

Evaluación del potencial solar y eólico del campus central de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga, Colombia

Solar and wind potential assessment in the central campus of Universidad Industrial de Santander and Bucaramanga city, Colombia

PEDRO PABLO VERGARA-BARRIOS

Ingeniero Electrónico

*Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander
Email: pvergarabarríos@gmail.com
Bucaramanga, Colombia*

JUAN MANUEL REY-LÓPEZ

Ingeniero Electricista

*Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander
Email: juanmrey@uis.edu.co
Bucaramanga, Colombia*

GERMÁN ALFONSO OSMA-PINTO

Magíster en Ingeniería Eléctrica

*Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander
Email: german.osma@gmail.com
Bucaramanga, Colombia*

GABRIEL ORDÓÑEZ-PLATA

Doctor Ingeniero Industrial

*Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander
Email: gaby@uis.edu.co
Bucaramanga, Colombia*

Fecha de recibido: 21/01/2014

Fecha de aceptado: 15/06/2014

Forma de citar: VERGARA, Pedro, et, al., Evaluación del potencial solar y eólico del campus central de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga, Colombia. Rev.UIS.Ingenierías,2014,vol13,n.2,p.p 49-57.

RESUMEN

En este artículo se presenta un estudio estadístico del potencial solar y eólico en el campus central de la Universidad Industrial de Santander (UIS) y la ciudad de Bucaramanga, con el fin de obtener parámetros característicos que permitan evaluar el recurso energético en la zona. Para ello, se consideraron mediciones horarias de variables como radiación solar, temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento para los años 2010, 2011 y 2012, en cuatro puntos estratégicos de la ciudad. Finalmente, se presenta un análisis sobre los resultados obtenidos y la viabilidad energética de implementar sistemas de generación fotovoltaica y eólica en las zonas de estudio.

PALABRAS CLAVE: Evaluación del potencial energético, energía solar, energía eólica, Bucaramanga.

ABSTRACT

In this paper, a statistical study of solar and wind potential is presented, in order to estimate the characteristic parameters to assess the energy resource in the central campus of *Universidad Industrial de Santander* (UIS) and Bucaramanga, Colombia. To do this, solar radiation, ambient temperature and wind speed, were hourly measured in four strategic zones of the city, for the years 2010, 2011 and 2012. Finally, the energy feasibility for the installation of photovoltaic and wind power generation systems and an analysis of the results are presented.

KEYWORDS: Energy potential assessment, solar energy, wind energy, Bucaramanga.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio del potencial de los recursos eólico y solar es necesario en el proceso de dimensionamiento, diseño y evaluación de la viabilidad de proyectos relacionados a este tipo de energías. Debido a esto, una de las barreras para la penetración y masificación de las energías renovables en el país corresponde a la limitada disponibilidad y exactitud de la información relacionada con el recurso energético renovable, especialmente en las ciudades capitales (Rey, Vergara, Osma & Ordóñez, 2013).

En este trabajo se presenta un estudio estadístico del potencial solar y eólico para la ciudad de Bucaramanga y el campus central de la UIS. Para esto, se analizaron datos de cuatro estaciones meteorológicas ubicadas en zonas estratégicas de la ciudad, y se modelaron los recursos energéticos con el fin de obtener los parámetros característicos del comportamiento del viento y la radiación solar. La exactitud de las mediciones, hace de los parámetros característicos calculados, una fuente fiable para evaluar el recurso en estas zonas, por lo que se incluye un análisis de la viabilidad energética de implementar sistemas de generación fotovoltaica y eólica en las zonas de estudio.

2. CLIMA Y GEOGRAFÍA DE BUCARAMANGA

Bucaramanga está ubicada geográficamente en $7^{\circ} 08'$ de latitud norte y $73^{\circ} 08'$ de longitud oeste. Su clima está clasificado por la altitud y se divide en zonas con clima cálido seco y templado seco. Tiene una temperatura promedio de 24°C y una máxima promedio de $30,9^{\circ}\text{C}$, aunque entre 6 a.m. y 6 p.m. la temperatura promedio es cercana a 26°C . Adicionalmente, la ciudad se caracteriza por una precipitación anual promedio de 1.279 mm (Lazar & Eder, 2001)

En Bucaramanga, los vientos proceden mayormente de las direcciones norte y nororiente, con velocidades

promedio menores a los 2 m/s, mientras que en las zonas aledañas al Aeropuerto Internacional Palonegro (ubicado en el municipio de Lebrija, al occidente de la ciudad) los vientos proceden del noroccidente y presentan velocidades un poco más altas (Lazar & Eder, 2001). Por otro lado, de acuerdo al Atlas de Radiación Solar de Colombia (UPME-IDEAM, 2005), Bucaramanga tiene una radiación diaria promedio entre 4,5 y 5,0 kWh/m², con un comportamiento mayoritariamente estable durante el año.

