

Cuantificación y caracterización de la radiación solar en el departamento de La Guajira-Colombia mediante el cálculo de transmisibilidad atmosférica

Quantification and characterization of solar radiation at the department of La Guajira-Colombia by calculating atmospheric transmissivity

Marley Vanegas Chamorro^{1*}, Eunice Villicaña Ortiz², Luis Arrieta Viana³

¹Doctor por la Universidad de Oviedo, Docente del Departamento de Ingeniería Química, Universidad del Atlántico, Grupo de Investigación en Gestión Eficiente de la Energía, Caí. Barranquilla, Colombia.

²Doctor por la Universidad de Oviedo, Profesor Investigador del Departamento de Energías Renovables, Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, Veracruz-México.

³Ingeniero Químico, Asistente de Investigación del Departamento de Ingeniería Química, Universidad del Atlántico, Grupo de Investigación en Gestión Eficiente de la Energía, Caí. Barranquilla, Colombia.

*Autor: marleyvanegas@mail.uniatlantico.edu.co

Recibido 30/04/15
Aceptado 10/06/2015

Cite this article as: M. Vanegas , E. Villicaña, L. Arrieta, "Quantification and characterization of solar radiation at the department of La Guajira-Colombia by calculating atmospheric transmissivity", *Prospect*, Vol 13, N° 2, 54-63, 2015.

RESUMEN

El gobierno colombiano aprobó en mayo de 2014 la Ley 1715, en la cual se promueve el "desarrollo y utilización de las fuentes no convencionales de energía (FNCE) en el sistema energético nacional, principalmente aquellas que son de carácter renovable. La marcada necesidad de integrar las FNCE al sistema energético nacional hace necesaria la cuantificación y caracterización de la radiación incidente en la zona norte de Colombia, específicamente en el departamento de La Guajira, lo que conllevó a un estudio más específico donde se evaluaron distintas variables de tipo geométrico, geográfico, astronómico, físico y meteorológico. Este trabajo presenta un análisis de la cuantificación y caracterización de la radiación solar a partir del estudio de datos meteorológicos suministrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) de distintas estaciones ubicadas en el departamento de La Guajira con registros climáticos de más de cinco años y evaluados a través del modelo de Bird y Hulstrom. A partir de los resultados arrojados por este estudio, se identificaron las zonas del departamento que presentan mayor potencial para el desarrollo de diferentes tecnologías solares.

Palabras clave: Irradiancia global, Radiación directa, Radiación difusa, Brillo solar, FNCE, Transmisibilidad atmosférica, Coeficiente de turbidez.

ABSTRACT

The Colombian government approved in May 2014 Law 1715, which promotes the "development and use of non-conventional energy sources (FNCE) in the national energy system, mainly those that are renewable. The marked FNCE need to integrate the national energy system requires the quantification and characterization of the incident radiation in northern Colombia, specifically in the department of La Guajira, which led to a more specific study where different geometric, geographical, astronomical, physical and meteorological variables types were evaluated. This paper presents an analysis of the quantification and characterization of solar radiation from the study of meteorological data provided by the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies of Colombia (IDEAM) from different stations in the department of La Guajira with climate records with more than five years and evaluated through the model of Bird and Hulstrom. From the results obtained from this study, areas of the department of La Guajira with the greatest potential for development of different solar technologies were identified.

Keywords: Global irradiance, Direct radiation, Diffuse radiation, Sunshine, FNCE, Atmospheric transmissivity, Coefficient of turbidity.

1. INTRODUCCIÓN

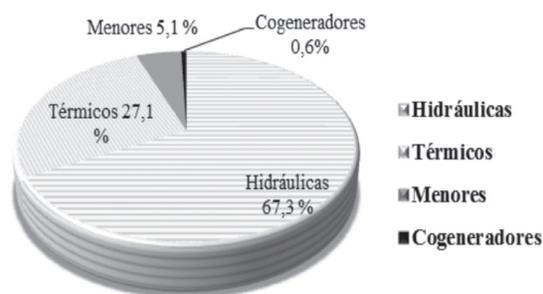
La necesidad de buscar alternativas que permitan el desarrollo de nuevas tecnologías energéticas con el fin de garantizar el suministro energético de manera sostenible y medioambientalmente aceptable, es uno de los retos internacionales de mayor importancia, ello queda de manifiesto en los informes de la Agencia Internacional de la Energía que emite cada año mediante el *World Energy Outlook* en donde se señalan los desafíos en lo que respecta a la generación de energía limpia, cambio climático y desarrollo sostenible.

