

Análisis estadístico de la radiación solar en la ciudad de Cúcuta¹

Statistical analysis of solar radiation in the city of Cúcuta

Análise estatística da radiação solar na cidade de Cúcuta

W. Contreras, M. G. Galban y S. B. Sepúlveda

Recibido: febrero 19 de 2017 - Aceptado: enero 15 de 2018

Resumen— En el presente documento se realiza un análisis de la radiación solar en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia, con el objetivo de brindar una descripción detallada de la energía del Sol o insolación presente en este territorio. Para realizar estos análisis se trabajó sobre una base de datos compuesta por muestras de radiación solar global por 24 horas del día durante un periodo de nueve años; por medio del software libre especializado en estadística denominado R, se ejecutaron diferentes tipos de cálculos. A partir de estos estudios se obtuvieron gráficas en donde se presentan en forma de resumen estadístico, los valores de radiación para cada mes del año y para un año completo, además de obtener un valor de 5.335 horas para las horas solares pico en la ciudad y encontrar una ecuación que prediga con base en los datos obtenidos, la radiación solar de este sitio. Asimismo, con el presente análisis se pretende cuantificar desde un punto de vista descriptivo, el recurso solar presente en la ciudad de Cúcuta.

Palabras clave— Radiación solar global, horas solar pico, insolación, R Studio.

Abstract— This work presents a statistical analysis of solar radiation in the city of Cúcuta, Norte de Santander, Colombia. The main purpose of this study is to provide a thorough description of the solar energy available in this territory. To perform the analysis, we processed data of hourly global solar radiation during a period of nine years; we used R software to execute different types of statistical calculations. In this paper, we present graphs to summarize the values of global solar radiation for each month and the whole year. Furthermore, we obtained 5.335 sun peak hours for the city of Cúcuta and proposed an equation to estimate global solar radiation from historical data for this site. This research aims to quantify, from a statistical point of view, the solar resource available in the city of Cúcuta.

Keywords— Global solar radiation, sun peak hours, insolation, R Studio.

Resumo— Este documento analisa a radiação solar na cidade de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia, com o objetivo de fornecer uma descrição detalhada da energia solar ou insolação presente neste território. Para realizar essas análises, fue realizado um trabalho em uma base de dados composta por amostras de radiação solar global por 24 horas do dia durante um periodo de nove anos; através de software livre especializado em estatística chamado R, foram executados diferentes tipos de cálculos. Através destes estudos, foram obtidos gráficos onde os valores de radiação para cada mês do ano e para um ano completo são apresentados como um resumo estatístico, além de obter um valor de 5.355 horas para as horas solares pico na cidade e encontrar uma equação que prevê, com base nos dados obtidos, a radiação solar deste site. Com a análise atual, procura-se quantificar de um ponto de vista descritivo, o recurso solar presente na cidade de Cúcuta.

Palavras chave— Radiação solar global, horas solar pico, insolação, R Studio.

¹Producto derivado del proyecto de investigación “Análisis de los efectos de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red eléctrica de baja tensión en la UFPS”, apoyado por la Universidad Francisco de Paula Santander a través del Grupo de Investigación y Desarrollo en Microelectrónica Aplicada, GIDMA.

W. Contreras, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia, email: wilmercs@ufps.edu.co.

M. G. Galban, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia, email: migangiuseppgp@ufps.edu.co.

S. B. Sepúlveda, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia, email: sergio.sepulveda@ufps.edu.co.

Como citar este artículo: Contreras, W., Galbán, M. G. y Sepúlveda, S. B. Análisis estadístico de la radiación solar en la ciudad de Cúcuta, Entre Ciencia e Ingeniería, vol. 12, no. 23, pp. 16-22, enero - junio, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.31908/19098367.3698>



I. INTRODUCCIÓN

La radiación solar se define como la energía originada en el Sol y medida en la superficie de la Tierra [1]; es un recurso natural que ha estado presente a través de la historia y ha permitido la supervivencia humana. Esta energía se cuantifica por medio de la radiación solar

global, una magnitud que representa la cantidad de energía electromagnética incidente en una superficie por unidad de tiempo, por unidad de área, y tiene una magnitud constante fuera de la atmósfera terrestre, con un valor aproximado de 1368 W m^{-2} [2].

Por otra parte, la insolación se refiere a la radiación incidente sobre un área en determinado tiempo, normalmente expresada en kilovatios hora por metro cuadrado por día ($\text{kWh m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) [3]. Debido a los elementos presentes en la atmósfera como el oxígeno, el hidrógeno, el ozono, el dióxido de carbono, el metano y también factores como las nubes, el vapor de agua y algunos otros más, el valor de la radiación solar global en la superficie terrestre varía haciendo que su comportamiento sea diferente para diferentes intervalos de tiempo.

Sin embargo, análisis como [4], [5], permiten conocer el comportamiento de esta variable y por medio de análisis estadísticos, desarrollo de algoritmos inteligentes y otros medios, se puede predecir su estado; además, su conocimiento en un área específica es muy importante para determinar el potencial de uso de la energía solar para ser convertida, tanto en energía eléctrica como en energía térmica [6].

