

# *Atlas de radiación solar para la región Cundiboyacense – Colombia por medio de datos radiométricos*

## */ Radiation atlas for Cundiboyacense region – Colombia by radiometric data*

Diego Julián Rodríguez Patarroyo

PhD(c) Ingeniería, Profesor  
Universidad Distrital. Bogotá-Colombia. djrodriguezp@gmail.com

Página  
99

ESING

Fecha de recepción: 21/08/2014 Fecha de aceptación: 06/10/2014

### Resumen

La medición del recurso solar es necesaria para aplicaciones en ingeniería, arquitectura, hidrología, entre otras. Por esta razón es necesario conocer el comportamiento de la radiación solar global diaria en periodos largos de tiempo. La distribución espacial de la radiación solar por lo general se presenta en forma de mapas de radiación solar que consignan la radiación solar diaria promedio para cada mes del año. En Colombia, el último mapa fue publicado en el año 2004. En la actualidad se cuenta con un mayor cubrimiento de radiómetros lo que hace que se cuenten con registros más actualizados y más confiables. En el presente trabajo se presenta los mapas de radiación solar para la zona Cundiboyacense, esta construcción se realizó con base en los datos de radiación global de la red local de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

### Palabras clave

Mapas radiación solar, radiómetros.

### Abstract

The measurement of the solar resource has been important for applications in engineering, architecture, and hydrology, among others. For this reason it is necessary to know the behavior of daily global solar radiation over long periods of time. The spatial distribution of solar radiation usually is presented via solar radiation maps that recorded the average daily solar radiation for each month of the year. In Colombia, the last maps recompilation was published in 2004. Currently it has greater coverage of radiometers making measurements, for this reason exists more updated and more reliable records. Solar radiation maps for Cundiboyacense area had built based on the data of global radiation of the local network of the Regional Autonomous Corporation of Cundinamarca are presented in this paper.

### Keywords

Maps solar radiation, radiometric instruments.

Para citar este artículo / To cite this article

D. Rodríguez. Atlas de radiación solar para la región Cundiboyacense-Colombia, por medio de datos radiométricos. Revista Ingenieros Militares, No.9, pp. 99-105. 2014.

## Introducción

Debido al impulso de las fuentes alternativas de energía en las últimas décadas en nuestro país, se hace necesario contar con información suficiente y necesaria para la investigación y desarrollo de sistemas basados en la energía solar [1]. La información precisa de la radiación incidente es necesaria para el diseño de cualquier sistema de conversión de la energía solar [2] ya sea fotovoltaica o solar térmica [3]. El departamento de Cundinamarca, y en particular la zona de la sabana de Bogotá, basa gran parte de su economía en la actividad agrícola, por lo tanto se requiere conocer el comportamiento de las condiciones ambientales y en particular la radiación solar para estimar el rendimiento de las cosechas, diseñar estrategias de secado de alimentos o para planificar sistemas de irrigación.

En el mundo es común presentar la información del recurso solar por medio de mapas que muestran la energía diaria acumulada promedio mensual. Esta presentación visual hace la información más asequible a los usuarios potenciales. Los mapas de radiación solar han sido desarrollados en todas partes del planeta. Ejemplo de esto son los Atlas de radiación solar de Europa [4], Perú [5], España [6], Brasil [7]. Para el caso de Estados Unidos de América, el Laboratorio Nacional de Fuentes Renovables de Energía (NREL por sus siglas en inglés) cuenta con un espacio web [8], que publica los mapas de radiación solar actualizados mes por mes.

En el caso colombiano se publicó en el año 2004 el Atlas de Radiación solar de Colombia [9], que consigna en forma de mapas la información del valor promedio diario de radiación solar global, brillo y radiación ultravioleta solar. Este mapa cubrió la totalidad del territorio Colombiano y utilizó la información de 71 estaciones radiométricas y 383 estaciones que miden el brillo solar.