En Colombia también se hace eco de este significativo esfuerzo, no con la intensidad que se debiera, pero en la actualidad se adelantan actividades que contribuyen al desarrollo de las energías renovables a lo largo del territorio nacional. La Ley 1715 firmada el 13 de mayo del 2014 referente a la regulación de la integración de las energías renovables en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) [1] hace referencia a los mecanismos e incentivos para el impulso de las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE), lo cual favorecerá su desarrollo en el país. Esto, sumado a los múltiples beneficios que aportan estas fuentes de energía, tales como la reducción de emisiones de gases de Efecto Invernadero (GEI), el aprovechamiento de los recursos renovables autóctonos, la generación de empleo, el desarrollo científico y tecnológico, la paulatina reducción de la dependencia de fuentes fósiles y la maximización del desarrollo sostenible hace que se visualice un desarrollo económico importante en el país.

Actualmente, el mercado eléctrico colombiano está formado por 53 generadores, 94 empresas comercializadoras, 31 operadores de red y una docena de transmisores [2]. A finales del año 2013, la generación de energía del sistema interconectado Nacional (SIN) en Colombia fue de 62.196,6 GWh. Esta generación está formada en un 67,3 % por hidroeléctricas, un 27,1 % corresponde a plantas térmicas, el 5,1 % a plantas menores y un 0,6% está formado por cogeneradores cuya distribución se observa en la figura 1.

Figura 1. Producción de energía primaria en el 2012.

Figure 1. Primary energy production in 2012.



Según informes de la UPME, la cobertura de energía eléctrica alcanzó el 95,6 % a nivel nacional en 2012. El total de viviendas con suministro eléctrico fue de 11.569.602, de las cuales el 1,7 % tienen la prestación con solución aislada. En 2012 la UPME realizó un Plan Indicativo de Expansión de la Cobertura de energía eléctrica (PIEC), con el fin de asignar una metodología para suplir las necesidades presentes y estimar el valor de la inversión, este plan está orientado a la electrificación de 535.613 viviendas que no cuentan con este servicio.

Por otro lado, el CO₂ se considera como el principal gas GEI emitido en el país; se estima que las actividades energéticas tales como la quema de combustibles, las emisiones fugitivas y la quema de biomasa, generan el 37 % de las emisiones totales de GEI en el país y las actividades de consumo de combustibles fósiles relacionado con la generación de electricidad sólo aportan un 23,2% del total del sector energía [3]. El indicador promedio de emisiones de CO₂ en Colombia entre los años 2008 y 2011 fue de 142 gramos de CO₂ por cada KWh, siendo superior a Brasil que presentó 77 gramos de CO₂ por cada KWh para el mismo periodo [4]. En este sentido, Colombia apenas sólo representa el 0,4 % de las emisiones mundiales.

Por todo lo anterior, es urgente que se dé un cambio en la estructura del modelo energético nacional, el cual debe ser considerado como prioritario, además de estar encaminado a la mejora de la cadena de generación, transmisión, distribución y uso final de la energía. En este sentido el país dispone de recursos renovables y no renovables, donde el solar cobra importancia debido a su vasta disponibilidad respecto a otras fuentes alternativas. Desde hace varios años se ha observado un interés en diferentes sectores de la economía en incursionar en el uso de las energías renovables ya que los modelos de cambio climático muestran potenciales amenazas en la generación hidroeléctrica, que es la fuente de generación de energía más importante en el país, esto debido a los periodos de sequía que causan la reducción de caudales, creando una alta vulnerabilidad en el suministro de energía.

