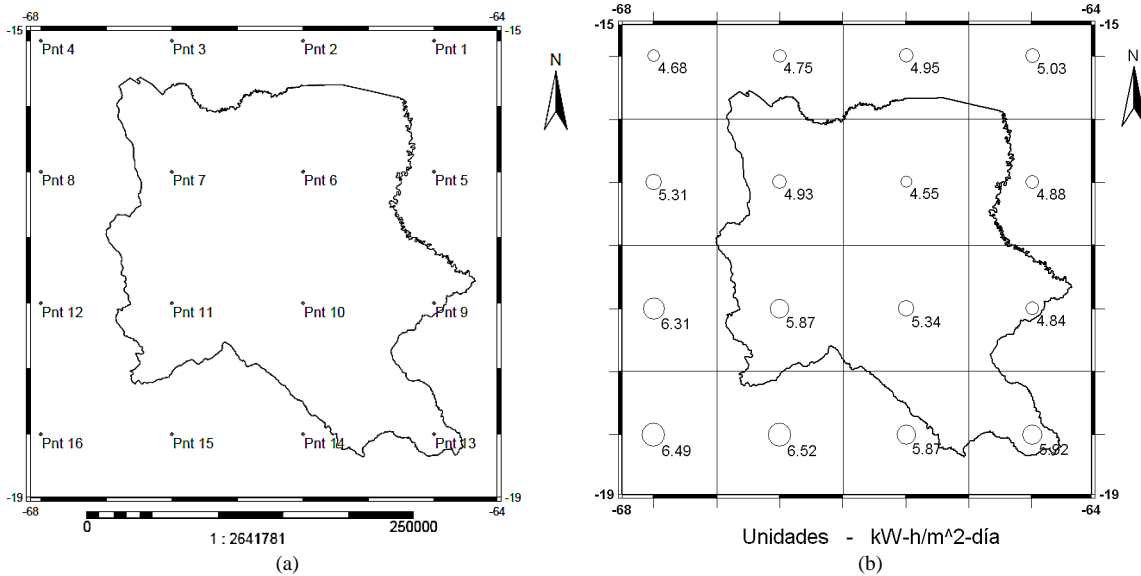


FIG. 4.— (a) Distribución geográfica de los puntos en el centro de las grillas en el Departamento de Cochabamba. (b) Radiación media anual asignada a los puntos de referencia en unidades de  $kWh/m^2$  al día.

satelitales da un promedio de las condiciones de la región cubierta con una resolución de  $1^\circ \times 1^\circ$  en latitud y longitud y el periodo de análisis del banco de datos es de julio de 1983 hasta noviembre de 2008 (22 años) con las imágenes obtenidas de alrededor de 200 satélites. Estos valores estimados son suficientemente precisos para realizar estudios preliminares.

El sitio Web de la NASA habilita al usuario para la descarga de datos de radiación solar mensual y anual para cualquier localización en la Tierra. El banco de datos de la NASA se ha convertido en un paradigma para la fuente de información de radiación solar, debido a la alta calidad del modelamiento utilizado para generar el banco de datos, al hecho de que la metodología SSE es validada con numerosas estaciones en superficie y al hecho de que abarca una escala global y cubre un extenso periodo de tiempo. Sin embargo, el banco de datos es aún limitado por una pérdida de resolución y no validación en áreas donde no existen datos en superficie. Los procedimientos utilizados para generar el banco de datos SSE también encuentran problemas en áreas en las que se tienen interfaces oceánicas y áreas cubiertas con nieve.

Los valores estimados de radiación solar son resultado del análisis de un periodo de 46 meses de la radiación de onda corta (SW) y onda larga (LW) procesados a través del algoritmo de Pinker-Laszlo (Pinker & Laszlo 1992; Pin-

ker et al. 1995; Darnell et al. —) dentro del programa NASA/GEWEX/SRB. Las variables de entrada son las irradiancias, la cantidad de nubes provenientes del programa ISCCP (*International Satellite and Cloud Climatology Programme*), el vapor de agua del programa GEOS-1 (Goddard Earth Observation Systems) con datos en intervalos de 3 horas y datos de ozono obtenidos del sensor TOMS. Los valores de aerosoles y profundidad óptica de las nubes son utilizados como parámetros de afinamiento en los casos de cielo con y sin nubes. El error cuadrático medio (RMS) estimado para valores mensuales es de alrededor del 16% con una incertidumbre del 1% comparado a los datos obtenidos con mediciones en superficie según el Centro Mundial de Datos de Radiación (WRDC).