Los métodos utilizados en el desarrollo de los mapas de radiación solar están basados en mediciones directas [9], métodos satelitales [10] y modelos basados en métodos empíricos [11] e híbridos [12]. Para ambientes tropicales los

métodos basados en imágenes satelitales presentan altos niveles de error [13] por los altos gradientes de humedad. Además es posible encontrar estudios que caracterizan la radiación solar y calculan el índice de claridad atmosférica utilizando métodos para analizar el comportamiento de las nubes sobre cada región [14].

En la actualidad, el país cuenta con una mayor cobertura de estaciones de medición de radiación solar. La red de observación meteorológica y radiométrica del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) tiene en la actualidad una mayor cobertura y el apoyo de redes auxiliares como la CENICAFE, CENICANÍA y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), lo que permite una actualización del mapa de radiación solar para Colombia con información más detallada y actualizada.

El presente artículo presenta la información recolectada por las estaciones automáticas de la CAR, por medio de mapas de radiación diaria. La información proviene de 21 estaciones piranométricas distribuidas en la zona Cundiboyacense, registros recolectados entre 2008 y 2010. Los mapas son reconstruidos por medio de interpolación estadísticas [15].

## Metodología

### *Área de Estudio*

La región de observación es el departamento de Cundinamarca, ubicado en la zona andina de Colombia. Ocupa un total de 24.210 km<sup>2</sup>, y está dividido en 116 municipios. La mayoría del territorio se encuentra ubicado sobre la cordillera occidental andina. Hacia el oriente colinda con los llanos orientales y al oriente con el río Magdalena. Su ubicación geográfica hace que este territorio presente condiciones meteorológicas especiales, caracterizada por la alta nubosidad en la región del pie de monte llanero y las zonas más secas del norte, en las cercanías del departamento de Boyacá [14].

La CAR entre muchas de sus funciones, se encarga de monitorear las condiciones climáticas de la región y en el territorio Cundinamarqués,

tiene distribuidas estaciones automáticas para la medición de parámetros hídricos y meteorológicos. Para el presente estudio se utilizó la información de 21 estaciones que miden radiación global por medio de piranómetros distribuidas en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. En la tabla 1 se encuentra consignado el nombre de las estaciones y su ubicación geográfica, en la figura 1 se presenta un mapa de esta ubicación.

### Método

La radiación global ( $H_g$ ) se define como la radiación solar recibida de un ángulo sólido de  $2\pi$  sobre una superficie horizontal [16], en otros términos, es toda la radiación que llega a la tierra, dando como resultado la suma de la radiación directa más la difusa. Al determinar la radiación global se mide el flujo de energía por unidad de área y de tiempo sobre una superfi-

cie horizontal expuesta al sol y en ausencia de cualquier tipo de sombra. Se considera como la cantidad de radiación global entre las seis de la mañana y las seis de la tarde y sus valores oscilan entre 500 y 10 000 (Wh)/m<sup>2</sup> al día [17].

Para la toma de datos se usó un piranómetro, que es el instrumento más usado en la medición de la radiación solar. Permite medir la radiación semiesférica global sobre una superficie horizontal en un ángulo de 180° [18]. En ocasiones es usado para mediciones de radiación solar sobre superficies inclinadas sobre el plano horizontal y en la posición inversa con el fin de medir la radiación solar reflejada [19].

El principio básico de funcionamiento que le permite medir la radiación global se basa en relacionar el voltaje que surge debido a la diferencia de temperatura de dos sectores pintados alternadamente de blanco y negro en un disco plano.

Tabla 1. Estaciones utilizadas en los mapas de radiación ubicadas en la zona Cundiboyacense.

