

Solar Radiation Atlas for the Region Cundiboyacense- Colombia through Radiometric Data

Diego Julián Rodríguez, Msc.¹, Miguel Ávila, MSc.¹, Jaime Antonio Benítez, MSc.¹

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, djrodriguez@udistrital.edu.co, maavila@udistrital.edu.co, jbenitez@udistrital.edu.co

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 behaviour 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 were built based on the data of global radiation of the local network of the Regional Autonomous Corporation of Cundinamarca (CAR) are presented in this paper.

Keywords— Maps, Solar Radiation, Radiometric instruments, Cundiboyacense area.

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.142>

ISBN: 13 978-0-9822896-8-6

ISSN: 2414-6668

13th LACCEI Annual International Conference: “Engineering Education Facing the Grand Challenges, What Are We Doing?”
July 29-31, 2015, Santo Domingo, Dominican Republic

ISBN: 13 978-0-9822896-8-6

ISSN: 2414-6668

DOI: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.142>

Atlas de Radiación Solar Para La Región Cundiboyacense– Colombia Por Medio De Datos Radiométricos

Diego Julián Rodríguez, Msc¹, Miguel Ávila, Msc², Jaime Antonio Benítez, Msc³

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, djrodriguez@udistrital.edu.co

²Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, maavila@udistrital.edu.co

³Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, jbenitez@udistrital.edu.co

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, contruidos basados en los datos de radiación global de la red local de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).

Palabras Claves-Mapas, Radiación solar, Radiómetros, Región Cundiboyacense.

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 were built based on the data of global radiation of the local network of the Regional Autonomous Corporation of Cundinamarca (CAR) are presented in this paper.

Key Words-Maps, Solar Radiation, Radiometric instruments, Cundiboyacense area.

I. 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, 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 las partes del mundo. Ejemplo de esto son los Atlas de radiación solar de Europa [4]. 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 [5] donde 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 [6] que consigna en forma de mapas la información de la radiación en todo el ancho del espectro como para el UV. Este mapa cubrió la totalidad del territorio Colombiano y utilizó la información de 71 estaciones radiométricas y 383 estaciones donde se mide brillo solar. Los métodos utilizados en el desarrollo de los mapas de radiación solar están basados en mediciones directas, métodos satelitales [8] y modelos basados en métodos empíricos [9] e híbridos [10]. Para ambientes tropicales los métodos basados en imágenes satelitales presentan altos niveles de error [11] por los pronunciados gradientes de humedad.

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) cuenta en la actualidad con una mayor cobertura y cuenta con el apoyo de redes auxiliares como la de CENICAFE,

CENICAÑA y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), lo que permitirá una actualización del mapa de radiación solar para Colombia con información más detallada y actualizada. Otros estudios donde se caracteriza la radiación solar es [12], donde calcula el índice de claridad atmosférica. Aquí se muestra un método para analizar el comportamiento de las nubes sobre la región. El presente artículo se presenta la información recolectada por las estaciones automáticas del CAR por medio de mapas de radiación diaria. La información proviene de 21 estaciones piranométricas distribuidas en la zona Cundiboyacense, registros recolectados durante los años 2008, 2009 y 2010. Los mapas son construidos por medio de interpolación estadísticas [13].

Es de aclarar que es el primer atlas para la región realizado solo con datos radiométricos, ya que los mapas antes construidos se basaron en datos obtenidos por medios empíricos. Esta región se ha constituido en el centro económico del país por esta razón es necesario conocer los recursos energéticos para complementar la energía suministrada por la red interconectada. Además los resultados acá obtenidos podrán ser el insumo base para calibrar equipos radiométricos de campo, así como para caracterizar equipos solares tanto térmicos como fotovoltaicos en la región de estudio.

II. METODOLOGÍA

La región de observación es el departamento de Cundinamarca ubicado en la zona andina de Colombia. Ocupa un total de 24.210 km², 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 zonas más secas al norte en las cercanías del departamento de Boyacá. 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 consignada el nombre de las estaciones y su ubicación geográfica.