Las Figuras 1a y 1b muestran la distribución geográfica de la radiación promedio de onda corta y onda larga, respectivamente, en un periodo de 8 años para el mes de julio. La distribución de la radiación SW es primordialmente zonal, modulada por la distribución de las nubes. Los valores máximos se encuentran en el Ártico, Groenlandia y las regiones subtropicales del Hemisferio Norte. Los valores máximos de la radiación LW se localizan sobre amplias regiones en los trópicos con un decrecimiento gradual hacia los polos. Los valores más altos ocurren sobre áreas que exhiben tempera-

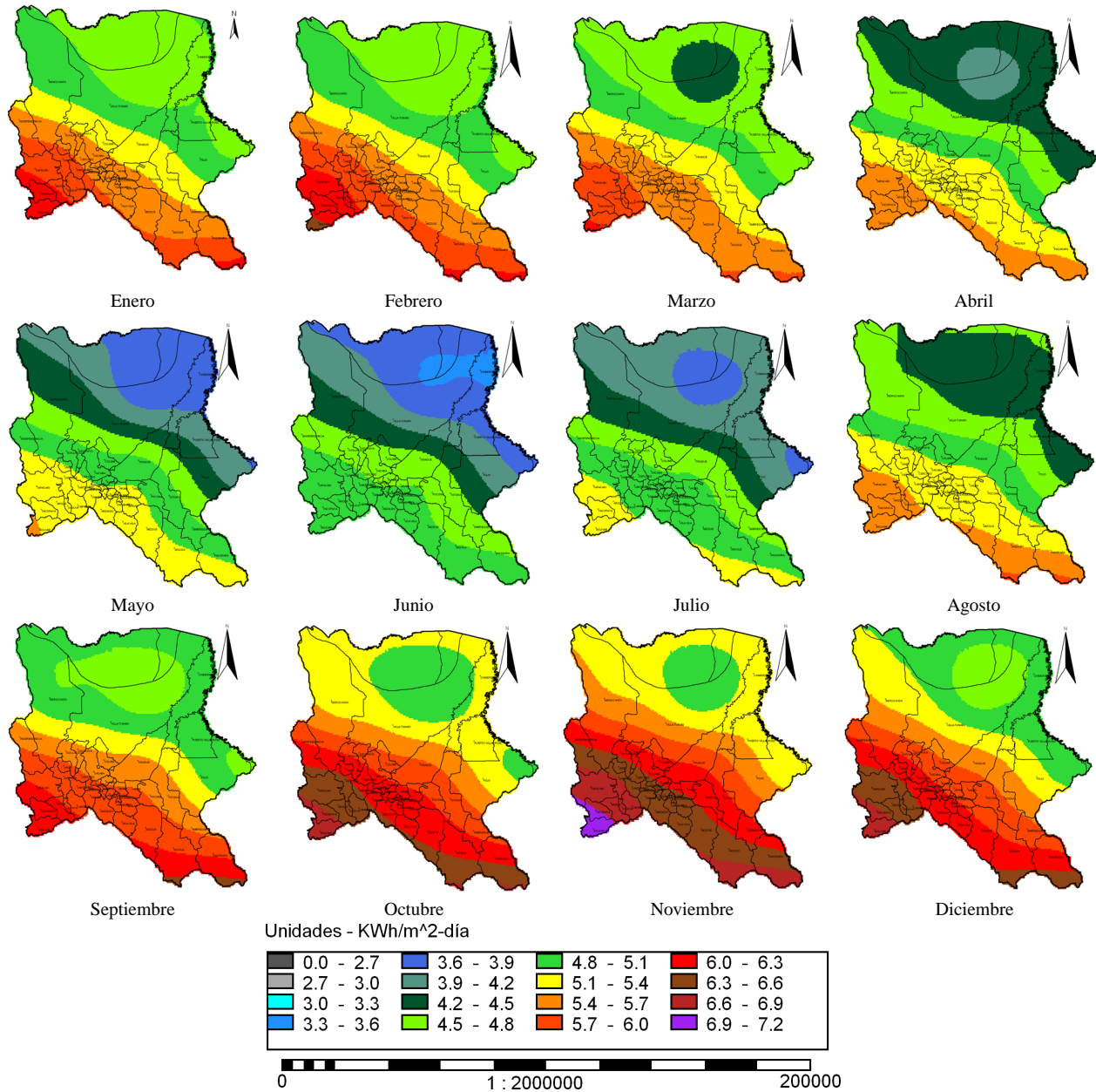


FIG. 5.— Distribución mensual de la radiación solar global en el Departamento de Cochabamba (color online).

turas superficiales elevadas tal como los desiertos subtropicales y áreas con abundancia de nubes y vapor de agua.

La Fig. 2 muestra un diagrama de dispersión de los datos de radiación mensuales del Archivo del Balance de Energía Global (GEBA) del Instituto Federal de Tecnología de Suiza y los correspondientes valores de radiación estimados a partir del análisis de imágenes satelitales. Se observa que gran parte de los puntos muestran una correlación lineal, en cuanto que los puntos fuera del grupo pertenecen a regiones con alta densidad de agua o con hielo superficial.

Las Figs. 3a y 3b muestra una comparación entre los valores de radiación SW y LW respectivamente de medidas en superficie y los valores estimados a partir de imágenes satelitales para la estación ubicada en Payerne, Suiza.

### 3. METODOLOGÍA

Debido a la resolución de las imágenes satelitales, se obtiene un valor promedio de radiación para un área comprendida entre 1° de latitud y 1° de longitud. El Departamento de Cochabamba se encuentra entre los 64° – 68° de longitud oeste y 15° – 19° de latitud sur abarcando un total de 16 grillas, por lo que el valor de radiación promedio corresponde al centro de la grilla considerada. Con este criterio, se asignaron para el centro de las 16 grillas el valor correspondiente de radiación solar de la base de datos SSE, estos datos tabulados se muestran en la Tabla 1.