3. MODELADO Y ESTUDIO DEL RECURSO EÓLICO

La estimación de los parámetros característicos del comportamiento del viento, se considera el primer paso para evaluar un proyecto de generación de energía eólica a través del cálculo del potencial eólico en la zona (Kumaraswamy, Keshavan, & Jangamshetti, 2009). La velocidad y dirección del viento son variables aleatorias, difíciles de modelar y predecir, aunque pueden ser descritas mediante funciones de distribución de probabilidad (Ucar & Balo, 2010), las cuales permiten caracterizar sus comportamientos en una zona específica dependiendo de la fiabilidad de los registros de medición y el ajuste del modelado.

El análisis de los datos del viento en esta investigación se realiza mediante la función de distribución (FDP) de Weibull, la cual está dada por la Ecuación (1). Según (Ahmad, 2010), la FDP de Weibull corresponde a la función de distribución que mejor aproxima mediciones experimentales del viento, considerada como una herramienta simple, de fácil análisis y de amplio uso (Ouammi, Dagdougui, Sacile, & Mimmet, 2010). Además, otras distribuciones utilizadas para modelar el viento, como la FDP de Rayleigh, corresponden a un caso específico de la FDP de Weibull (El Alimi, Maatallah, Dahmouni, & Ben Nasrallah, 2012).

La FDP de Weibull depende de dos parámetros: k , parámetro de forma y C , parámetro de escala. El

parámetro de forma es un indicador del ancho de la función de distribución, zonas con valores de k altos, corresponden a lugares descritos por funciones de distribución estrechas, lo que significa que la velocidad del viento se encuentra dentro de un intervalo estrecho de valores. Por otro lado, el parámetro C es un indicador de la cantidad de viento presente en el lugar de estudio (El Alimi et al., 2012).

$$f(v,k,C) = \frac{k}{C} \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^k} \quad (1)$$

Para la estimación de los parámetros se utiliza el método SEM (*Statistic Estimation Method*) descrito por (Duan, Chen, & Hengchang, 2011). La selección de este método se debe a su alta precisión y simplicidad. De acuerdo con (Akdag & Dinler, 2009), esto permite reducir el tiempo de cómputo comparado con otros métodos de estimación de parámetros usados en la literatura, como el LSM (*Least Square Method*) o el MEAM (*Minimum Error Approximation Method*), cuando se deben procesar datos de mediciones de periodos superiores a un año (Kumaraswamy, Keshavan, & Ravikiran, 2011).

Según el método SEM, los parámetros k y C , están dados por las ecuaciones (2) y (3), respectivamente, donde μ corresponde a la velocidad media en m/s , σ a la desviación estándar en m/s , y $\Gamma(t)$ a la función Gamma.

$$k = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^{-1.086} \quad (2)$$

$$C = \frac{\mu}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (3)$$

Para determinar el nivel de correlación de la función de distribución y las variables medidas, se hace uso del parámetro R^2 , denominado factor de correlación, definido en la Ecuación (4) (Akdag & Dinler, 2009).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (f_i(\bar{v}_i) - f_i)^2}{\sum_{i=1}^N (f_i(\bar{v}_i) - \bar{f}_i(\bar{v}_i))^2} \quad (4)$$

En esta expresión, N corresponde al número total de intervalos discretos para el histograma de frecuencias de la velocidad del viento, $f_i(\bar{v}_i)$ corresponde a las frecuencias medidas para cada intervalo, f_i es la frecuencia obtenida mediante la función de distribución de Weibull y representa al promedio de $f_i(\bar{v}_i)$. El modelo describirá con mayor precisión los datos si R^2 es cercano a uno.

3.1 Perfil del viento respecto a la altura

Para calcular el perfil vertical del viento se utiliza la Ley de Hellmann. Ésta establece una relación experimental entre la velocidad del viento v_1 a una altura h_1 , con respecto a la velocidad v_2 a una altura h_2 , como lo muestra la Ecuación (5), siendo α , el coeficiente de Hellmann.

$$v_2 = v_1 \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha \quad (5)$$

Cuando no se dispone de mediciones a dos alturas diferentes para calcular α de forma experimental, es posible estimar su valor a través de la Ecuación (6), que se obtiene de la relación que existe entre los parámetros de la función de distribución de Weibull para dos alturas diferentes (Ucar & Baló, 2010). Donde C_1 es el coeficiente de escala de la función de distribución de Weibull para los datos medidos a la altura h_1 , con la restricción que h_1 debe ser mayor o igual a 10 m.