La energía solar es una de las principales energías renovables debido a que es virtualmente inagotable y posee un menor impacto contaminante en el medio ambiente, sumado esto a su efectividad y practicidad al llevar energía eléctrica o térmica a cualquier zona del planeta, donde por motivo de ubicación no llega la cobertura de la red de energía eléctrica convencional [7].

La referencia [4] presenta el potencial solar de la ciudad de Cúcuta por medio de bases de datos suministradas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME); allí se encuentra que el valor promedio de insolación para la ciudad está entre 4 y $4.5 \text{ kWh m}^{-2} \text{ día}^{-1}$; que la mayor insolación en la ciudad de Cúcuta se obtiene en el mes de julio con un valor promedio entre 5 y $5.5 \text{ kWh m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, y la menor se presenta en los meses de noviembre y diciembre, con un valor promedio entre 3.5 y $4 \text{ kWh m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. También señala esta información, que para el primer semestre del año se tiene la menor duración de luz solar, la cual es aproximadamente de 4 a 5 horas, y para el segundo semestre es de 4.5 a 5.5 horas. Hay que tener en cuenta que en la referencia [4], se especifica que parte de los datos de radiación solar son establecidos en aproximaciones basadas en regiones cercanas y en datos estadísticos descritos en los apéndices del Atlas de Radiación Solar en Colombia.

La presente investigación tiene por objetivo describir el comportamiento de la radiación solar, particularmente en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia, la cual se analiza por medio de una base de datos procedente de la Estación Meteorológica Automática Satelital, tipo urbana, presente en la Universidad Francisco de Paula Santander y administrada por el IDEAM. Esta base de datos registra como punto de inicio de la toma de datos de radiación solar global e insolación, la fecha del 28 de septiembre de 2005; y como punto final de toma de datos, el 31 de diciembre de 2014, fechas en las cuales se presentaron diferentes tipos de

fenómenos meteorológicos como el Niño-Oscilación del Sur (ENSO).

Dicho fenómeno consiste en un conjunto de fuertes variaciones atmosféricas y oceánicas que ocurre en escalas de tiempo que van desde meses hasta varios años; dentro de este fenómeno se pueden encontrar dos fases extremas: El Niño (fase cálida) y La Niña (fase fría) [8]. Siendo así que el fenómeno del niño tuvo una intensidad moderada para finales del año 2006 y se prolongó durante los primeros meses del 2007; el fenómeno de la niña tuvo presencia moderadamente fuerte durante los meses finales de 2007 y los primeros meses de 2008 [9]. Cabe destacar que estos fenómenos presentan una relación directa con las variables de radiación solar global e insolación presentes en la ciudad, debido a que su presencia contribuye al aumento o disminución de diferentes tipos de elementos en la atmósfera, los cuales permiten el paso de una mayor o menor radiación solar a la superficie terrestre.

En este trabajo también se examinan los potenciales de radiación por medio de análisis estadísticos, con el fin de determinar durante cuáles meses del año se presenta mayor o menor radiación solar global, establecer el promedio de horas solar pico que tiene la ciudad y dar a conocer el comportamiento de la radiación solar global de esta por medio de gráficas bidimensionales y tridimensionales, en donde se muestran los valores máximos, mínimos y promedios de esta variable.

Debido a la gran cantidad de datos de radiación solar presentes en la base de datos analizada, se hizo un uso estratégico de herramientas estadísticas, como son los gráficos de cajas para resumir la cantidad de valores que se midieron de la variable radiación solar global para determinadas horas del día, en determinados meses del año, y se generaron gráficas que posteriormente fueron analizadas para emitir algunos juicios y encontrar conclusiones en lo referente a la radiación solar en la ciudad de Cúcuta.

El artículo se distribuye de la siguiente forma: en la sección de metodología se mencionan las herramientas computacionales, los materiales, como bases de datos, y métodos, como el análisis estadístico, que fueron utilizados para el desarrollo de la investigación; luego se encuentran los resultados expresados en forma de gráficas, de las cuales se emiten algunas apreciaciones de los datos y su relación con variables físicas presentes en la ciudad; por último, se presentan las conclusiones en donde se muestran valoraciones acerca de los parámetros que gobiernan la radiación solar, como la radiación solar global, la insolación y las horas solar pico.

II. METODOLOGÍA

El procedimiento metodológico empleado en la presente investigación consta de dos etapas; en la primera se recolectan los datos de la variable radiación solar global; la segunda es el análisis por medio de software R y Matlab.