Con base a la Tabla 1, se obtuvo la distribución geográfica de los puntos centrales de las grillas en la región de estudio (Fig. 4).

TABLA I  
DATOS DE RADIACIÓN SOLAR MENSUAL Y ANUAL OBTENIDOS A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES PARA EL DEPARTAMENTO DE COCHABAMBA EN kWh/m<sup>2</sup>al día.

No	Latitud Sur (°)	Longitud Oeste(°)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media Anual
Pnt 1	15.5	64.5	5.03	4.99	4.84	4.71	4.05	3.96	4.44	4.79	5.25	5.52	5.54	5.15	4.86
Pnt 2	15.5	65.5	4.95	4.84	4.78	4.58	3.91	3.77	4.19	4.78	5.24	5.55	5.47	5.08	4.76
Pnt 3	15.5	66.5	4.75	4.7	4.58	4.37	3.79	3.56	3.84	4.51	4.95	5.25	5.22	4.98	4.54
Pnt 4	15.5	67.5	4.68	4.76	4.57	4.36	4.07	3.92	3.95	4.41	4.69	5.07	5.05	4.93	4.54
Pnt 5	16.5	64.5	4.88	4.9	4.69	4.37	3.71	3.54	3.98	4.51	5.03	5.31	5.37	4.95	4.60
Pnt 6	16.5	65.5	4.55	4.57	4.38	4.09	3.73	3.61	3.81	4.3	4.63	4.84	4.92	4.67	4.34
Pnt 7	16.5	66.5	4.93	4.96	4.83	4.51	4.38	4.18	4.2	4.55	4.83	5.2	5.4	5.27	4.77
Pnt 8	16.5	67.5	5.31	5.47	5.3	5.01	4.95	4.65	4.71	5.01	5.55	5.78	6.04	5.78	5.30
Pnt 9	17.5	64.5	4.84	4.83	4.74	4.43	4.15	3.97	3.98	4.45	4.88	5.16	5.33	5.07	4.65
Pnt 10	17.5	65.5	5.34	5.39	5.38	5.22	5.05	4.75	4.82	5.15	5.64	5.93	6.16	5.77	5.38
Pnt 11	17.5	66.5	5.87	5.99	5.76	5.44	5.25	4.93	5.08	5.41	5.92	6.41	6.67	6.38	5.76
Pnt 12	17.5	67.5	6.31	6.42	6.06	5.8	5.56	5.24	5.41	5.82	6.47	6.93	7.16	6.89	6.17
Pnt 13	18.5	64.5	5.92	5.92	5.65	5.47	5.2	4.94	5.09	5.6	6.21	6.45	6.64	6.33	5.79
Pnt 14	18.5	65.5	5.87	6.04	5.73	5.64	5.41	5.03	5.3	5.73	6.3	6.6	6.8	6.39	5.90
Pnt 15	18.5	66.5	6.52	6.59	6.19	5.75	5.38	4.95	5.16	5.6	6.35	6.96	7.31	7.04	6.15
Pnt 16	18.5	67.5	6.49	6.61	6.09	5.77	5.44	5.09	5.27	5.77	6.57	7.13	7.45	7.11	6.23