En Colombia existen diversas alternativas que pueden garantizar el suministro energético futuro de forma asequible y medioambientalmente aceptable. Estas alternativas deben ser desarrolladas en el corto y mediano plazo, con el fin de dar cobertura a los requerimientos energéticos del país. Desde esta perspectiva, algunos estudios señalan que en distintas zonas del país existe una variedad interesante de recursos renovables con capacidad de ser transformados en energía final [5,6]. De ellos, el recurso solar es de especial importancia debido a su disponibilidad en prácticamente todo el territorio nacional con un promedio diario multianual cercano 4,5 kWh/m² destacándose la pe-

nínsula de la Guajira con un valor promedio de 6,0 kWh/m² y la Orinoquía con un valor un poco menor [7]. Estos valores son superiores a los 2 y 3 kWh/m² registrados en países referentes en este sector como Alemania y España [8-10] y similares a los que presentan países como México donde la generación de energía a través de fuentes renovables está tomando importancia [11].

Bajo este escenario, este trabajo muestra el estudio para el cálculo de la radiación solar incidente en la zona norte de Colombia, específicamente en una zona climática de la península de La Guajira que se caracteriza por poseer un clima cálido árido, con el fin de evaluar el recurso disponible para su uso como fuente energética. Se desean establecer las pautas necesarias para el desarrollo y explotación de los recursos renovables, con el fin de contribuir a la base de información geográfica y temporal de la disponibilidad energética de los recursos renovables en el país. Ello permitirá a mediano plazo la implementación de un modelo energético más diversificado, que garantice la satisfacción de la demanda energética futura de forma sostenible. Por tanto, se calcula la radiación directa y difusa de forma más precisa, ya que se consideran distintos tipos de turbidez atmosférica, que van desde un cielo claro y limpio hasta uno con un cielo con una nubosidad importante. Este tipo de valoración de realiza debido a que la turbidez atmosférica es bastante variable y depende de las condiciones particulares de cada zona que sea objeto de estudio.

2. DESCRIPCIÓN DE LA REGIÓN ANALIZADA Y DE LOS DATOS

El departamento de La Guajira se encuentra ubicado en la Zona Norte colombiana con latitud 10°23' a 12°28' N y longitud de 71°06' a 73°39' O. Limita al norte y al oeste con el Mar Caribe, al este con el Golfo de Venezuela y con parte de este país y en Colombia limita al sur con el departamento del Cesar y al suroeste con el departamento del Magdalena (ver figura 2). Su territorio está constituido con parte de la península de La Guajira y al sur con partes de la Sierra Nevada de Santa Marta, la Serranía del Perijá y la planicie aluvial de los ríos Ranchería y Cesar, con lo cual encontramos en esta zona una variedad de climas. Esta zona comprende una extensión de 20.848 km², lo que representa el 1,8 % del territorio nacional [12].

Figura 2. Posición geográfica del departamento de La Guajira (Colombia).

Figure 2. Geographical position of La Guajira department (Colombia).



Fuente: Elaborada por el autor

La temperatura promedio en La Guajira oscila entre los 27 y 30°C, aunque presenta valores máximos de hasta 45°C, sin embargo en la parte montañosa la temperatura mínima logra bajar hasta los 3°C. En esta región predomina el clima de sabana xerófila al sur y occidente, y de estepa árida o semiárida al norte y oriente. Las lluvias son habituales entre septiembre y diciembre. El clima de La Guajira ha generado una vegetación muy típica, con arbustos espinosos y cactus. Es la zona más seca de todo el territorio colombiano [12].

Una correcta evaluación del recurso solar depende de la cantidad y calidad de la información que se dispone. Este estudio se realizó a partir del análisis de datos históricos de más de 20 años suministrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) de 4 estaciones meteorológicas localizadas en la zona norte de La Guajira, donde predomina el clima cálido árido (Ver Figura 2). Estos datos son series de temperatura y humedad relativa sobre una base diaria, registrada a las 7, 13 y 19 horas durante el período comprendido entre los años 1983-2013. El procesamiento de la información se complementó mediante un tratamiento matemático-estadístico en las diferentes series de tiempo, lapsos o períodos a través de la elaboración de un código en la herramienta informática Matlab®. Estas estaciones meteorológicas y sus características de ubicación se presentan en la tabla 1.