En la primera etapa o recolección de datos, se utiliza la estación meteorológica del IDEAM, ubicada en la Universidad Francisco de Paula Santander, la cual puede ser encontrada en las siguientes coordenadas geográficas: latitud

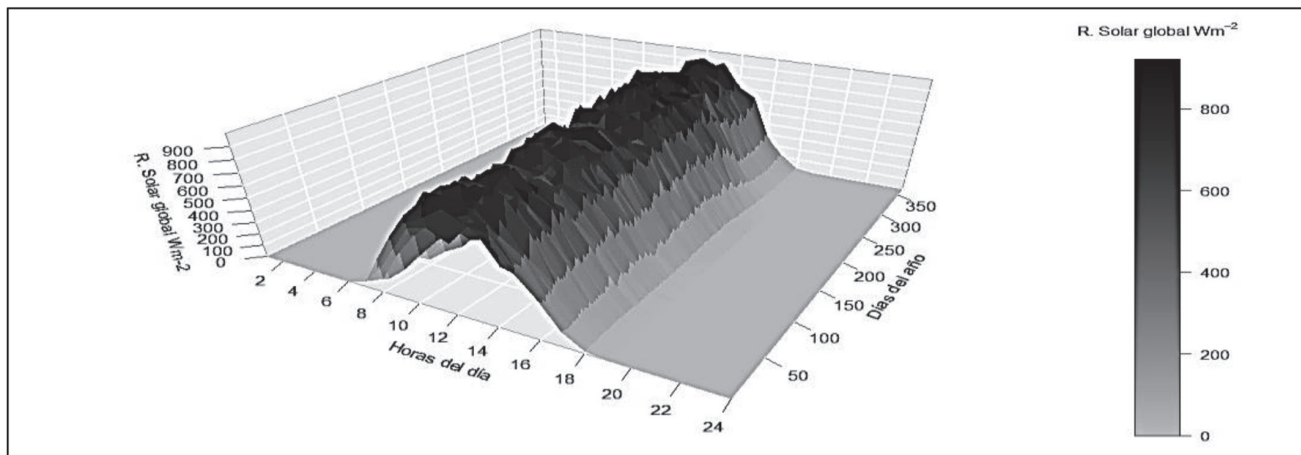


Fig. 1. Promedio de la radiación solar global presente en la ciudad de Cúcuta durante un año.

de $7,90^\circ$, longitud de $-72,49^\circ$ y altitud de 311 m. Los datos fueron tomados en un intervalo de tiempo con una hora de diferencia, para un total de 9 años entre las fechas del 28 de septiembre de 2005 y el 31 de diciembre del 2014. Se debe aclarar que la base de datos no es continua, debido a que en un 4.4% del total de los días analizados no existió información, por lo cual, solo los valores registrados se usaron para el presente estudio.

Para la etapa de análisis de los datos registrados se emplearon dos programas. El primero, con el que se realizaron todas las gráficas, es el software R Studio Version 1.0.136 – © 2009-2016 RStudio, Inc. Las librerías que se usaron de este programa son las citadas a continuación: Librería plot3D, creada por Karline Soetaert, con la cual se realizó la gráfica tridimensional de la Fig 1.

Librería XLConnect, creada por Mirai Solutions GmbH y Martin Studer. Con ella se importaron los datos desde el programa Microsoft Excel a la suite de RStudio. El segundo programa usado fue el Software matemático Matlab en su versión 7.12.0.635 (R2011a); de él se utilizó la herramienta Curve Fitting Toolbox 3.1, Copyright 2001-2011 The MathWorks Inc, con la cual se halló la ecuación (1) que se presenta al final de la sección III y se estimaron los parámetros estadísticos de la regresión, como el SSE, R-square, el Adjusted R-square y el RMSE.

III. RESULTADOS

Los datos de radiación solar para determinados sitios suelen tomarse por medio del uso de instrumentos, entre los cuales se encuentra el piranómetro. Este dispositivo arroja un valor instantáneo de la radiación solar global y en las estaciones meteorológicas del IDEAM se registran estos datos con una frecuencia horaria; debido a que los datos de radiación solar fueron tomados durante un periodo de nueve años, estos se convierten en una gran cantidad de información cuyo procesamiento y análisis, sin el uso de las computadoras y técnicas estadísticas, se convertiría en una tarea compleja debido a la gran cantidad de datos de radiación solar global, esta se presenta en forma resumida en la Fig. 1, la cual promedia en un año, todos los datos

dentro de los nueve años en que se tomaron las muestras; además, representa la información correspondiente a los 365 días del año y la expresa para cada hora del día; en [10] se puede encontrar una gráfica similar en donde los autores dan a conocer una muestra de la radiación global de la región de Lombardía, en Italia. También, a estas tres dimensiones que constituyen la gráfica (radiación solar global, horas del día y días del año), se agrega una paleta en escala de grises que permite discriminar visualmente si la radiación es alta o baja.

En la Fig. 1, se puede observar que la ciudad maneja valores de radiación superiores a los 600 W m^{-2} entre las 10:00 am y las 02:00 pm, con algunos valores que superan los 900 W m^{-2} ; también se puede apreciar que para horas inferiores a las 08:00 am y superiores a las 04:00 pm, la radiación solar en términos de radiación solar global, es inferior a un valor de 400 W m^{-2} , y que las regiones entre las 08:00 am – 10:00 am y 02:00 pm – 04:00 pm, son regiones de transición en donde la radiación fluctúa con una variación casi lineal de un valor de 400 W m^{-2} a valores superiores a los 600 W m^{-2} .