TABLA 1

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

Nombre	φ	$\lambda(W)$	h(m)
Aguas claras	4.13°	-74.42	1956

Almacafe	4.55°	-74.23	2564
Cachipay	4.72°	-74.42	1691
Caparrapi	5.33°	-74.48	1432
Capelliana	5.45°	-73.77	2564
El delirio	4.52°	-74.40	2053
El guamal	5.03°	-74.12	3000
El ható	5.25°	-73.92	2840
Manta	4.98°	-73.55	1888
Nazareth	5.38°	-73.90	3037
Ptarcancipa	4.97°	-73.92	2575
Zetaquirá	5.29°	-73.17	1436
Chinavita	5.16°	-73.35	1900
La boyera	5.30°	-73.85	2610
La capilla	5.10°	-73.44	1917
Pasca	4.31°	-74.31	2256
San pablo de borbur	5.65°	-74.07	742
Santa maría	4.84°	-73.26	1300
Santa cruz de siecha	4.78°	-73.87	3100
Subia	4.48°	-74.38	2075
Tunguavita	5.75°	-73.12	2470
Unicundinamarca	4.31°	-74.81	2470
Uninacional	4.64°	-74.09	2556
Villeta	5.02°	-74.47	878

La radiación global (H_g) se define como la radiación solar recibida de un ángulo sólido de 2π sobre una superficie horizontal [14], 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 superficie 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 10000 Wh/m^2 al día [15]

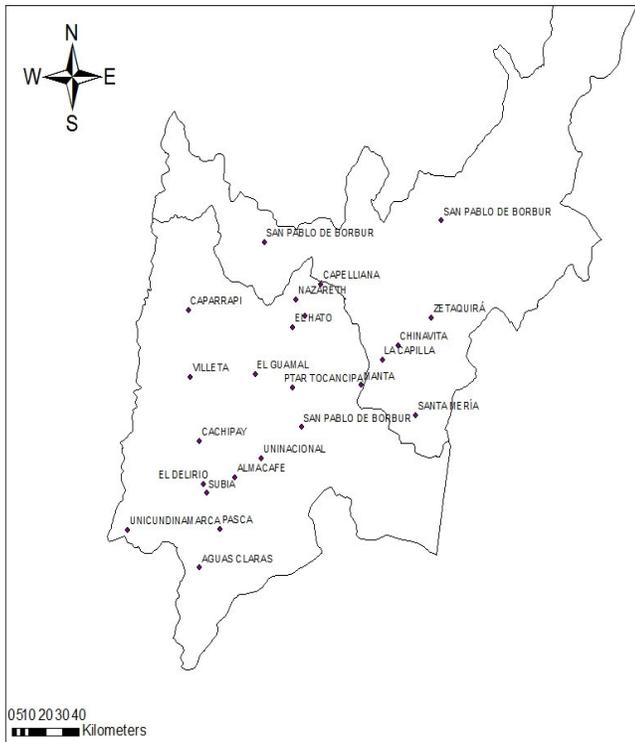


Fig1. Ubicación de las estaciones radiométricas en la zona de estudio.

El piranómetro 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° (OMM, 1990). 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[16]

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.

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^2 . El análisis de los datos es desarrollado en la framework ROOT[17], el cual almacena la información, es procesada y analizada. Se determina los promedios y se entrega el valor como de la radiación solar diaria promedio mensual y anual. Los mapas son construidos en el Framework ArcGis [7]. Los datos procesados de las estaciones de la CAR son importados en formato *.xls y ArcGis permite la construcción de mapas por medio del procesamiento y análisis. El proceso se describe a continuación:

1. Lectura y almacenamiento de los datos en archivos *pool.root*.

2. Análisis de continuidad donde se observan los periodos donde 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^2 y se hacen los promedios mensuales y multianuales.
5. Se construyen los mapas de radiación promedio mensual y anual.

Para este trabajo fue realizado un software para el procesamiento de datos radiométricos, que realiza el procesamiento estadístico y comprueba la uniformidad de los datos.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

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 1 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 $3700 Wh/m^2$, y el valor mínimo es de $3200 Wh/m^2$ que se presenta el mes de mayo.