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088 \ln(C_1)}{1 - 0.088 \ln(h_1/10)} \quad (6)$$

3.2 Densidad de potencia eólica

La potencia del viento $P(v)$, es proporcional al cubo de la velocidad v , al área de barrido de las aspas del aerogenerador A y a la densidad del aire ρ , como se muestra en la Ecuación (7). La densidad de potencia del viento, por sus siglas en inglés (*Wind Power Density*), se utiliza para clasificar las zonas de acuerdo a su potencial, y se obtiene dividiendo la potencia del viento por el área, como lo muestra la Ecuación (8).

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho A v^3 (W) \quad (7)$$

$$WPD = \frac{1}{2} \rho v^3 (W/m^2) \quad (8)$$

Para la estimación de la densidad de potencia a partir de los datos meteorológicos registrados, se utiliza la Ecuación (9) (Ilinca, McCarthy, Chaumel, & Rétimeau, 2003) en la que se suman las contribuciones porcentuales para intervalos propuestos de velocidades. Siendo N el número total de intervalos y $f_i(\bar{v}_i)$ corresponde a las frecuencias de cada intervalo con velocidad media \bar{v}_i .

$$WPD = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^N f_i(\bar{v}_i) \bar{v}_i^3 \quad (9)$$

3.3 Clasificación del recurso eólico

De acuerdo al Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), el recurso eólico puede clasificarse de forma numérica desde el nivel más bajo (*Wind Power Class 1*) hasta el de más alto (*Wind Power Class 7*), dependiendo del (Elliott, Holladay, Barche, Foote, & Sandusky, 1987).

Asociada a cada clase, existe un rango de densidades de potencia y de velocidad media a una altura de 10 m (altura estándar), y a 50 m (Ilinca et al., 2003). Según el DOE, las zonas mayores o iguales a la Clase 4 se consideran adecuadas para instalar generación a gran y pequeña escala. Las zonas con Clase 3 son adecuadas para el desarrollo de energía eólica con altas torres. Las zonas con Clase 2 se consideran marginales para el desarrollo de estos proyectos y las de Clase 1 no son áreas adecuadas para este tipo de generadores (Ouammi et al., 2010).

3.4 Energía eólica estimada anual

Para estimar la energía que se podría obtener de un aerogenerador al ser ubicado en determinada zona de estudio, debe hacerse uso de la Ecuación (10) (Ouammi et al., 2010). Esta expresión permite obtener la densidad de energía estimada E_{wt} en kWh/m² para un número T de horas de medición en función del histograma de frecuencia. Esta estimación se presenta en términos del área de barrido de una turbina de eje horizontal, por lo que aumenta en proporción al diámetro de las aspas según el modelo seleccionado.

$$E_{wt} = \frac{T}{1000} \frac{\rho}{2} \sum_{i=1}^N f_i(\bar{v}_i) \bar{v}_i^3 \quad (10)$$

4. MODELADO DEL RECURSO SOLAR

La evaluación del potencial solar se puede definir como la caracterización estadística de la radiación en un lugar específico en la tierra. Esta evaluación permite determinar la conveniencia de instalar sistemas de generación fotovoltaica, o de cualquier otro sistema que utilice este tipo de energía, en la zona de estudio.

La radiación solar es una variable menos compleja de modelar en comparación con el viento. Existen modelos matemáticos de poca complejidad utilizados para estimar la radiación en un lugar específico de acuerdo a las características y la ubicación del mismo,

lo que facilita su análisis. Por otro lado, la temperatura ambiente, afecta directamente la operación del panel fotovoltaico, reduciendo su eficiencia y aumentando las pérdidas por transmisión de calor, por lo que el estudio de esta variable debe considerarse en la estimación del potencial solar (Igrahim et al., 2012).

4.1 Energía promedio anual

El grado de abundancia del recurso solar en una zona se establece a partir de la radiación solar incidente durante un año, medida en kWh/m² (Zhao, Liu, & Yu, 2009). La energía promedio anual (E_y) se puede obtener mediante la Ecuación (11), donde R_i , corresponde a la radiación para la hora i en W/m².

$$E_y = \frac{1}{1000} \sum_i^{8760} R_i \quad (\text{kWh/m}^2) \quad (11)$$

4.2 Horas solar pico (HSP)

Este factor HSP (PSH – *Peak Sun Hours*) corresponde al número equivalente de horas al día con un nivel de radiación constante de 1000 W/m² (Daut, Irwanto, Irwan, Gomesh, & Ahmad, 2011). Una radiación diaria mayor a 3 kWh/m² (3 HSP), representa un potencial solar adecuado para el desarrollo de proyectos de energía solar fotovoltaica (Igrahim et al., 2012). En la Ecuación (12) se presenta la expresión que permite obtener las HSP para un día, donde R_i , corresponde a la radiación para la hora i en W/m².