Más detalles de los valores de la radiación solar en la ciudad de Cúcuta, se pueden encontrar en la Fig. 2; los valores promedio de la radiación solar global en un solo día del año en donde se presenta solo el valor que se obtuvo al promediar todos los datos de los nueve años, y además de ello, se da el valor de la desviación estándar. En esta figura se aprecia que entre las 11:00 am y la 01:00 pm la radiación solar promedio está alrededor de los 700 W m^{-2} y la desviación estándar supera los 230 W m^{-2} .

El valor de la desviación estándar representa qué tan dispersos están distribuidos los valores alrededor de la media; esto en términos de energía solar, es la representación de la gran diferencia de radiación solar global con respecto al valor medio de los datos, lo que a su vez indica que para una baja desviación estándar todos los datos tienen aproximadamente el mismo valor, y que para una alta desviación estándar, como es el caso de la radiación solar global en las horas del mediodía, existen muchos valores que pueden diferir en gran manera de la media y que pueden tomar valores superiores a los 1000 W m^{-2} , como valores inferiores a los 400 W m^{-2} .

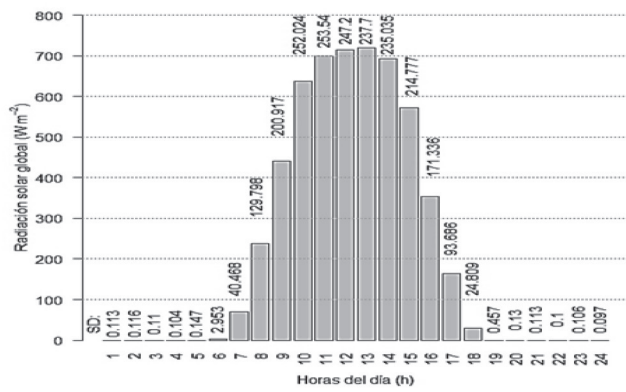


Fig. 2. Promedio diario de la radiación solar global.

En la Fig. 2 se puede apreciar que el valor de la radiación solar global para un intervalo cerrado de tiempo entre las 7:00 pm y las 6:00 am se puede aproximar a cero, siendo así que la radiación en estas horas del día se encuentra entre 0 y 0.667 Wm⁻², con un nivel de confianza del 95%; y que para el intervalo cerrado de tiempo de 7:00 am a 6:00 pm existe una alta desviación estándar, en donde la radiación solar puede variar entre 276 Wm⁻² y 612 Wm⁻², con un nivel de confianza del 95%, según el análisis realizado con la prueba t-student.

Debido a la alta desviación estándar presente en los valores de la radiación solar global que se resumieron en la Fig. 2, se plantea realizar un análisis mensual de la radiación solar global, con el objetivo de detectar patrones de radiación y algunos otros atributos de la radiación solar en la ciudad, que no se puedan apreciar fácilmente en Fig. 1 y Fig. 2.

En la Fig. 3 se puede apreciar un resumen de los valores de radiación solar global para los seis primeros meses del año; este presenta seis gráficas pertenecientes al rango entre enero y junio, las cuales tienen dentro de ellas 24 diagramas de caja correspondientes a las 24 horas del día.

Un diagrama de caja describe la distribución de una variable continua por medio de su resumen de cinco números: el mínimo, el primer cuartil, la mediana o segundo cuartil, el tercer cuartil y el máximo; la gráfica también muestra observaciones o datos que pueden ser atípicos (valores extremos muy alejados del rango intercuartil)[11]. Este diagrama de caja proporciona una visión espacial del conjunto de datos; en él se puede apreciar una caja rectangular que forma el núcleo del gráfico, el cual abarca un 50% de los datos; este diagrama proporciona: la mediana, la dispersión, la simetría central, la simetría de los extremos, el apuntamiento y los datos anómalos [12].

Generalmente, los diagramas de caja no hacen ninguna representación del valor de la media del conjunto de datos, sin embargo, en la Fig. 3 se enfatiza sobre la media, la cual es representada bajo la forma de un rombo gris presente en cada diagrama de caja; esta indica hacia donde están dirigidos todos los valores de la variable radiación solar global; se puede ver en el caso de los seis primeros meses, que el valor de la media no difiere en gran medida del valor de la mediana.

Realizando un análisis a los datos presentes en la Fig. 3, se puede ver que para los primeros seis meses del año, la gran mayoría de valores de radiación solar global (más del 75% que se presenta antes del tercer cuartil) no alcanza