Como se puede observar en la figura1, las mediciones muestran una alta variabilidad para el mes de enero una diferencia entre la estación de Capellanía con la estación de El Delirio es de más de $3500 Wh/m^2$, esto se debe a las grandes diferencias geográficas que generan diferentes zonas climáticas.

La Tabla 2 muestra la distribución de la radiación solar discriminada por mes. En todos 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 es una 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% (Badescu, 2008) de la radiación total incidente.

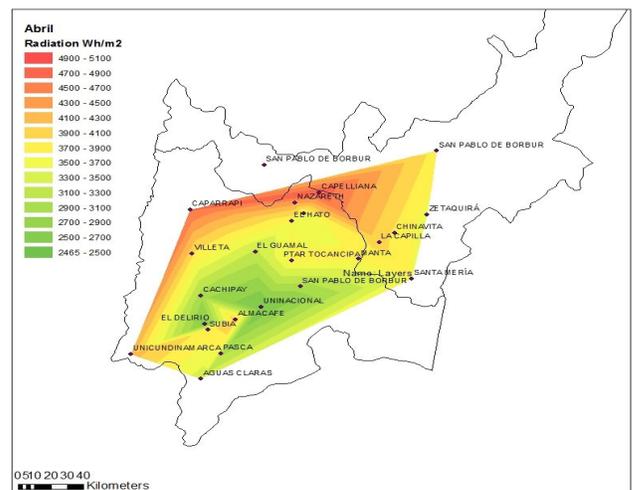
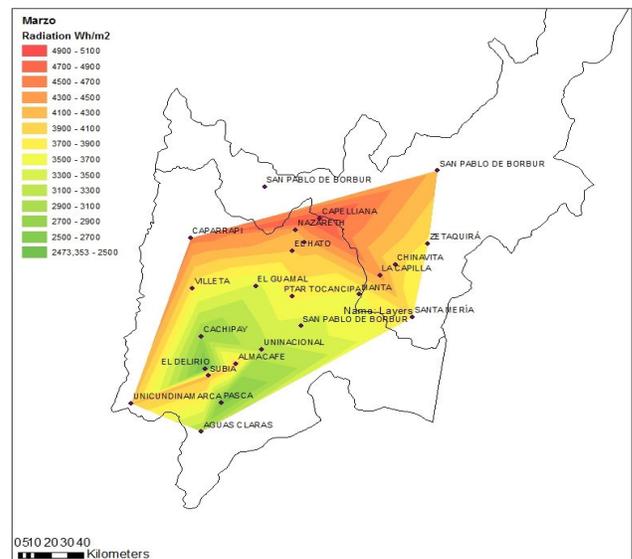
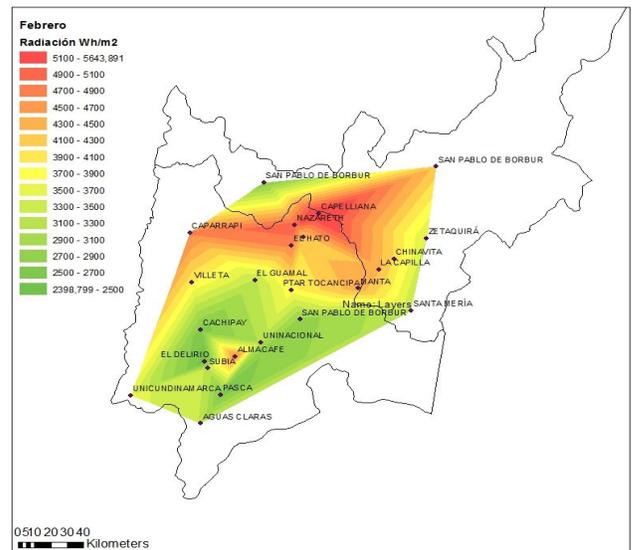