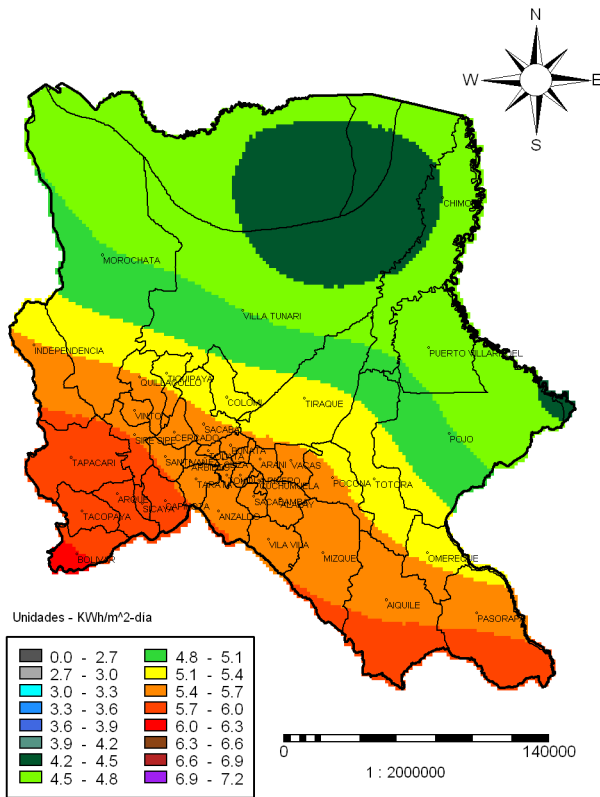


FIG. 6.— Distribución anual de la radiación solar global en el Departamento de Cochabamba (color online).

4. RESULTADOS

Con respecto al método de interpolación empleado para obtener los valores estimados de los niveles de radiación en el Departamento de Cochabamba se usó una metodología implementada en un estudio preliminar sobre los métodos de interpolación más eficaces para determinar los niveles de radiación solar (Mubiru et al. 2007; Lucano & Fuentes 2008) y se concluyó que el método: superficie móvil distancia inversa con exponente de peso 1, distancia esférica y segundo grado parabólico es el método más adecuado para interpolar

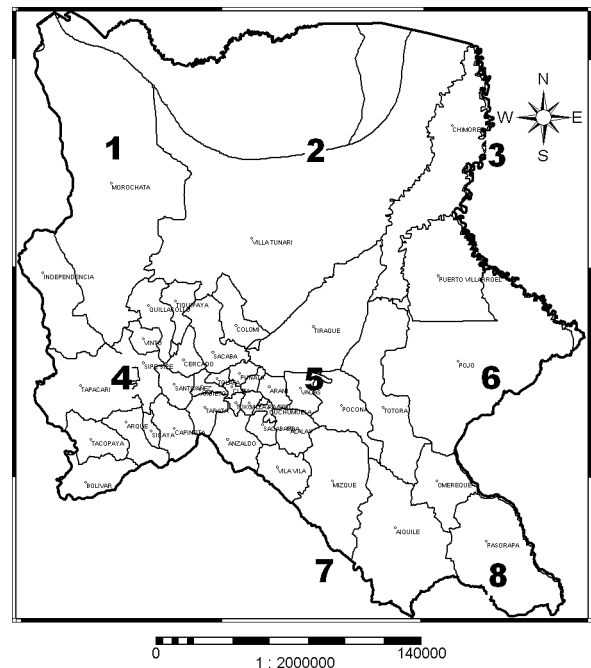


FIG. 7.— Área de estudio dividida en ocho subáreas.