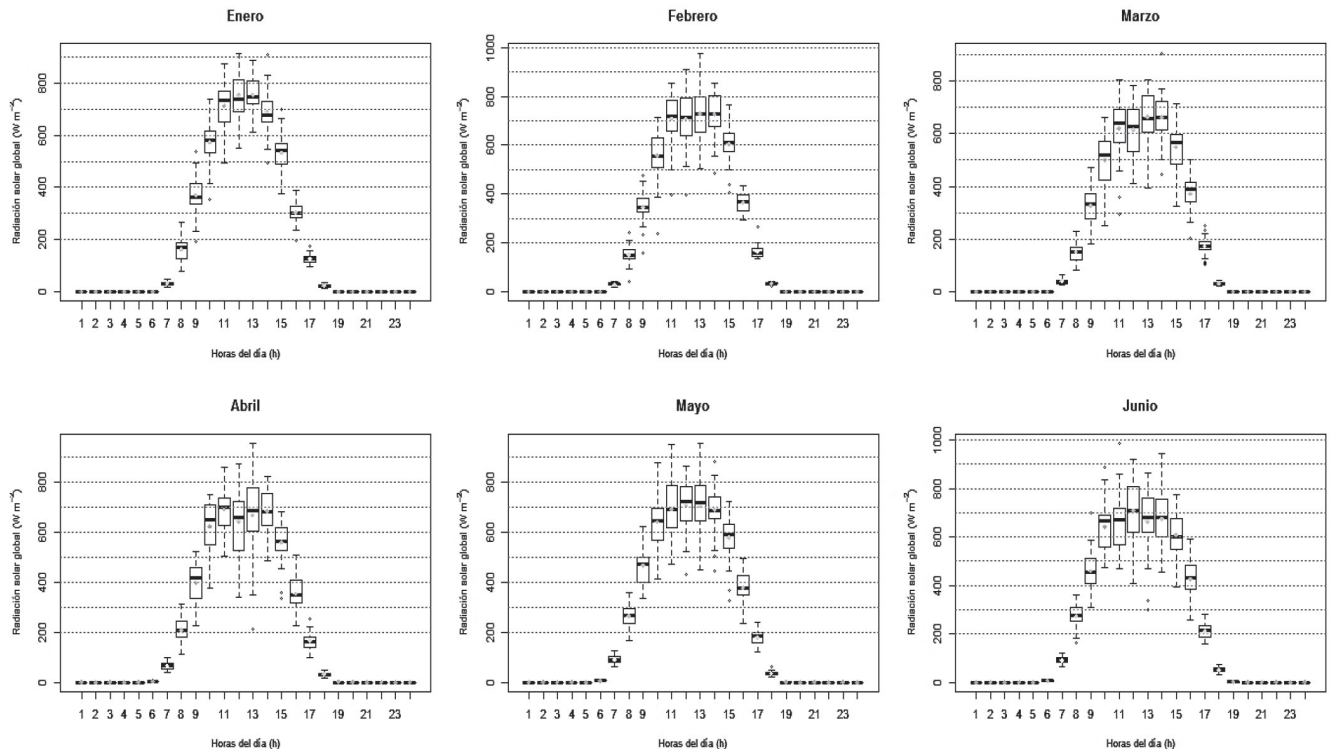


Fig. 3. Resumen de la Radiación solar global para los seis primeros meses del año en la ciudad de Cúcuta.

a superar el valor de los 800 W m^{-2} ; pero algunos meses como enero, abril y mayo, presentan valores superiores a los 1000 W m^{-2} . También se puede apreciar que para la distribución de los datos en las horas del mediodía, existe bastante dispersión, ya que para la mayoría de los casos esta puede variar en un valor de 300 W m^{-2} en las horas de 12:00 am – 01:00 pm. Como un ejemplo de esto se tiene que a la hora 12:00 am en el mes de Junio, el valor de la radiación solar global varía desde un valor por debajo de 450 W m^{-2} , hasta un valor por encima de 900 W m^{-2} .

En todos los meses analizados en la Fig. 3, por medio de diagramas de caja, se puede apreciar que no se encuentra gran cantidad de datos atípicos, esto indica que para todos los primeros seis meses del año, los valores de radiación solar global tienden a tener la misma distribución, sin presentar variaciones excesivas.

Analizados los datos correspondientes a los seis primeros meses del año, se procede a realizar un análisis del mismo tipo para los meses restantes. Para ello, en la Fig. 4 se presentan nuevamente diagramas de caja y rombos grises con los valores promedio de los datos de radiación solar global; esta figura muestra el comportamiento de la radiación solar global y su distribución a lo largo de cada una de las 24 horas del día, durante un periodo de seis meses, correspondiente a los últimos meses del año.

Comparando la Fig. 3 con la Fig. 4 se puede apreciar que los valores de radiación solar global en el segundo semestre del año son superiores a los del primer semestre, alcanzando en algunos meses, valores superiores a los 1000 W m^{-2} .

Realizando un análisis de la Fig. 4, se puede ver que el mes de agosto presenta más variación que los datos de otros meses; en la Fig. 4 también se puede apreciar que los meses de septiembre, octubre y noviembre cuentan con la mayor intensidad de radiación solar global durante todo el año; esto

se evidencia en los diagramas de caja, donde más del 25% de sus valores sobrepasan el nivel de 800 W m^{-2} .

En la Fig. 4, así como en la Fig. 3, se observa que tampoco existen gran cantidad de valores atípicos, lo que indica nuevamente que los valores tienden a ubicarse dentro de las distribuciones existentes y representadas en estas dos figuras.