$$HSP = \frac{1}{1000} \sum_i^{24} R_i \quad (h) \quad (12)$$

5. DISPONIBILIDAD DE LOS REGISTROS METEOROLÓGICOS

Para llevar a cabo la evaluación de los recursos eólico y solar en la ciudad de Bucaramanga, se estudiaron los registros de las siguientes variables meteorológicas: la velocidad y la dirección del viento, la temperatura y la radiación solar. Para eso, se analizó el registro horario en tres puntos estratégicos de la ciudad, con medición para los años 2010, 2011 y 2012, información suministrada por la Corporación de la Defensa para la Meseta de Bucaramanga, CDMB. Además, esta información se complementó con los datos meteorológicos de la estación de monitoreo ubicada en el campus central de la UIS para el año 2010.

La primera estación (denominada en adelante E1) se ubica en la zona *Centro* la cual se encuentra en el centro de la ciudad. La segunda estación (E2), se ubica en la zona *Real de Minas*, al occidente de la ciudad. La tercera estación (E3), se ubica en la zona *Norte* la cual se encuentra al Norte de la ciudad, en cercanía a la estación (E4) denominada *UIS*, ubicada en el campus central de la UIS.

6. ANÁLISIS DEL RECURSO EÓLICO DISPONIBLE EN BUCARAMANGA

En general, de acuerdo al resultado del presente estudio, el recurso eólico en la ciudad de Bucaramanga es escaso. Como se observa en la Tabla 1, las velocidades medias registradas para las cuatro estaciones, para los años en los cuales se cuenta con más del 90% de los registros horarios, no supera 1,5 m/s.

Tabla 1. Parámetros estadísticos del viento para Bucaramanga a 50 m

	Año	\bar{V}	k	C	R^2	WPD
E1	2010	2,42	1,42	2,67	0,89	24,07
	2011	2,37	1,42	2,61	0,88	22,76
	2012	2,39	1,43	2,63	0,88	22,96
E2	2011	1,84	1,00	1,85	0,05	16,59
	2012	1,89	1,05	1,93	0,15	18,29
E3	2010	2,31	1,21	2,46	0,83	26,93
	2011	2,20	1,23	2,36	0,85	22,41
	2012	2,35	1,30	2,55	0,86	24,89
E4	2010	1,48	0,99	1,48	0,08	6,55

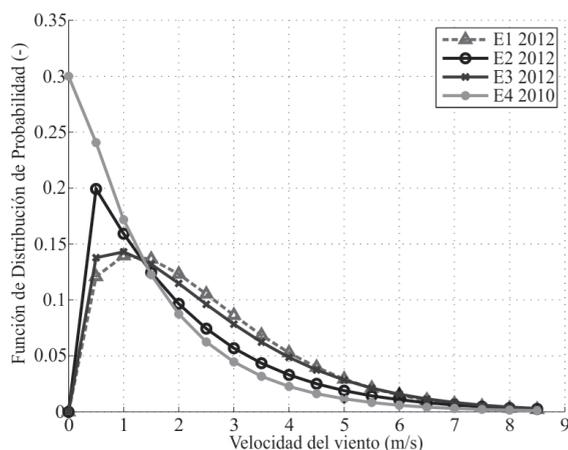


Figura 1. FDP de Weibull a 50 m

Considerando los resultados presentados y la clasificación del DOE, se concluye que no es viable

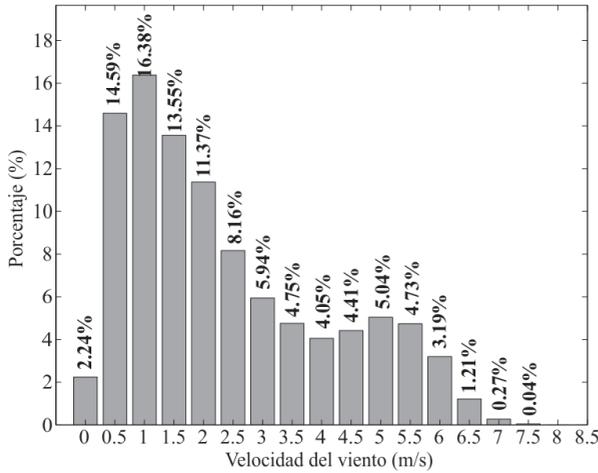
técnicamente, la instalación de aerogeneradores de pequeña y de gran escala, ya que debería contarse, como mínimo, con vientos cuya velocidad media fuese superior a 6 m/s a 50 m de altura y una densidad de potencia mayor a 400 W/m².