datos satelitales. Una vez establecido el método más apropiado éste se utilizó para interpolar los valores de radiación solar global promedio mensuales para cada uno de los meses del año y el promedio anual.

La Fig. 5 muestra la distribución de radiación solar global en Cochabamba para los doce meses del año.

Se observa de la Fig. 5 que los niveles de radiación más bajos corresponden a los meses de mayo, junio y julio, que pertenecen a la estación de invierno, y los niveles de radiación más altos corresponden a los meses de octubre, noviembre y diciembre, que corresponden a las estaciones de primavera y verano.

La Fig. 6 muestra la distribución de radiación solar global anual para el Departamento de Cochabamba.

Se observa de la Fig. 6 que la parte noreste del Departamento

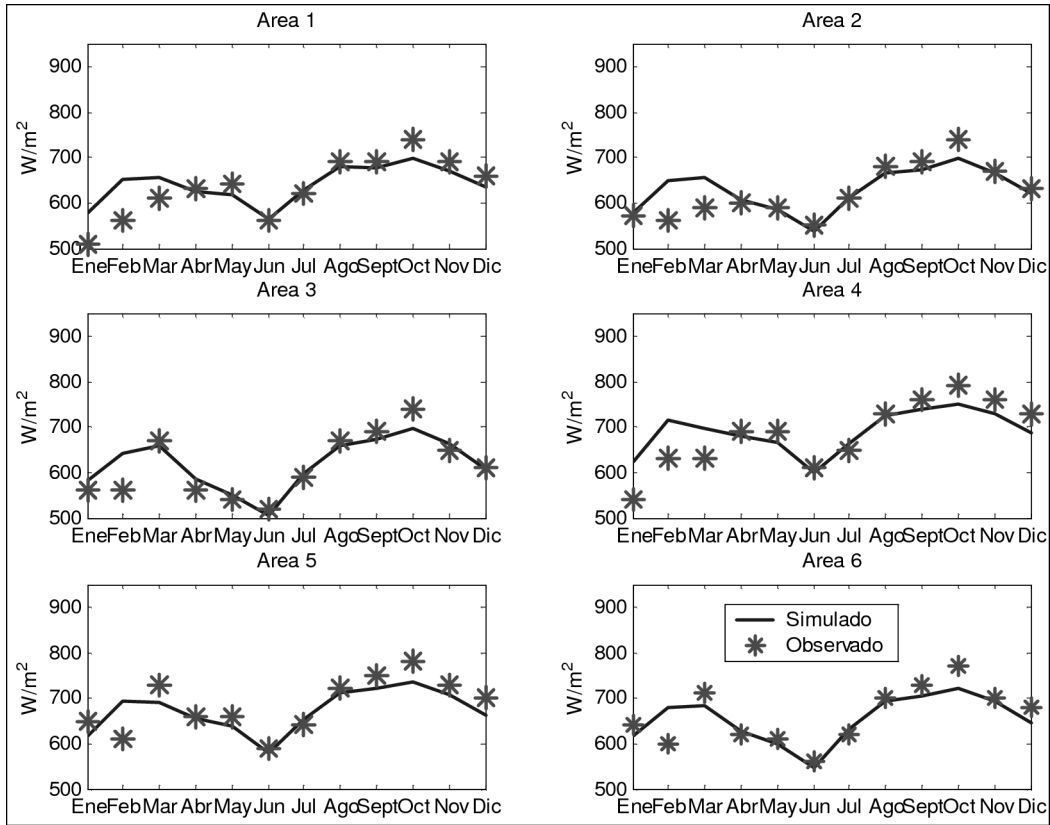


FIG. 8.— Comparación de los valores simulados (metodología SSE) y medidos experimentalmente de intensidad de radiación solar global para el Departamento de Cochabamba.