Cálculo de las horas solar pico

Las horas solares pico también llamadas horas de Sol, son el número equivalente de horas por día, donde el promedio de la radiación solar global es 1000 W m^{-2} . Las horas de Sol se pueden interpretar como si la energía recibida durante todo el día fuera la misma que se recibiera si la radiación solar global hubiera sido constantemente 1000 W m^{-2} durante un periodo de tiempo igual a las horas pico de Sol[3]. Estas también se pueden comprender usando el ejemplo de la ciudad de Valledupar, la cual tiene alrededor de 6.0 horas pico[9]; como si el Sol saliera en un periodo de tiempo desde las 09:00 am y se escondiera a las 03:00 pm con una intensidad igual a 1000 W m^{-2} , durante ese periodo de tiempo.

Para la ciudad de Cúcuta se realizó un análisis de la curva de la radiación solar global presentada en la Fig. 2, que indica el promedio diario de la radiación solar global en esta ciudad; en este caso, por medio del área bajo la curva se puede encontrar de una manera indirecta el valor de las horas solar pico, el cual tiene un valor de 5.335 h; cabe resaltar que dicho valor fue hallado promediando todos los días considerados en la base de datos, la cual está compuesta por nueve años. Además, comparando este resultado con el hallado en [9], el cual es 5.329 h, se puede ver que existe un error cuadrático medio de 0.35 %.

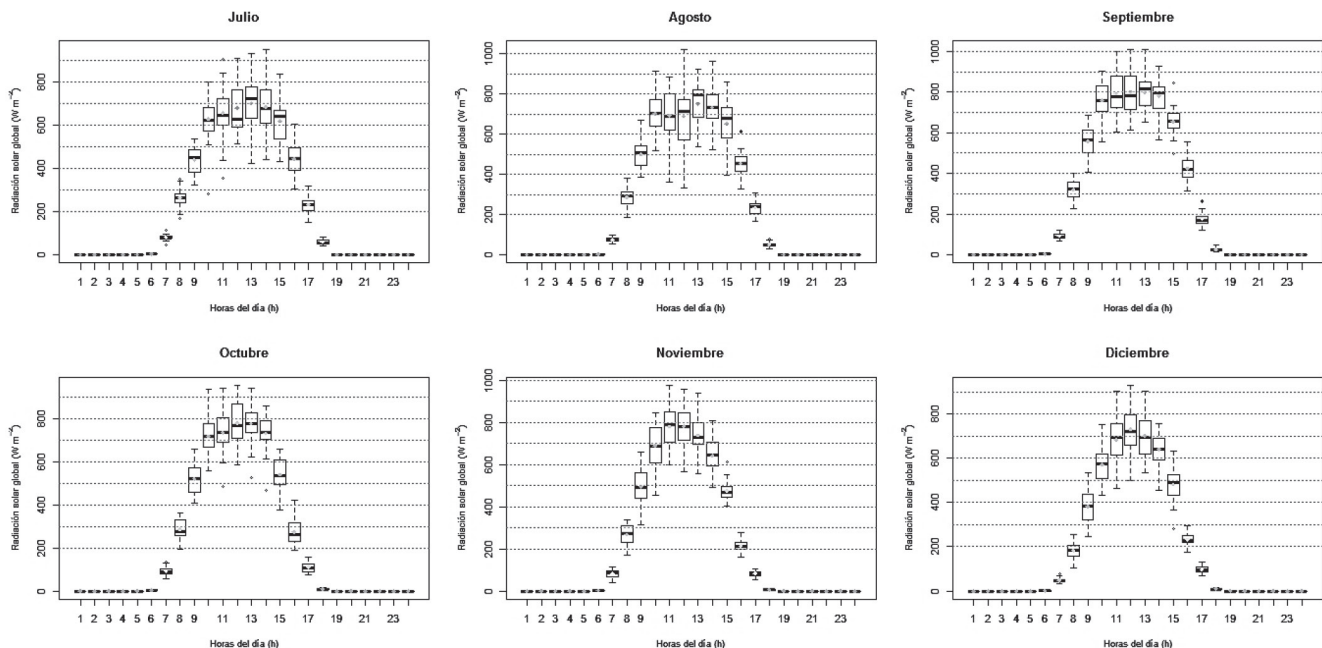


Fig. 4. Resumen de la radiación solar global para los seis últimos meses del año en la ciudad de Cúcuta.

Para una mejor descripción de las horas solar pico en la ciudad de Cúcuta, se realizó un estudio de estas para cada mes del año y los resultados se presentan en la Tabla I.

TABLA I
CANTIDAD DE HORAS SOLAR PICO PARA CADA MES DEL AÑO

Mes	Hora Solar Pico (h)
Enero	5.036
Febrero	5.129
Marzo	4.709
Abril	5.092
Mayo	5.429
Junio	5.471
Julio	5.483
Agosto	5.810
Septiembre	6.179
Octubre	5.580
Noviembre	5.253
Diciembre	4.761

En la Tabla I se puede apreciar que los meses con menos cantidad de horas solar pico son los de marzo y diciembre, y que los meses con mayor cantidad de horas solar pico son, en primer lugar Septiembre, y en segundo lugar Agosto.