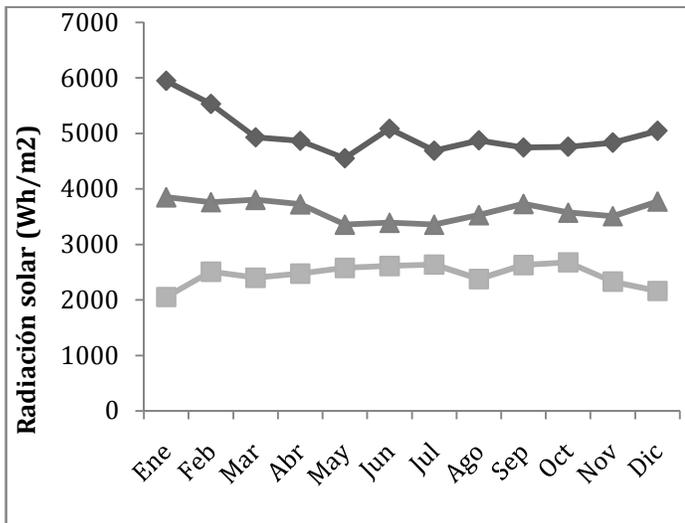
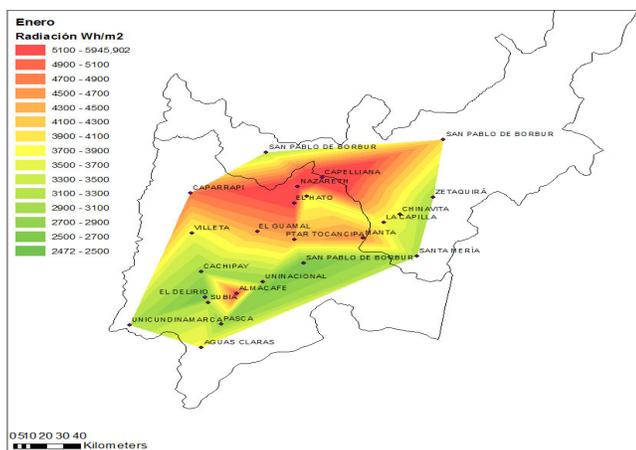
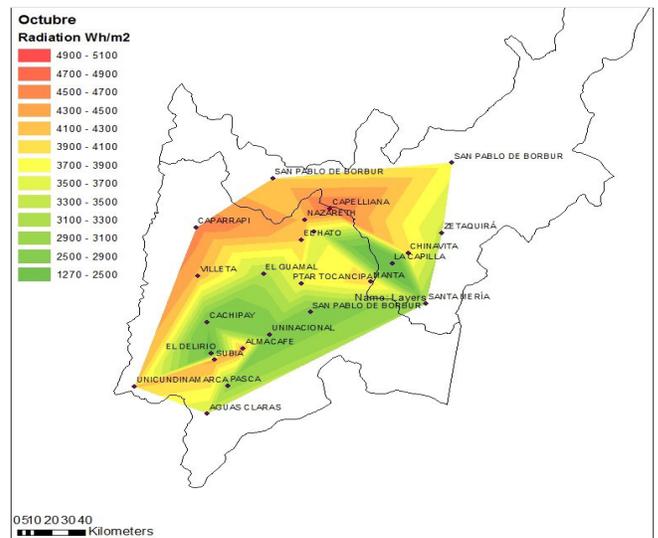
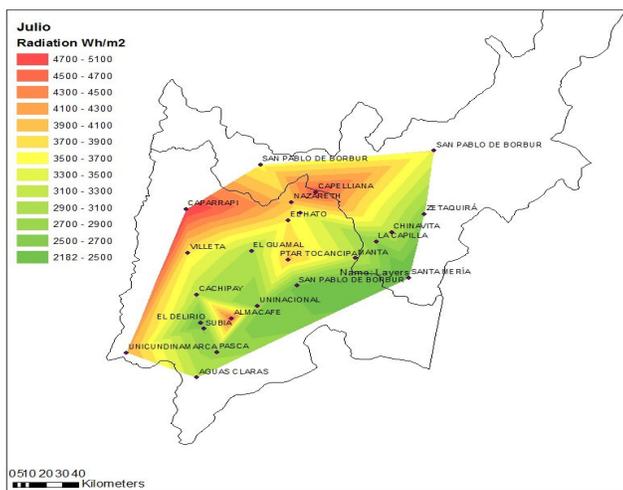
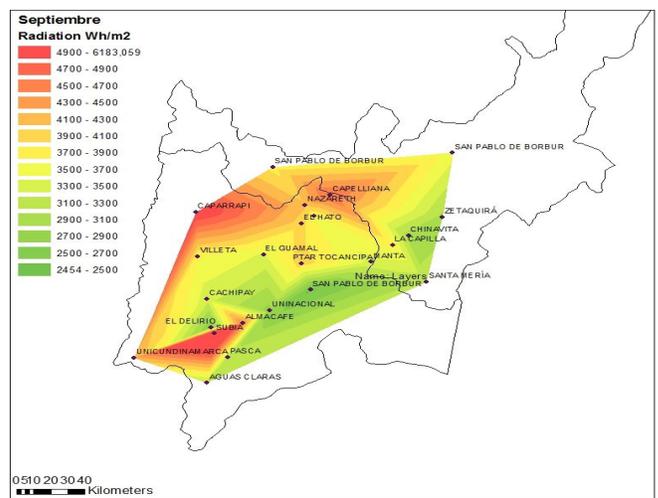
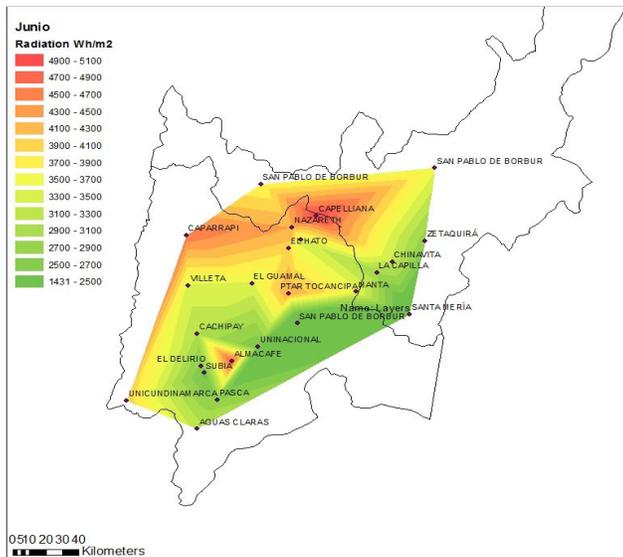
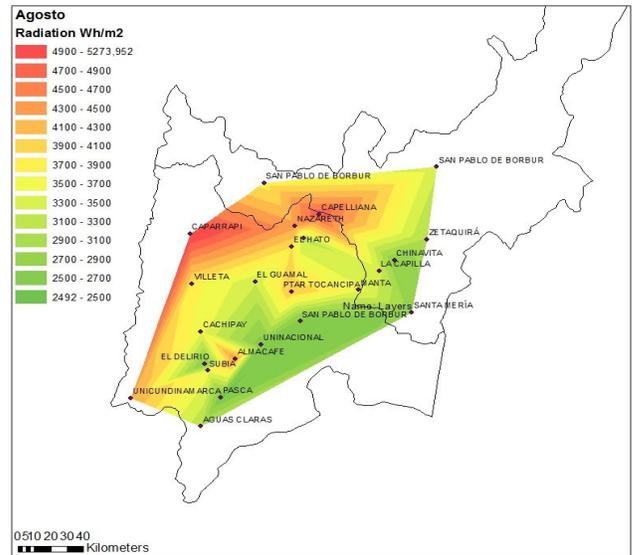
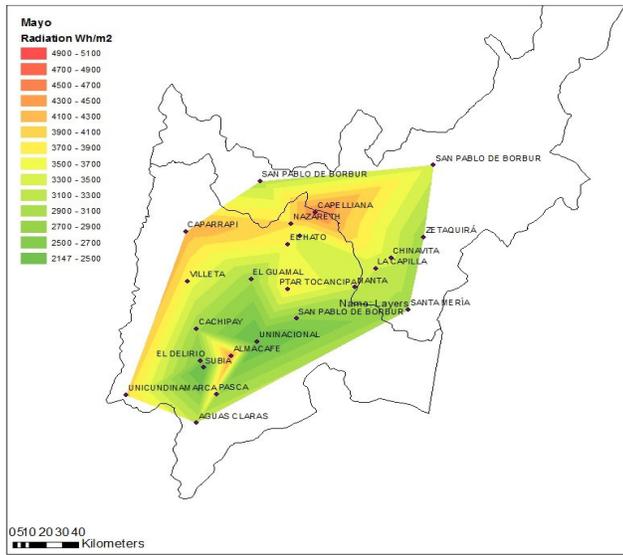