Este trabajo es el resultado de una investigación en

conjunto entre el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y del Instituto Colombiano para la Ciencia y la Tecnología (Colciencias), quienes aportaron sus recursos técnicos, administrativos y financieros para que desde la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Atlántico se realizara el estudio de disponibilidad geográfica y temporal de la energía solar en la zona norte del departamento de La Guajira, con el fin de favorecer el desarrollo y aprovechamiento de las fuentes de energías alternativas y renovables en esta región.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas de la zona norte de La Guajira (clima cálido árido).

Table 1. Weather stations in the north of La Guajira (arid warm climate).

Estación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Temperatura (°C)	HR (%)
Manaure	11°46'	72°28"	1	28,7	73,2
Puerto Bolívar	12°13'	71°59'	10	28,4	74,2
Nazareth	12°10"	71°17'	85	27,2	81,3
Rancho Grande	11°41'	71°49'	50	27,7	65,8

3. FUNDAMENTOS

3.1 Generalidades

Los rayos provenientes del sol llegan a la superficie de la tierra con diferentes intensidades que se clasifican de acuerdo a la longitud de onda que éstas presentan. Al conjunto de estas longitudes se le denomina espectro electromagnético el cual contiene las radiaciones de menor a mayor longitud de onda, tales como rayos X, ultravioleta, luz visible, infrarrojo, microondas y radiofrecuencia. Los gases atmosféricos, el vapor de agua, el polvo, hollín, polen entre muchas otras partículas obstruyen una gran parte de la radiación solar, lo cual da origen a los fenómenos de dispersión, absorción y reflexión [13], que reducen hasta en un 50% la potencia de la radiación incidente, dando lugar a una variación local y estacional [14]. Sin embargo, a la superficie de la tierra llega una gran cantidad de esta radiación que podría emplearse para producir energía de diferentes tipos y que son necesarias para satisfacer las necesidades de la humanidad.

3.2 Constante solar

El sol es la estrella más grande del sistema solar y está constituida principalmente por hidrógeno que al estar a altas presiones y temperaturas, sus átomos se fusionan entre si dando lugar a la formación de helio y a la liberación de energía en forma de rayos gamma [15]. Esta radiación viaja desde el núcleo solar y se distribuye por todo el universo de forma uniforme. Parte de esta radiación llega a las capas altas de la atmósfera terrestre y es conocida como constante solar (C). Ésta se

define como la cantidad de energía por unidad de área y tiempo que a la distancia de una unidad astronómica alcanza la tierra y tiene un valor de 1375 W/m² y varía en función a la época del año [16].

La disponibilidad de la radiación solar es intermitente debido a los fenómenos meteorológicos que tienen lugar en la tierra, lo cual dificulta su uso y limita su competitividad frente a otras fuentes renovables. Para poder identificar la disponibilidad del recurso es necesario analizar diferentes factores geográficos, astronómicos, geométricos, físicos y meteorológicos [17].

El análisis de todos los fenómenos que surgen al llegar la radiación a la tierra, posibilita la evaluación de este recurso. La evaluación de la radiación solar puede realizarse mediante diferentes metodologías, tales como el registro de medidas realizadas en las zonas que sean objeto de estudio, el tratamiento de imágenes de satélite o el empleo de modelos físicos de cálculo de irradiación. El primero conlleva al empleo de instrumentos específicos para su medición, que en muchos casos son muy costosos, el segundo es de uso limitado debido a su alto costo y el último, emplea datos meteorológicos de las zonas a analizar lo que representa una herramienta de fácil acceso a la comunidad científica, empresarios, academia, etc. para obtener resultados aceptables. Este último método es el que se utilizó para el análisis de la radiación global, directa y difusa presentada en este documento y que se basa en el modelo físico de irradiancia de Bird y Hulstrom.

3.3 Modelo de Bird y Hulstrom

En 1981, Bird y Hulstrom propusieron un modelo para determinar la irradiancia directa y difusa a partir de la construcción de una metodología donde se tenían en cuenta consideraciones sobre ciertos elementos que atenúan la radiación solar a su paso por la atmósfera [18]. Para ello hicieron un análisis de los modelos de irradiancia directa de Atwater y Ball [19], Hoyt [20], Lacin y Hansen [21], ASHRAE [22] y Watt [23] y para la irradiancia difusa consideraron, además de los autores citados, el modelo de Davies y Hay [24]. Como resultado de este estudio, estos autores formularon un modelo donde se tienen en cuenta el cálculo de parámetros de una forma fácil y práctica sin perder su rigurosidad.