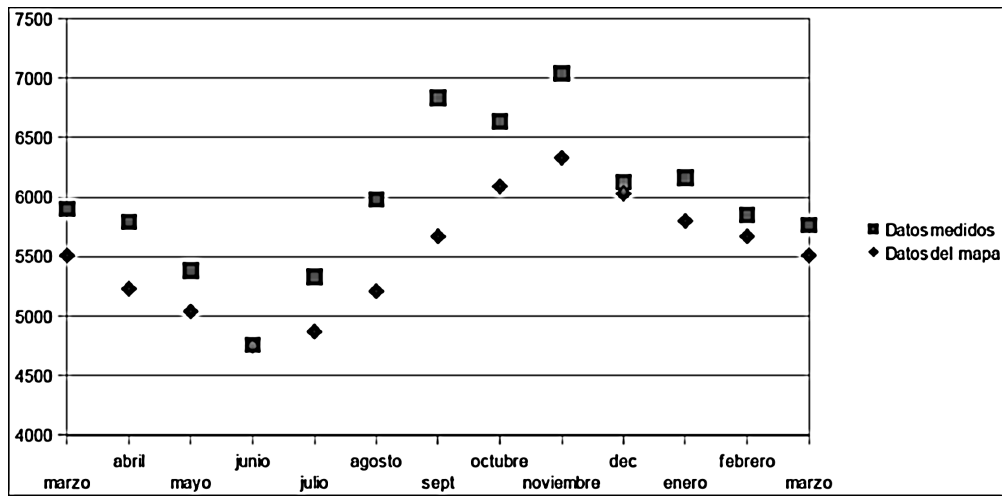


FIG. 9.— Comparación de datos de radiación solar interpolados (mapa) y medidos en superficie para la estación de monitoreo en la UMSS.

mento de Cochabamba presenta los valores más bajos de media anual de radiación global, entre  $4,2$  y  $4,5 kWh/m^2$  al día, debido a que ésta región es una zona de baja altitud sobre el nivel del mar y se caracteriza por su clima tropical y alta humedad generando una mayor dispersión de la radiación solar. En la zona suroeste la radiación solar aumenta ya que en esta región se localiza la Cordillera Oriental Central con un clima seco con valores entre  $5,7$  y  $6,3 kWh/m^2$  al día. Asimismo, se distinguen seis regiones de niveles de radiación que van aumentando de noreste a suroeste, tendencia igualmente ob-

servada en el estudio realizado por Birhuett (1993) para la obtención de los mapas de radiación solar para Bolivia.

4.1. Validación de los valores de radiación interpolados

Para la validación de los datos interpolados se realizó un estudio comparativo y de validación entre los valores de radiación medidos experimentalmente y aquellos estimados por la NASA para el Departamento de Cochabamba (para el área entre  $64^\circ - 67^\circ$  de longitud y  $16^\circ - 19^\circ$  de latitud) empleando un programa elaborado en MATLAB. La Fig. 7

TABLA 2  
COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES DE RADIACIÓN GLOBAL INTERPOLADOS (MAPA) Y MEDIDOS EN SUPERFICIE  
PARA EL MISMO PUNTO DE VALIDACIÓN ( $Wh/m^2$  al día).

MES	Estación UMSS Experimental	Estación UMSS Mapa Satelital	Aiquile SENAMHI	Aiquile Mapa Satelital	Independencia SENAMHI	Independencia Mapa Satelital
Enero	6163	5580	—	5600	—	5800
Febrero	5854	5670	—	5700	—	5920
Marzo	5764	5510	6257	5500	5820	5680
Abril	5792	5230	5650	5340	4146	5370
Mayo	5382	5040	5293	5120	4290	5210
Junio	4759	4750	4880	4800	4345	4900
Julio	5331	4870	5201	4960	4462	5020
Agosto	5981	5210	—	5380	—	5360
Septiembre	6834	5670	—	5910	—	5870
Octubre	6636	6090	—	6200	—	6320
Noviembre	7040	6330	—	6410	—	6570
Diciembre	6127	6030	—	6040	—	6310
Error Medio Anual (%)	—	7.64	—	5.42	—	15.73

muestra la división del área de estudio (Departamento de Cochabamba) en ocho subáreas en las que se compararon los datos.