Figura 2. Radiación diaria promedio mensual a) Rombos – estación Capellanía. b) Cuadros – Estación El Delirio. c) Triángulos - Promedio todas las estaciones.

En la figura 2 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^2 . En contraste la ciudad de Bogotá y sus municipios fronterizos orientales presentan la menor radiación, con un promedio anual de 2800 Wh/m^2 .

A continuación se presentan mapas de radiación solar promedio mensual obtenidos mediante la metodología propuesta.





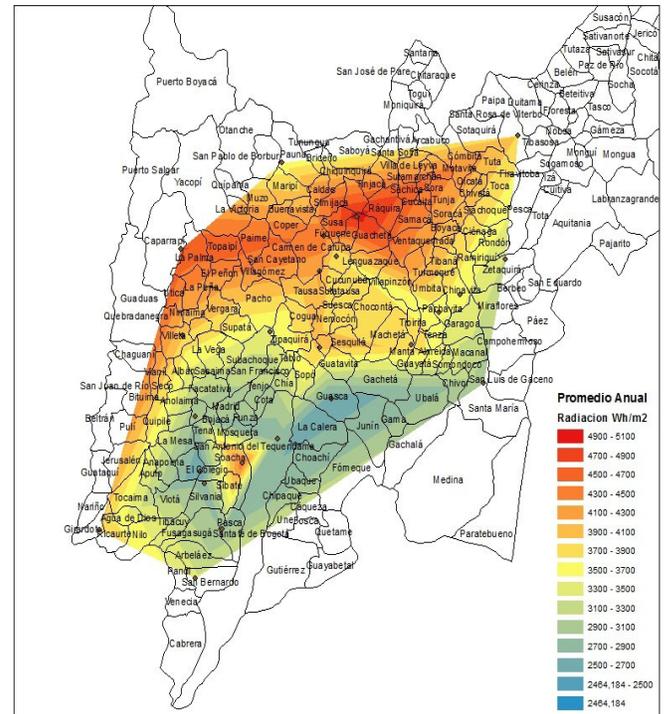
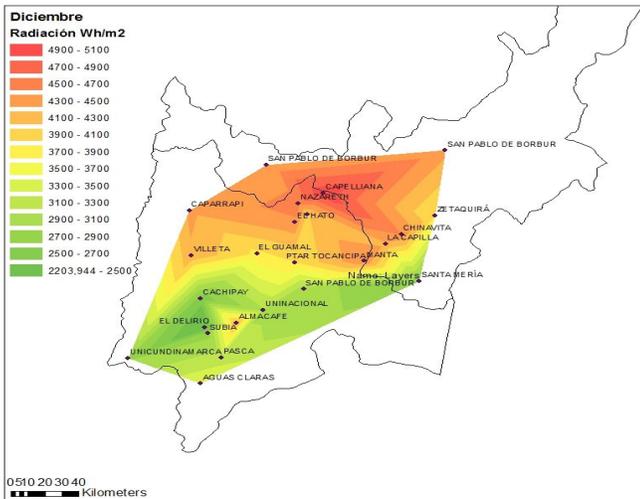
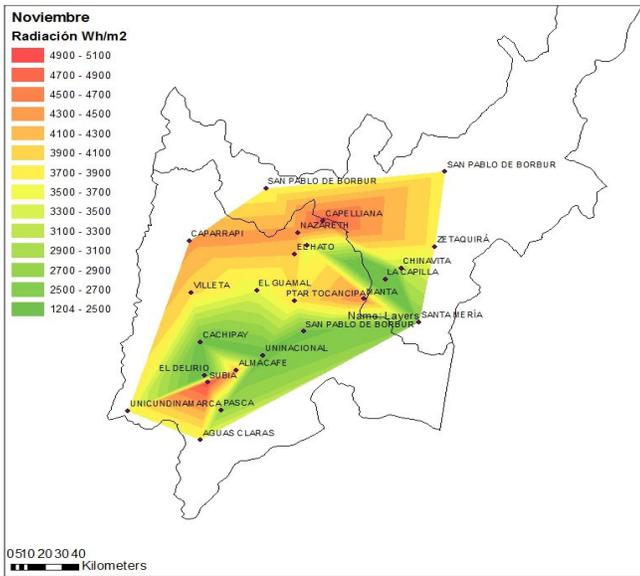