Para la realización de este estudio se seleccionó este modelo el cual permite determinar la radiación total (ITH), a partir de la suma de la radiación directa (IDH) y la radiación difusa (IdH) en superficie horizontal para toda la banda [25].

La radiación directa en superficie horizontal se determina a partir de la ecuación 1 considerando diferentes índices de nubosidad.

$$I_{DH} = [0,9662(C_r)(\tau_{prom})]SenA \quad (W/m^2) \quad (1)$$

donde:

τ_{prom} : es la transmitancia promedio calculada a partir de τ_r , τ_o , τ_g , τ_w y τ_a que son las transmitancias por dispersión debido a moléculas de aire, ozono, gases miscibles, vapor de agua y aerosoles, respectivamente.

C_r : constante solar diaria que es función del día juliano (W/m^2).

0,9662: es el factor de corrección que se ajusta al intervalo de longitud de onda donde se concentra el 96% de la radiación.

A: es el ángulo de altitud solar.

Para el coeficiente de transmisión debido a la dispersión por moléculas de aire y la transmitancia debida a gases miscibles se debe determinar previamente el valor de la masa atmosférica (m_a), la cual es función de la presión del lugar y de la masa relativa del aire (m_{rel}), ésta última es una relación puramente geométrica que evalúa la intersección de un rayo solar al atravesar la atmósfera considerando la curvatura de la tierra por lo que es función del ángulo de altitud solar A.

En cuanto al coeficiente de transmisión debido a la absorción del ozono se requiere del espesor de la capa de ozono correspondiente a la atmósfera de la zona donde se encuentre ubicada la estación. Para el caso estudiado, este valor fue tomado de los valores presentados en el Atlas de Radiación Solar de Colombia, donde se presentan mapas de columna total de ozono promedio multianual para cada uno de los meses del año [7].

En cuanto a la transmitancia debida al vapor de agua se requiere de información relativa a la cantidad de agua precipitable del lugar, el cual se calcula en función de la humedad relativa y la temperatura de la zona estudiada. Para la transmitancia debida a la presencia de aerosoles se emplea la parametrización realizada por Mächler [26], que se encuentra representada en el Modelo de Iqbal [27]. Esta parametrización es la que mejor se ajusta para evaluar este fenómeno a partir de la introducción del coeficiente de turbidez de Angstrom [28], en la cual se consideran parámetros tales como el tamaño medio de la partícula que se establece, según diversos estudios [13, 28, 29], en $1,3 \mu m \pm 0,2$ y una cantidad fija de aerosoles, que describe el grado de turbidez que presenta la atmósfera; este valor puede variar desde 0,0 para atmósferas extremadamente limpias, hasta 0,5 como límite máximo para atmósferas con una turbidez muy alta. Para el caso objeto de estudio, este parámetro (β) toma el valor de 0,0; 0,1; 0,2; 0,3 y 0,4, lo que representa a cinco tipos de atmósferas.

En cuanto a la irradiancia difusa, el modelo considera el aporte de tres componentes solares: irradiancia difusa debida a la existencia de moléculas de aire Idr, irradiancia difusa debida a la existencia de partículas de polvo Ida e irradiancia difusa por múltiple reflexión entre el suelo y la atmósfera Idm [13].

La irradiancia difusa debida a la dispersión por moléculas de aire, representada por la ecuación 2, considera la cantidad de energía que ante una dispersión por moléculas gaseosas se dirige hacia la superficie terrestre; en este modelo se supone del 50%. Asimismo, se incluye la transmitancia debida exclusivamente a la absorción de los aerosoles la cual requiere del albedo debido a la dispersión de aerosoles, en este caso, Bird y Hulstrom sugieren que tome el valor de 0,9 [18].

$$I_{dr} = [0,79(C_r)(\tau_o\tau_g\tau_w\tau_{aa})(0,5)] \left[\frac{(1-\tau_r)}{(1-m_a+m_a^{1,02})} \right] SenA \quad (W/m^2) \quad (2)$$

Para el cálculo de este parámetro se utiliza la transmitancia debida a la absorción de los aerosoles (τ_{aa}) la cual es función de la masa de aire (m_a) y de la transmitancia debida a aerosoles (τ_a) empleada para el cálculo de la radiación directa.