Según el modelo de FDP de Weibull para la estación E1, y con una confiabilidad mayor al 80%, la velocidad más probable corresponde a 0,67 m/s. Esta FDP posee un parámetro de forma igual a 1,43 y un factor de escala de 2,63. La curva del histograma es angosta debido a la poca probabilidad de ocurrencia de velocidades mayores a la velocidad con mayor probabilidad, al igual que para las estaciones E2 y E3, como se observa en la Figura 1. En la estación E4, se observa un factor de escala menor a la unidad, por lo que la curva de frecuencia decae exponencialmente, de igual forma que la probabilidad de aparición de velocidades de gran recurso energético.

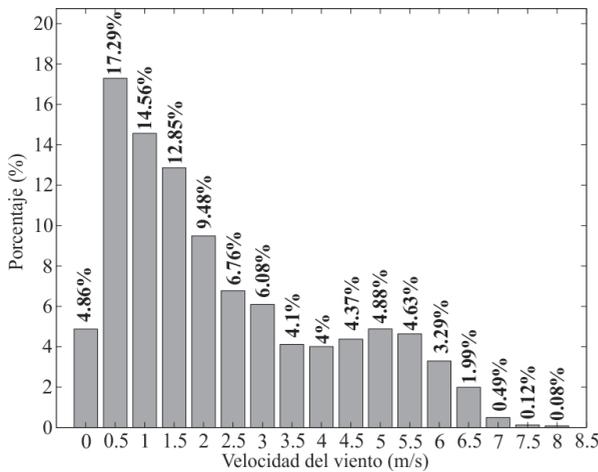
Al analizar los valores de densidad de potencia eólica (WPD), ninguna de las estaciones supera un valor de 25 W/m², por lo que, de acuerdo a la clasificación propuesta por el DOE, la ciudad presenta un recurso eólico Clase 1. De acuerdo a lo expuesto anteriormente, es inadecuada la instalación de aerogeneradores de gran potencia en zonas con esta clasificación, puesto que el recurso eólico disponible es muy bajo. Se observa además, que la estación E4 se encuentra en la zona con menor recurso eólico, y la estación E1, se encuentra en la de mayor recurso. Esta diferencia se debe principalmente a la ubicación geográfica y las corrientes provenientes del municipio de Lebrija (Santander), como lo indica (Lazar & Eder, 2001).

De acuerdo con los histogramas de viento de la Figura 2 para las estaciones E1 y E3, aproximadamente el 25% de horas anuales el viento posee una velocidad cercana a 1 m/s. Por otro lado, velocidades de viento con un recurso considerable (mayor a 3 m/s) se presentan en menos del 15% del total de horas, confirmando que el potencial presente a esta altura no es suficiente para la generación a gran escala.

Aunque evidentemente existe un recurso mayor a una altura de 50 m en comparación con las mediciones tomadas a 10 m de altura, éste sigue siendo escaso. De acuerdo a los registros, se observa que el coeficiente de Hellmann no supera un valor de 0,3 para la mayoría de las estaciones. Es decir, se presenta un incremento en un factor de 1,62 en las velocidades a 50 m de altura con respecto a las medidas a 10 m de altura.



a) Estación E1



b) Estación E3

Figura 2. Histogramas de viento para la estación E1 y E3, altura 50 m, año 2012

En la Tabla 2 se presenta un estimado de la energía disponible de acuerdo a los histogramas de viento para cada una de las estaciones de estudio. Se utilizó como densidad del aire $1,18 \text{ kg/m}^3$, valor promedio medido en la estación E4 (Osma & Ordóñez, 2012). En Bucaramanga se podría obtener una densidad de energía eólica del orden de 200 kWh/m^2 al año, sin tener en cuenta la eficiencia propia de cada modelo de aerogenerador.

Tabla 2. Energía eólica estimada anual a 50 m

Estación	Año	[kWh/m ²]
E1	2010	212,12
	2011	205,24
	2012	207,91
E2	2011	196,38
	2012	189,94
E3	2010	235,22
	2011	208,421
	2012	230,02
E4	2010	45,97

Al comparar el recurso eólico estimado en Bucaramanga, con el recurso en las zonas de mayor potencial de desarrollo de estas tecnologías en el país (Rodríguez, Afanador, Guevara, & González, 2010a), se observa que en las zonas aledañas a la ciudad de Barranquilla (Atlántico) a una altura de 20 m, se registra una densidad de potencia considerablemente mayor al recurso presente en Bucaramanga a una altura de 50 m, con valores desde 216 W/m^2 hasta 512 W/m^2 ; en Barranquilla a 50 m de altura, se estima un recurso cercano a 700 W/m^2 , lo cual clasifica a la ciudad como una zona de interés para el desarrollo de proyectos de generación eólica. Por otro lado, en el Cabo de la Vela, en La Guajira, se han realizado mediciones a 10 m que sobre pasan los 520 W/m^2 , a 20 m, 1.300 W/m^2 y a 50 m, 1.700 W/m^2 .