Nombre	Latitud	Longitud	Altura	Nombre	Latitud	Longitud	Altura
AGUAS CLARAS	4.13	-74.42	1956	CHINAVITA	5.16	-73.35	1900
ALMACAFE	4.55	-74.23	2564	LA BOYERA	5.30	-73.85	2610
CACHIPAY	4.72	-74.42	1691	LA CAPILLA	5.10	-73.44	1917
CAPARRAPI	5.33	-74.48	1432	PASCA	4.31	-74.31	2256
CAPELLIANA	5.45	-73.77	2564	SAN PABLO DE BORBUR	5.65	-74.07	742
EL DELIRIO	4.52	-74.40	2053	SANTA MARÍA	4.84	-73.26	1300
EL GUAMAL	5.03	-74.12	3000	SANTA CRUZ DE SIECHA	4.78	-73.87	3100
EL HATO	5.25	-73.92	2840	SUBIA	4.48	-74.38	2075
MANTA	4.98	-73.55	1888	TUNGUAVITA	5.75	-73.12	2470
NAZARETH	5.38	-73.90	3037	UNICUNDINAMARCA	4.31	-74.81	2470
PTAR TOCANCIPA	4.97	-73.92	2575	UNINACIONAL	4.64	-74.09	2556
ZETAQUIRÁ	5.29	-73.17	1436	VILLETA	5.02	-74.47	878



Figura 1. Ubicación de las estaciones radiométricas en la zona de estudio.

La información es recolectada en intervalos de 1 hora, donde se registra la energía acumulada en este periodo de tiempo y sus unidades son los (Wh)/m<sup>2</sup>. El análisis de los datos es desarrollado en la framework ROOT [20], el cual almacena la información, posteriormente ésta es procesada y analizada. Se determinan los promedios y se entrega el valor de la radiación solar diaria, el promedio mensual y el anual.

Cuando se tiene los datos ya procesados se construye los mapas de radiación solar por medio de ArcGis [21]. Este paquete permite la construcción de la Red Irregular de Triángulos (TIN por sus siglas en inglés) que es una forma de convertir una serie de puntos en el espacio en una superficie 2D y es la forma más común de guardar modelos de mapas.

El procesamiento y análisis se describe a continuación:

1. Lectura y almacenamiento de los datos en archivos pool.root.
2. Análisis de continuidad para observar los periodos en que la medición es confiable.
3. Alistamiento de los datos. Se suprime los offset del sistema de adquisición de datos (DAQ) y se eliminan datos que no contengan información física, debido a errores instrumentales.
4. Se integra los datos horarios para obtener la energía acumulada diaria en (Wh)/m<sup>2</sup> y se hacen los promedios mensuales y multianuales.
5. Se construyen los mapas de radiación promedio mensual y anual.

## Resultados

A continuación se muestra el comportamiento de la radiación acumulada diaria promedio mensual, para el periodo comprendido entre los años 2008 y 2010 para el centro de la región Cundiboyacense. La figura 2 muestra la tendencia promedio de la radiación de la estación con mayor radiación promedio (Capellanía) y

la estación con la menor radiación promedio (El Delirio). El mayor valor de radiación se presenta en los meses de enero y diciembre, que corresponde a la temporada seca de fin de año. La máxima radiación se presenta para el mes de enero con un pico de 3 700 (Wh)/m<sup>2</sup>, y el valor mínimo es de 3200 (Wh)/m<sup>2</sup> que se presenta el mes de mayo.

Como se puede observar en la figura 2, las mediciones muestran una alta variabilidad para el mes de enero, con una diferencia entre la estación de Capellanía y la estación de El Delirio de más de 3500 (Wh)/m<sup>2</sup>, esto se debe a las grandes diferencias geográficas que generan las distintas zonas climáticas. La figura 3 muestra la distribución de la radiación solar discriminada por mes. En todos los mapas, se observa que la zona norte de la región de estudio presenta para todos los meses la mayor radiación solar. En la zona sur, que corresponde al pie de monte llanero, se presenta la menor radiación. Esta tendencia que se mantiene para todos los meses del año.

Este comportamiento se puede explicar por la alta nubosidad que se presenta en el sur de la región, debido a, que las nubes pueden reflejar el 70% [17] de la radiación total incidente.