Los datos experimentales fueron proporcionados por la red SENAMHI y la Fig. 8 muestra la comparación de estos con los datos simulados a través de las imágenes satelitales para un periodo de un año.

Se observa que la variación temporal de los valores de radiación tanto simulados como experimentales siguen el mismo comportamiento, hecho que fue observado en la estación de Suiza (Fig. 3) en un trabajo similar (Darnell et al. —), excepto en los meses de enero a marzo, esto debido a que la cantidad de nubes presentes en esos meses afecta el análisis de las imágenes adquiridas.

Además de la validación en las ocho sub-áreas, los valores de radiación solar global de los mapas obtenidos por el método de interpolación se contrastaron con datos medidos en superficie en un periodo de un año en dos estaciones remotas de la red SENAMHI: Aiquile (Latitud: 18.1833S, longitud: 65.1833W) e Independencia (Latitud: 17.3117S, longitud: 66.8481W); asimismo, se compararon los valores simulados con los obtenidos con un Piranómetro Kipp & Zonen Clase 2 instalado en el Departamento de Física de la Facultad de Ciencias y Tecnología (latitud: 17.3928S, longitud: 66.1351W) en el mismo periodo de un año (marzo 2008 – marzo 2009). La comparación entre los datos interpolados y experimentales para el mismo punto de validación y el correspondiente error se muestran en la Tabla 2.

La Fig. 9 muestra la variación anual de los datos de radiación mensual correspondientes al punto de monitoreo de la UMSS.

Se observa que los valores medidos en superficie son mayores que aquellos obtenidos en el mapa solar en el caso de las estaciones de la UMSS y Aiquile en cuanto que lo contrario sucede en el caso de la estación de Independencia. El error medio anual porcentual de todas las estaciones de monitoreo es de 10%.

## 5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se han utilizado los datos de radiación solar de la NASA obtenidos utilizando la metodología SSE (NASA-LARC —) para estimar los valores de radiación solar global mensual y anual para el Departamento de Cochabamba. Se utilizaron los datos obtenidos a partir del análisis de imágenes satelitales para estimar la distribución de la radiación solar global, asimismo se realizó un proceso de validación con datos medidos de tres estaciones en superficie (UMSS, Aiquile e Independencia) obteniéndose un error medio porcentual de 10%.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa en la Fig. 6 siete regiones con marcada diferencia de niveles de radiación solar anual: la región con mayor cantidad de radiación corresponde a la zona de la Cordillera Oriental en la que los valores de radiación oscilan entre  $5,4 - 7,2 kWh/m^2$  al día, la zona del trópico central con valores entre  $4,2 - 4,5 kWh/m^2$  al día y la zona restante del trópico con niveles de radiación entre  $4,5 - 5,4 kWh/m^2$  al día.

El periodo de registros analizados es de 22 años (Tabla 1). La variación mensual y espacial de los niveles de radiación se obtuvo utilizando el paquete de análisis geoestadístico ILWIS y aplicando el método de superficie móvil con distancia inversa, exponente de peso 1, distancia esférica y segundo grado parabólico. La aplicación del método de interpolación y los valores estimados muestran que en la estación de invierno (mayo – julio) se registra la menor cantidad de radiación solar, mientras que en las estaciones de primavera y verano (octubre – diciembre) se registra la mayor cantidad de radiación solar.

Por otro lado, las diferencias que eventualmente pueden ser encontradas entre los valores estimados y medidos en superficie pueden ser debidas al hecho de que los valores medidos en superficie corresponden a la localización del punto de monitoreo con características geográficas y climatológicas particulares, en cuanto que los datos obtenidos por los satélites abarcan extensiones entre  $1^\circ \times 1^\circ$ , que represen-



tan una media de condiciones climáticas diferentes.

El método de cálculo de la radiación solar global a partir de imágenes satelitales desarrollado ha obtenido resultados comparables a otros revisados en la bibliografía (Myers 2003; Lefevre & Diabaté 2007). Es recomendable que en lo sucesivo los valores estimados por métodos indirectos se comparen con datos registrados en un mayor número de estaciones meteorológicas para asegurar una cobertura geográfica suficiente del departamento.