7. ANÁLISIS DEL RECURSO SOLAR DISPONIBLE EN BUCARAMANGA

A diferencia del recurso eólico, el recurso solar para la ciudad es adecuado para el desarrollo de proyectos de generación fotovoltaica. En la Tabla 3 se presenta la energía promedio anual estimada para cada estación. En la estación E1, la energía anual supera los 1.700 kWh/m^2 para el periodo analizado, mientras que para las estaciones E2 y E3, alcanzan a superar los 1.600 kWh/m^2 y 1.700 kWh/m^2 respectivamente. De acuerdo a esto, el recurso estimado corresponde al 77,6% del registrado en la Guajira según el Atlas de la Radiación Solar de Colombia (2.190 kWh/m^2) (UPME-IDEAM, 2005),

zona con los mejores registros del país. Comparando con otras regiones, se observa que Bucaramanga tiene el 91,3% de la energía anual correspondiente a la media de la Costa Atlántica (1.825 kWh/m²) y el 103,4% de la media de la Zona Andina (1.643 kWh/m²) (Rodríguez, Afanador, Guevara, & González, 2010b),

Tabla 3. Energía promedio anual

Estación	Año	Energía anual promedio [kWh/m ²]
E1	2009	1.722,2
	2010	1.734,0
	2011	2.016,7
E2	2011	1.646,2
	2012	1.715,1
E3	2010	1.553,5
	2011	1.673,7
E4	2012	1.698,5
	2010	1.186,6

Tabla 4. Radiación promedio diaria, máxima y mínima

Estación	Año	Radiación Prom. [kWh/m ²]	Radiación Máx. [kWh/m ²]	Radiación Mín. [kWh/m ²]
E1	2009	4,99	7,63	1,63
	2010	5,16	9,43	1,19
	2011	6,07	11,3	1,63
E2	2011	4,51	6,74	1,33
	2012	4,68	6,85	1,71
E3	2010	4,31	7,18	0,91
	2011	4,62	7,23	1,28
	2012	4,69	7,15	1,77
E4	2011	4,60	6,93	1,63

En la Tabla 4, se observa un consolidado de la radiación promedio, máxima y mínima en Bucaramanga para los años de registro. Más del 87,2% de los días del año, cumplen el criterio previamente descrito para considerar un potencial solar como adecuado para el desarrollo de proyectos de energía fotovoltaica ($\geq 3\text{HSP}$). El promedio de radiación diaria para la ciudad de Bucaramanga es de 4,6 kWh/m², con una gran mayoría de días del año soleados y despejados.

En la Figura 3 se presenta la variación mensual de la energía promedio. En todas las estaciones se observa un comportamiento similar, caracterizado por presentar valores máximos los meses de febrero, marzo y abril en la primera mitad del año y julio, agosto y septiembre

para la segunda mitad del año; en general se observa un comportamiento cuasi estable en todas las zonas de la ciudad.

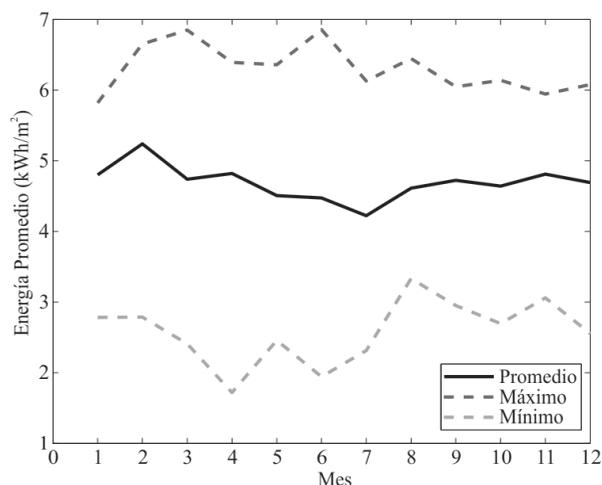


Figura 3. Variación mensual de la energía promedio, estación E2, año 2012

En la Tabla 5 se presenta un consolidado de las HSP promedio, máxima y mínima que se registró para cada año en las estaciones de estudio. Se observa que en promedio, existen al menos 4.85 HSP.