Ecuación para determinar la radiación solar global presente a cualquier hora del día

La ecuación (1) se ha encontrado para predecir de forma directa, el valor de la radiación solar global en determinada hora del día. Esta ecuación tiene como única variable, el valor de la hora en la cual se desea saber la radiación solar global; se debe aclarar que (1) es hallada a partir de los valores presentes en la Fig. 2, que se basa en el promedio diario de nueve años de la radiación solar global.

$$f(h) = a_1 * e^{-\left(\frac{h-b_1}{c_1}\right)^2} + a_2 * e^{-\left(\frac{h-b_2}{c_2}\right)^2} + a_3 * e^{-\left(\frac{h-b_3}{c_3}\right)^2} + a_4 * e^{-\left(\frac{h-b_4}{c_4}\right)^2} + a_5 * e^{-\left(\frac{h-b_5}{c_5}\right)^2} \quad (1)$$

En (1) la variable independiente se representa por la letra h , las demás variables se han definido como coeficientes de la ecuación.

A continuación, se dan a conocer los coeficientes de la ecuación (1).

$$\begin{aligned} a_1 &= 4.816E14 \\ b_1 &= -172.9 \\ c_1 &= 30.68 \\ a_2 &= 674.6 \\ b_2 &= 14 \\ c_2 &= 2.513 \\ a_3 &= 52.9 \\ b_3 &= 11.74 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_3 &= 1.211 \\ a_4 &= -29.51 \\ b_4 &= 10.3 \\ c_4 &= 5.619 \\ a_5 &= 602.7 \\ b_5 &= 10.2 \\ c_5 &= 2.344 \end{aligned}$$

Los parámetros estadísticos que se obtuvieron, se muestran a continuación:

$$\begin{aligned} \text{SSE: } &1042 \\ \text{R-square: } &0.9995 \\ \text{Adjusted R-square: } &0.9986 \\ \text{RMSE: } &10.76 \end{aligned}$$

Los parámetros SSE, R-square, Adjusted R-square y RMSE son parámetros estadísticos que en este caso se aplican para determinar el grado de precisión que tiene una regresión. Para más información acerca de estos, se puede consultar en [13].

En la Fig. 5 se presenta una representación gráfica de (1) y los datos de radiación promedio por hora de la Fig. 2.

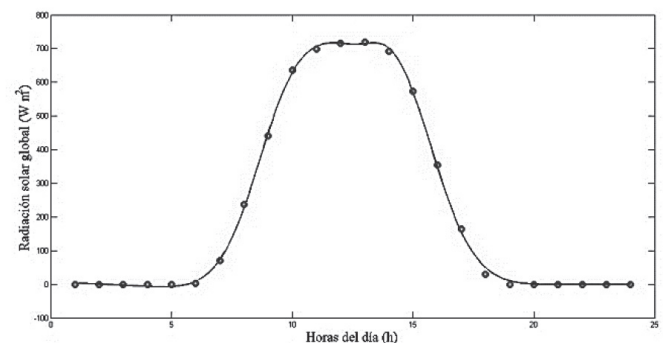


Fig. 5. Representación gráfica de (1).

IV. CONCLUSIÓN

Con la presente investigación se puede inferir que la ciudad de Cúcuta tiene un gran potencial de radiación solar, contando con una insolación media de 5.335 kWh m^{-2} dia^{-1} (bajo una distribución normal), comparado con el promedio de radiación solar de Colombia que es de 4,5 kWh m^{-2} dia^{-1} [14], y el promedio mundial de 3,9 kWh m^{-2} dia^{-1} [14]. Además, se pudo observar en las gráficas y en la información suministrada en los resultados, que la radiación solar global en la ciudad de Cúcuta permite hacer una explotación energética de este potencial solar a través del aprovechamiento por energía térmica y por fotovoltaica.

A través de los resultados de la presente investigación, se pueden realizar estudios de diseño, dimensionamiento, implementación de sistemas fotovoltaicos autónomos, conectados a la red y sistemas solares térmicos, porque a partir de estos se puede estimar la producción energética.

La radiación solar en la ciudad de Cúcuta tiene grandes variaciones; por ejemplo, considerando las horas de mediodía en las cuales hay mayor intensidad de radiación solar global, hay días en los que por elementos en la atmósfera la radiación es inferior a 200 W m^{-2} ; por otra parte, existen días en los

que se encuentran radiaciones superiores a los 1000 W m^{-2} . Sin embargo, los valores de radiación, en esta franja del día, tienden a ubicarse en una media de 715.168 W m^{-2} .

Por medio de los análisis a la base de datos de radiación solar global suministrada por el IDEAM, se determinó que para la ciudad de Cúcuta existe un promedio de 5.335 horas solar pico por día, y que encuentra sus valores máximos en los meses de agosto y septiembre, y sus valores más bajos para los meses de marzo y diciembre, pero que también depende de los fenómenos meteorológicos que se presenten.