Asimismo, es importante incorporar las bases de datos de radiación ya sea medidas en superficie u obtenidas a través de métodos indirectos a los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que ofrezcan a aquellos que requieren de estos datos

las herramientas diversas relacionadas con el recurso solar. Esto para la evaluación de los niveles de radiación solar para cualquier localización geográfica del país, a partir de modelos bien calibrados respecto a estos datos.

También se deben incluir herramientas que permitan estimar el rendimiento de diferentes dispositivos y/o sistemas que utilizan el recurso solar. Este tipo de herramientas ya se han desarrollado en otros países (<http://xn-energiasolarespaa-uxb.net>) y constituyen un factor decisivo para el impulso a las energías renovables. En particular, estas herramientas permiten la evaluación con un grado mucho mayor de certidumbre de la viabilidad económica de proyectos de energía solar, facilitando el proceso de su financiación.

#### REFERENCIAS

- Beyer, H. G., Costanzo, C., & Heinemann, D. 1996, *Solar Energy*, 56, 207
- Birhuett, E. 1993, *Revista E&D No. 3 PROPER Cochabamba*, Bolivia
- Darnell, W. L. et al. —, *Surface Radiation Budget: A Long-term Global Dataset of Shortwave and Longwave Fluxes*  
[http://www.agu.org/eos\\_elec/95206e.html](http://www.agu.org/eos_elec/95206e.html)
- Gautier, C., Diak, G., & Masse, S. 1980, *Journal of Applied Meteorology*, 19 No. 8, 1005
- Hoyos, D., Cadena, C., & Suárez, H. 2000, *Revista Averma*, 4 No. 8,  
<http://g.unsa.edu.ar/asades/actas2000/08-23.html>  
<http://www.asc.cestm.albany.edu/perez/strength.html>
- Lefevre, M. & Diabaté, W. L. 2007, *Solar Energy*, 81, 240
- Lucano, M. J. & Fuentes, I. E. 2008, *Revista Científica Facultad de Ciencias y Tecnología*, 8
- Mosser, W. & Raschke, E. 1984, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23, 166
- Mubiru, J. et al. 2007, *Theor. Appl. Climatol.*, 88, 259
- Myers, D. R. 2003, *Solar Radiation Modeling and Measurements for Renewable Energy Applications: Data and Model Quality* (International Expert Conference on Mathematical Modeling of Solar Radiation and Daylight Edinburgh, Scotland, September 15–16 )
- NASA-LARC. —, <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>
- Pérez, R., Incichen, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., George, R., & Vignola, F. 2002a, *Solar Energy*, 73, No. 5, 307
- Pérez, R., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., Incichen, P., George, R., & Vignola, F. 2002b, *Proc. SOLAR 2002, Sunrise on the Reliable Energy Economy*, Amer. Solar Energy Soc.
- Pinker, R. T. & Laszlo, I. 1992, *J. Appl. Meteorol.*, 31, 194
- Pinker, R. T., Laszlo, I., Whitlock, C. H., & Charlock, T. P. 1995, *Eos*, 76, 145
- PROPER-Bolivia et al. 1998, *Mapa de distribución de la Energía Solar en Bolivia*, Vice-Ministerio de Energía e Hidrocarburos. Programa para la Difusión de Energías Renovables PROPER Bolivia – GTZ – ESMAP – Banco Mundial
- Rigollier, C., Lefèvre, M., Cros, S., & Wald, L. 2002, *Heliosat 2: An improved method for the mapping of the solar radiation from METEOSAT imagery* (Proceedings of the 2002 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference. <http://www.eumetsat.de/en/index.html>)
- Whitlock, C. H., Brown, D. E., Chandler, W. S., DiPasquale, R. C., Gupta, S. K., Wilber, A. C., Ritchey, N. A., Kratz, D. P., & Stackhouse, P. W. 2001, *J. of Solar Energy Engineering, Amer. Soc. Mech. Engr.*, 23, 211
- Zelenka, A., Perez, R., Seals, R., & Renné, D. 1999, *Theoretical and Applied Climatology*, 62, 199