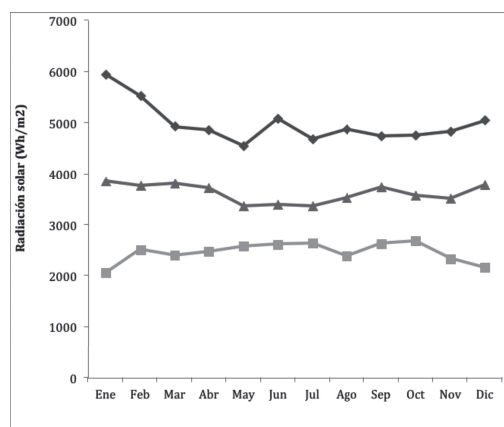


Figura 2. Radiación diaria promedio mensual a) Rombo – estación Capellanía. b) Cuadros – Estación El Delirio. c) Triángulos-Promedio todas las estaciones.

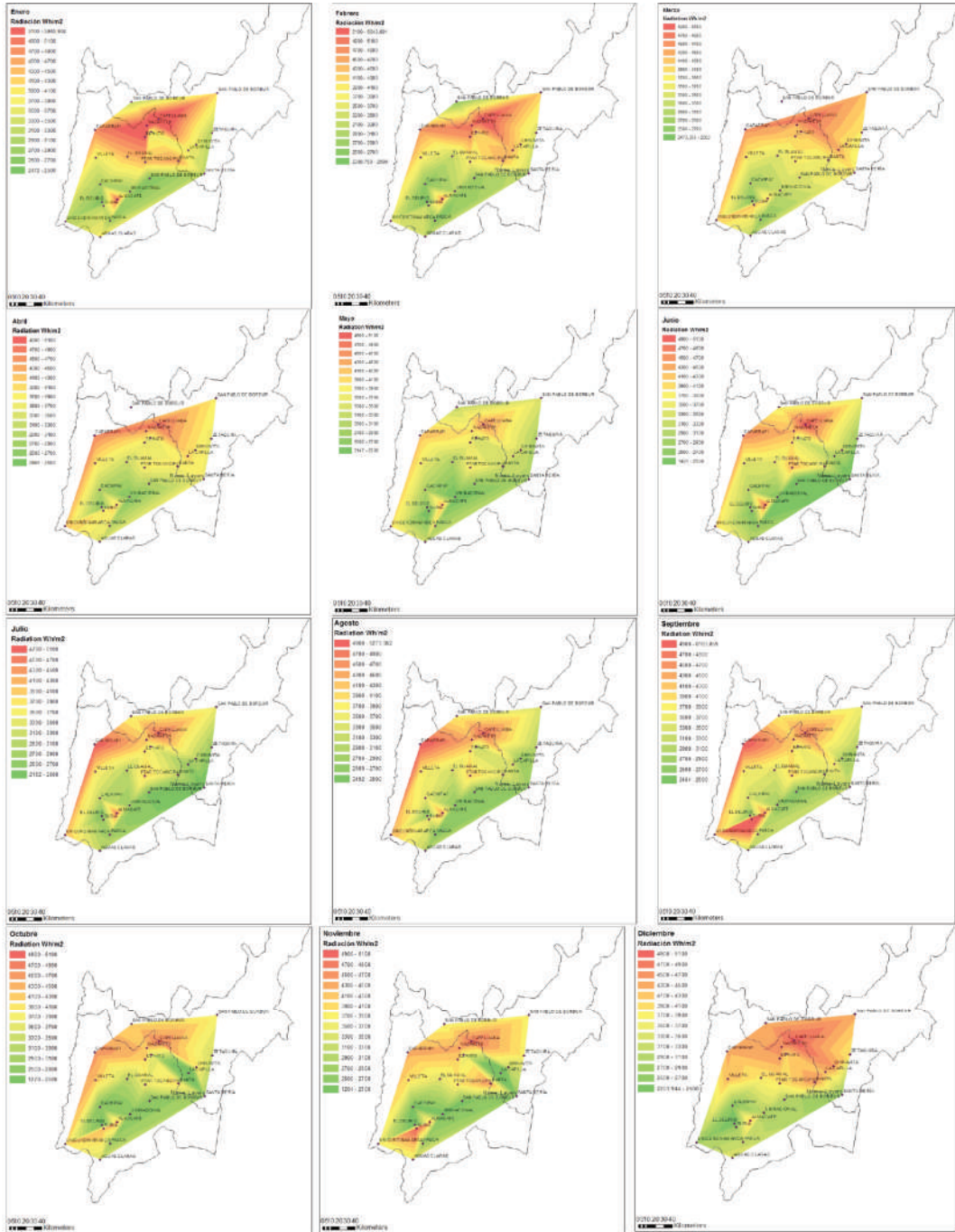


Figura 3. Mapas de radiación solar promedio mensual.

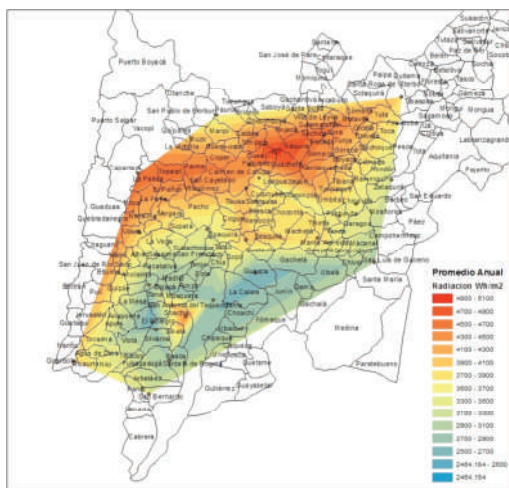


Figura 4. Distribución de la radiación diaria promedio anual.

En la figura 4 se muestra la distribución de la radiación diaria promedio anual. La mayor radiación está distribuida al norte de la zona de estudio, sobre los municipios de Ráquira, Susa y Simijaca, la radiación sobre esta región del departamento está por encima de 5000 (Wh)/m<sup>2</sup>. En contraste la ciudad de Bogotá y sus municipios fronterizos orientales, que presentan la menor radiación, con un promedio anual de 2 800 (Wh)/m<sup>2</sup>.

Al comparar estos resultados con los registrados en el mapa de radiación solar de la UPME [9] se puede observar como los mapas desarrollados en este trabajo son consistentes, aunque no se puede comparar de forma directa porque la resolución espacial y los métodos de reconstrucción de la información son diferentes. El mapa de la UPME del 2004 se construyó en su mayoría con base a datos de brillo solar [9], y se reconstruye la radiación global por medio del modelo modificado de Angstrom. Esto hace que los mapas de radiación presentados en este artículo, se constituyan como el primer intento de registrar la información de la radiación solar basado en mediciones directas.

La distribución de la energía solar en la zona, presenta el mínimo en el sur y el máximo en la frontera entre los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, característica común en ambas series de mapas. Además la reconstrucción hecha por la UPME y la presentada en este trabajo coinciden en la distribución temporal, que

muestra la mayor radiación en la temporada seca de los meses de Diciembre y Enero.

## Conclusiones

La región Cundiboyacense está caracterizada por ser una zona montañosa lo que influye en cierto grado con la disminución de la radiación incidente por la alta concentración no uniforme de nubes.

Se realizó el procesamiento de la información de radiación global obtenidas de las estaciones automáticas del IDEAM. Se hicieron los mapas de radiación solar y se determinó por medios estadísticos la radiación sobre puntos en los cuales no hay medición directa de radiación global. La máxima radiación se presentó en la estación de Capellanía con un promedio de 5000 (Wh)/m<sup>2</sup>.