Tabla 5. HSP promedio, máxima y mínima

Estación	Año	HSP. Prom. [h]	HSP. Máx.[h]	HSP. Mín. [h]
E1	2009	4,99	7,63	1,63
	2010	5,16	9,43	1,19
	2011	6,07	11,37	1,63
E2	2011	4,51	6,74	1,33
	2012	4,68	6,85	1,71
E3	2010	4,31	7,18	0,91
	2011	4,62	7,23	1,28
	2012	4,69	7,15	1,77
E4	2011	4,60	6,93	1,63

Otro factor importante a considerar en la planeación de sistemas de generación fotovoltaica corresponde al uso de seguimiento solar, el cual aumenta la exposición directa de los paneles mediante la orientación dinámica, mejorando la eficiencia global del sistema. Sin embargo, de acuerdo a (Osma, 2011), la instalación de estos equipos en Bucaramanga no proporciona un aumento de eficiencia global importante, en comparación con la inversión, debido a su cercanía con la zona ecuatorial.

Finalmente, se debe considerar el efecto negativo de la temperatura ambiente sobre la operación de los paneles fotovoltaicos, por lo que es importante estudiar su variación. Como se observa en la Tabla 6, en la estación E1 la temperatura promedio para el año 2011 corresponde a 20,4 °C, presentándose una temperatura máxima de 23,1 °C y una mínima de 16,6 °C. Por otro lado, la Estación E4 registró una temperatura promedio de 22,92 °C, valor en concordancia con la temperatura de la Estación E3, considerando que se encuentran en la misma zona de la ciudad.

Tabla 6. Temperatura promedio, máxima y mínima

Estación	Año	Temp. Promedio [°C]	Temp. Máx. [°C]	Temp. Mín. [°C]
E1	2009	21,08	23,89	17,32
	2010	20,82	24,57	15,19
	2011	20,46	23,10	16,63
E2	2011	23,34	26,27	19,16
	2012	23,88	27,03	19,83
E3	2010	24,83	29,08	19,40
	2011	24,29	27,24	19,96
	2012	24,79	28,08	20,54
E4	2011	22,92	26,46	19,47

Se observa además que las mayores temperaturas se presentan en las horas cercanas al medio día (11 am a 3 pm) y la temperatura más baja se presenta al amanecer, a las 5 am, de acuerdo a la Figura 4. Según (Osma, 2011), los valores de temperatura ambiente que se presentan en las zonas de estudio reducirán cerca del 15% la generación fotovoltaica diaria. La mayor reducción será de aproximadamente 20% y ocurriría en momentos cercanos del mediodía cuando la radiación solar es cercana a 1.000 W/m².

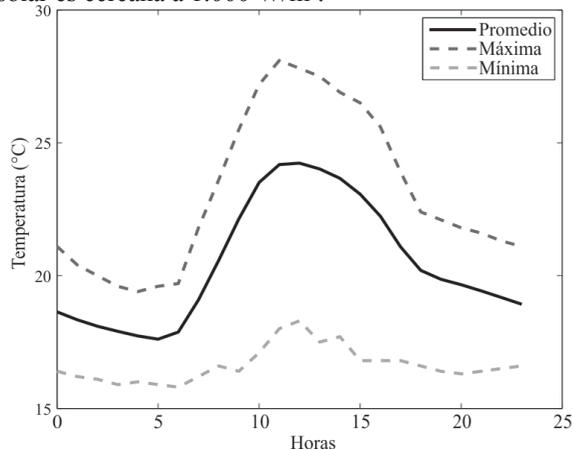


Figura 4. Variación de la temperatura para la Estación E1, año 2012

8. CONCLUSIONES

Con base en el estudio de los registros meteorológicos de la ciudad de Bucaramanga, es posible concluir que el recurso eólico disponible es escaso con una velocidad promedio de 1,5 m/s (a 50 m de altura) y por tanto no tiene el potencial energético adecuado para el desarrollo de la generación a gran o pequeña escala, principalmente porque la mayoría de los aerogeneradores comerciales se caracterizan por una velocidad de arranque mayor a 2 m/s.

No obstante, este estudio permitió identificar que los vientos que presentan el mejor recurso son los que se encuentran en el Centro de la ciudad, provenientes en su mayoría de las montañas que llevan hasta el Aeropuerto Internacional Palonegro, ubicado en el municipio de Lebrija. Por tanto, se presume que dicha zona, a las afueras de la ciudad, podría tener atractivo para la generación eólica. Se recomienda realizar un estudio detallado en dicha región.