Fig3. Distribución de la radiación diaria promedio anual.

La distribución de la energía solar en la zona, donde se 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. Es claro que la reconstrucción hecha por la UPME y del presente trabajo coinciden en la distribución temporal, en 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 Capellán con un promedio de 5000 Wh/m^2 .

Al comparar estos resultados con los registrados en el mapa de radiación solar de la UPME (UPME, 2004) se puede observar como los mapas desarrollados en este trabajo son consistentes, aunque no se puede comparar de forma directa debido a que 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 en base a datos de brillo solar (UPME, 2004), donde se reconstruyó la radiación global por medio del modelo modificado de Angstrom. Esto hace que los mapas de radiación acá presentados se constituyan como el primer intento de registrar la información de la radiación solar basado en mediciones directas.

Los mapas presentados en este trabajo muestran la radiación solar por periodos mensuales y el promedio multianual anual, 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] Karakoti, I., Das, P. K., & Bandyopadhyay, B. (2013). An analytical study on daily solar radiation data. *Current Science*, 105(2), pp 215–224.
- [2] Casaravilla, G., Chaer, R., P. (2008). Modelo de Series de Tiempo de Radiación Solar para Simulador de Instalaciones Fotovoltaicas, pp 88–90.
- [3] Meisen, P. (2009). *Renewable energy potential of latinamerica*, pp 81.
- [4] Scharmer, K., & Greif, J. (2000). *Vol. 1 : Fundamentals and maps* (1st ed., Vol. 1). Paris.
- [5] Mola, A. L. (2003). *Atlas de energía sola*. Lima -Perú. pp31.
- [6] Nrel. (2013). Retrieved from <http://www.nrel.gov/gis/solar.html>.
- [7] Upme. (2004). *Atlas de Radiación Solar de Colombia* pp22. Bogotá.
- [8] Drews, A. (2007). Preparation of a global radiation data set based on the Heliosat method.
- [9] Chen, R., Ersi, K., Yang, J., Lu, S., & Zhao, W. (2004). Validation of five global radiation models with measured daily data in China. *Energy Conversion and Management*, 45, pp 11-12.
- [10] Yang, H. De, Marcelo, E., & Germán, A. (2012). Estimación de la Irradiación Solar Media Mensual, para la Ciudad de Estimation of Global Solar Irradiation ,foRthe City of Catamarca using the Hybrid .
- [11] Janjai, S. (2010). A method for estimating direct normal solar irradiation from satellite data for a tropical environment. *Solar Energy*, 84(9), pp168–169
- [12] Forero N., Mesa W., Martínez M. A., Caicedo L.M., Gordillo G. (2008). Estimación del Valor Medio Mensual del Índice de Claridad Atmosférico (K. *Revista Colombiana De Física*, 40(1), pp 167–169.
- [13] Wright, J. (2002). Mapas de radiación solar en Costa Rica. *Top. Meteorol. Oceanog*, 9(2), pp 79–87.
- [14] Al-Lawati, A., Dorvlo, A. S. ., & Jervase, J. a. (2003). Monthly average daily solar radiation and clearness index contour maps over Oman. *Energy Conversion and Management*, 44(5), pp 691–705.
- [15] Badescu, V. (2008). *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface* (1st ed.). Bucharest: Springer.
- [16] Guevara, S. (2003). *Estimación de la radiación solar*. Lima –Perú, pp10.
- [17] CERN, (2013), Retrieved from <http://root.cern.ch/drupal/>