REFERENCIAS

- [1] Hulstrom, R. *Solar Resources*. MIT Press, 1989.
- [2] National Aeronautics and Space Administration (NASA), "Solar Radiation and the Earth System." [Online]. Available: <http://education.gsfc.nasa.gov/experimental/July61999siteupdate/inv99Project.Site/Pages/science-briefs/ed-stickler/ed-irradiance.html>. [Accessed: 24-Jan-2017].
- [3] Balfour, J. R., Shaw, M. and Jarosek, S. *Introduction to Photovoltaics*. Jones & Bartlett Publishers, 213p. 2011.
- [4] Leal, F. A. and Hernandez Cely, M. M. "Study of wind and solar potential in Cucuta, Norte de Santander," *Rev. Colomb. Tecnol. Av.* vol. 2, pp. 27–33, 2013.
- [5] Che, H. Z., Shi, G. Y., Zhang, X. Y., Arimoto, R., Zhao, J. Q., Xu, L., Wang, B. and Chen, Z. H. "Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961–2000," *Geophys. Res. Lett.* vol. 32, pp. 1–5, 2005.
- [6] Omran, M. A. "Analysis of solar radiation over Egypt," *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 67, no. 3–4, pp. 225–240, Dec. 2000.
- [7] Mejía, J. S., Mosquera, L.A. and Betancourth, J. "Síntesis dimensional de un mecanismo esférico para la orientación de paneles solares," *Entre Cienc. e Ing.*, Vol 11, no. 22, pp. 43–50, 2017.
- [8] Poveda Jaramillo, G. "Retroalimentación Dinámica entre el Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur y la Hidrología de Colombia," Tesis doctoral, Facultad de Minas, Universidad Nacional, nov. 1998.
- [9] International Research Institute for Climate and Society, "IRI ENSO Forecast." [Online]. Available: <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/2015-november-quick-look/> [Accessed: 12-Dic-2016].
- [10] Ferrari, S., Lazzaroni, M., Piuri, V., Salman, A., Cristaldi, L. and Faifer, M. "Computational Intelligence Models for Solar Radiation Prediction." *2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Minneapolis, MN, 2013, pp. 757-762. doi: 10.1109/I2MTC.2013.6555517
- [11] Kabacoff, R. "R in Action: Data Analysis and Graphics with R". Manning, 474p., 2015.
- [12] Sabadías, A. V. "Estadística descriptiva e inferencial". Univ de Castilla La Mancha, Colección Ciencia y Técnica, 576p.1995.
- [13] MathWorks, "Evaluating Goodness of Fit - MATLAB & Simulink." [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/curvefit/evaluating-goodness-of-fit.html?requestedDomain=www.mathworks.com>. [Accessed: 13-Feb-2017].
- [14] UPME. Unidad de Planeación Minero Energética, "Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia." 2015 [Online]. Available: http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf. [Accessed: 21-Ene-2017].



Sergio Basilio Sepúlveda Mora. Nació en San José de Cúcuta, el 11 de octubre de 1984. Ingeniero electrónico de la Universidad Francisco de Paula Santander en la ciudad de Cúcuta, Colombia, en junio de 2007. Master of Science in Electrical and Computer Engineering de la Universidad de Delaware en Newark, DE, Estados Unidos, en mayo de 2012. Se desempeñó como Profesor Catedrático de la Universidad de Pamplona, en Villa del Rosario, Norte de Santander, Colombia, entre el 2009 y el 2010. Fue Joven

Investigador e Innovador para Colciencias y la Universidad Francisco de Paula Santander en Cúcuta, entre el 2008 y el 2010. Obtuvo una beca Fulbright de posgrado para las Regiones desde el 2010 hasta el 2012. Actualmente se desempeña como profesor tiempo completo e investigador en la Universidad Francisco de Paula Santander. Integrante activo del Grupo de Investigación y Desarrollo en Microelectrónica Aplicada (GIDMA) desde octubre de 2013. Sus intereses en investigación son los sistemas de control, sistemas embebidos, redes de sensores inalámbricas y energía solar fotovoltaica. Consejero del capítulo PES de la rama estudiantil IEEE en la Universidad Francisco de Paula Santander, desde el 2014.



(UFPS). Sus campos de interés son la microelectrónica aplicada y la energía solar fotovoltaica.



Wilmer Contreras Sepúlveda. Nació en San José de Cúcuta, Colombia, el 31 de enero de 1994. Ingeniero electrónico de la Universidad Francisco de Paula Santander (UFPS) en la ciudad de Cúcuta, Colombia, en septiembre del 2017. Actualmente estudia una maestría en Telecomunicaciones en la Universidad de Los Andes de Venezuela. Perteneció al Semillero de Investigación y Desarrollo de Microelectrónica Aplicada (SIDMA) desde el 2013 hasta el 2016 en la UFPS. Trabaja en su proyecto de grado enfocado en la energía solar fotovoltaica en el Grupo de Investigación y Desarrollo de Microelectrónica Aplicada (GIDMA) en la UFPS. Sus campos de interés son la microelectrónica aplicada, la energía solar fotovoltaica y las telecomunicaciones.