Con respecto al recurso solar, es posible concluir que la ciudad de Bucaramanga cuenta con un recurso que supera el criterio para ser considerado adecuado para el desarrollo de proyectos de generación fotovoltaica. Además, este recurso presenta un comportamiento cuasi estable durante el año, lo que mejora el perfil y la eficiencia global de este tipo de sistemas de generación.

9. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecerle a la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) por suministrar información utilizada en esta investigación. Además, al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS) y la UIS, por la financiación a través del programa Jóvenes Investigadores 2012.

10. REFERENCIAS

- AHMED, A. S. Wind energy as a potential generation source at Ras Benas, Egypt. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2167–2173. 2010. doi:10.1016/j.rser.2010.03.006
- AKDAG, S. A.; DINLER, A. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. *Energy Conversion and Management*, 50(7), 1761–1766. 2009. doi:10.1016/j.enconman.2009.03.020

- DAUT, I; IRWANTO, M; IRWAN, Y; M., GOMESH, N; AHMAD, N. S. Potential of Solar Radiation and Wind Speed for Photovoltaic and Wind Power Hybrid Generation in Perlis , Northern Malaysia, (June), 6–7. 2011.
- DUAN, W; CHEN, J; HENGCHANG, F. Comparative Research on Methods of Calculating Weibull Distribution Parameters of Wind Speed. In 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (pp. 1–4). 2011. IEEE. doi:10.1109/APPEEC.2011.5748608
- EL ALIMI, S; MAATALLAH, T; DAHMOUNI, A. W; BEN NASRALLAH, S. Modeling and investigation of the wind resource in the gulf of Tunis, Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5466–5478. 2012. doi:10.1016/j.rser.2012.05.004
- ELLIOTT, D. et al., *Wind energy resource atlas of the United States*. 1987.
- IGRAHIM, S. et al., Linear Regression Model in Estimating Solar Radiation in Perlis. *Energy Procedia*, 18, 1402–1412. 2012. doi:10.1016/j.egypro.2012.05.156
- ILINCA, A. et al., Wind potential assessment of Quebec Province. *Renewable Energy*, 28(12), 1881–1897. 2003. doi:10.1016/S0960-1481(03)00072-7
- KUMARASWAMY, B. G; KESHAVAN, B. K; JANGAMSHETTI, S. H. A statistical analysis of wind speed data in west central part of Karnataka based on Weibull distribution function. In 2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC) (pp. 1–4). 2009. IEEE. doi:10.1109/EPEC.2009.5420878
- KUMARASWAMY, G; KESHAVAN, K.; RAVIKIRAN, T. Analysis of seasonal wind speed and wind power density distribution in Aimangala wind form at Chitradurga Karnataka using two parameter weibull distribution function. In 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting (pp. 1–4). 2011. IEEE. doi:10.1109/PES.2011.6039587
- LAZAR, R., & EDER, J. Estudio sobre el clima urbano en Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, UIS. 2001.
- OSMA, A. Proyecto de investigación de maestría: Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles en el Edificio Eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander. 2011. Universidad Industrial de Santander. Dirigido por el Dr. Gabriel Ordóñez Plata.
- OSMA, A; ORDÓÑEZ, G. Design of a photovoltaic-wind power generation system with grid connection and two micro-grids. In 2012 IEEE International Symposium on Alternative Energies and Energy Quality (SIFAE) (pp. 1–6). 2012. Barranquilla: IEEE. doi:10.1109/SIFAE.2012.6478886
- OUAMMI, A. Monthly and seasonal assessment of wind energy characteristics at four monitored locations in Liguria region (Italy). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1959–1968. 2010. doi:10.1016/j.rser.2010.04.015
- REY, J. Analysis of the Inclusion of Smart Grids Technology in the Colombian Electric Power System. In 2013 International Symposium on Power Quality, SICEL. 2013. Medellín, Colombia.
- RODRIGUEZ, H. Plan de desarrollo para la fuentes no convencionales de energía en Colombia Vol 3: Tecnología y Costos. 2010. Bogotá, Colombia.
- RODRIGUEZ, H. et al., Plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia Vol 2: Diagnosticos de las FNCE. 2010. Bogotá, Colombia.
- UCAR, A; BALO, F. Assessment of wind power potential for turbine installation in coastal areas of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 1901–1912. 2010. doi:10.1016/j.rser.2010.03.021
- UPME-IDEAM. Atlas de Radiación Solar de Colombia. Bogotá, Colombia, Colombia: Ministerio de Minas y Energía. Unidad de Planeación Minero Energetica (UPME) y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). 2005.
- ZHAO, M; LIU, Z; YU, M. Testing and analyzing of solar energy resource assessment in inner mongolia. In 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2009, (pp. 2177–2179). IEEE. doi:10.1109/ICIEA.2009.5138583