Los mapas presentados en este artículo muestran la radiación solar por periodos mensuales y el promedio multianual, lo que permite ubicar tanto espacial como temporal el valor de la radiación solar en los diferentes municipios de la región. Se determinó que la zona del pie de monte llanero presenta en promedio la menor radiación, por otro lado, la mayor radiación se acumula en la zona norte de la región, en particular en los municipios en la frontera de Cundinamarca y Boyacá.

## Referencias

- [1] I. Karakoti, P. K. Das, & B. Bandyopadhyay. "An analytical study on daily solar radiation data." *Current Science*, vol. 105, no. 2, pp. 215–224. 2013.
- [2] G. Casaravilla, R. Chaer, & P. Alfaro. "Modelo de Series de Tiempo de Radiación Solar para Simulador de Instalaciones Fotovoltaicas" en *IEEE, 7º encuentro de Energía, Potencia, Instrumentación y Medidas*. Montevideo-Uruguay, 2008, pp. 88–90.
- [3] P. Meisen. *Renewable energy potential of latinamerica*. México. 2009. pp. 81.

- [4] K. Scharmer, & J. Greif. *Fundamentals and maps*. 1st ed., vol. 1. Paris. 2000.
- [5] A. L. Mola. *Atlas de energía solar*. Lima-Perú. 2003. pp. 31.
- [6] AEMET. *Atlas de Radiación Solar en España utilizando datos del SAF de Clima de EUMETSAT*. Madrid - España. 2006 pp. 162.
- [7] F. R. Martins, E. B. Pereira, & S. L. Abreu. "Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project." *Solar Energy*, vol. 81, no. 4, pp. 517–528. 2007.
- [8] NREL. (2013). Retrieved from <http://www.nrel.gov/gis/solar.html>
- [9] UPME. *Atlas de Radiación Solar de Colombia*. Bogotá. 2004. pp. 13–22.
- [10] A. Drews, "Preparation of a global radiation data set based on the Heliosat method." Oldenburg. Final report on the DWD-contract 30112583/07-HEL. Postfach 2503, 26111. 2007.
- [11] R. Chen, K. Ersi, J. Yang, S. Lu,, &W. Zhao. "Validation of five global radiation models with measured daily data in China." *Energy Conversion and Management*, vol.45, pp.11-12, 2004.
- [12] H. Yang, E. De Marcelo, &A. Germán, "Estimación de la Irradiación Solar Media Mensual ,para la Ciudad de Estimation of Global Solar Irradiation, for the City of Catamarca using the Hybrid Model of Yang .", *Rev. Aportes Cient. en PHYMATH*, no.1, pp. 1–16. 2012.
- [13] S. Janjai. "A method for estimating direct normal solar irradiation from satellite data for a tropical environment." *Solar Energy*, vol 84, no. 9, pp. 1685–1695. 2010
- [14] N. Forero, W. Mesa, M. A. Martinez, L.M. Caicedo, G. Gordillo. "Estimación del Valor Medio Mensual del Índice de Claridad Atmosférico" *Rev. Colomb. De Fís.*, vol. 40 no.1, pp. 167–169.2008
- [15] J. Wright. "Mapas de radiación solar en Costa Rica." *Top. Meteor. Oceanog*, vol. 9, no. 2, pp. 79-87. 2002.
- [16] A. Al-Lawati, A. S. Dorvlo,, & J. Jervase, a. "Monthly average daily solar radiation and clearness index contour maps over Oman". *Ener. Conver. and Manag.*, vol. 44, no. 5, pp.691–705.2003.
- [17] V. Badescu. *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface*.1st ed. Bucharest: Springer.2008.
- [18] Guía de instrumentos y Métodos de observación meteorológicos. OMM N°08 Organización Meteorológica Mundial. Suiza. 1990.
- [19] S. Guevara, *Estimación de la radiación solar*. Lima -Perú. 2003. pp. 10
- [20] CERN, (2013), Retrieved from <http://root.cern.ch/drupal/>
- [21] R. Olaya, *Sistemas de referencia y coordenadas Arcgis 10*. Cali – Colombia. 2010, pp. 1-24