La radiación difusa debida a la presencia de aerosoles, representada por la ecuación 3, se calcula a partir del Modelo C de Iqbal [27], la cual es función del porcentaje de la energía que se acerca a la superficie terrestre debido a la dispersión por aerosoles (F_c). En este caso, este valor puede estimarse a partir de la parametrización realizada por Mac, cuyo cálculo es función de la masa atmosférica (m_a) [11].

$$I_{da} = [0,79(C_r)(\tau_o\tau_g\tau_w\tau_{aa})(F_c)] \left[\frac{(1-\tau_{as})}{(1-m_a+m_a^{1,02})} \right] SenA \quad (W/m^2) \quad (3)$$

En esta ecuación se utiliza la transmitancia (τ_{as}) que es debida a la difusión de aerosoles y que es función de (τ_a) y de (τ_{aa}).

El cálculo de la irradiancia difusa por múltiple reflexión, representada por la ecuación 4, requiere disponer de los coeficientes de reflexión de la superficie (ρ_g), este valor generalmente se encuentra tabulado y para este trabajo se empleó el valor de 0,15. Del mismo modo, se requiere evaluar el albedo atmosférico, es decir, la múltiple reflexión entre el suelo y el cielo (ρ'_a) el cual es función de F_c y la transmitancia debida exclusivamente a la difusión por aerosoles [29].

$$I_{dm} = [I_{DH}SenA + I_{dr} + I_{da}] \left[\frac{(\rho_g \cdot \rho'_a)}{(1 - \rho_g \cdot \rho'_a)} \right] \quad (W/m^2) \quad (3)$$

3.2 Aplicación del modelo de Bird y Hulstrom

Los datos suministrados por el IDEAM, tales como humedad relativa, temperaturas y brillo solar, se organizaron y trataron matemática y estadísticamente para interpolar y hallar celdas de información donde no había medidas ya que como era de esperarse, a pesar de contar con información de más de 20 años, existían algunas celdas sin registro alguno. Con toda la información se determinó el comportamiento climático de cada estación, mediante promedios multianuales, es decir se estableció un año tipo. Posteriormente se procedió a realizar el cálculo de los diferentes coeficientes de transmisión atmosférica dados por el Modelo de Bird y Hulstrom. Para ello, se utilizó la información climática aportada por las estaciones meteorológicas ubicadas en las diferentes zonas de la región estudiada (ver tabla 1 y figura 2).

Se procedió a evaluar la radiación directa y difusa para cada una de las estaciones meteorológicas a través del cálculo de las transmitancias. Del mismo modo se establecieron cinco hipotéticos estados que puede presentar la atmósfera: ($\beta = 0,0$) extremadamente limpia, ($\beta = 0,1$) despejada, ($\beta = 0,2$) media, ($\beta = 0,3$) turbia y ($\beta = 0,4$) muy turbia. Tras realizar este cálculo y tomando los valores de brillo solar suministrados por el IDEAM se procedió a calcular las irradiancias global, directa y difusa para cada estación.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

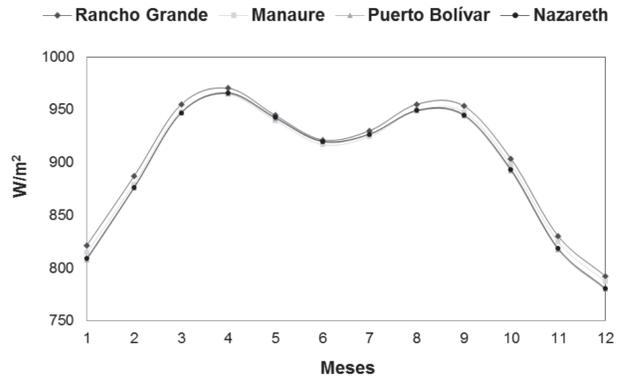
La disponibilidad de la energía solar está condiciona por diversos factores de tipo climático y meteorológico. Por tanto, para el análisis de la información solarimétrica, es necesario conocer la aplicación final que tendrá el recurso solar, así, si el uso final es de tipo energético, será preciso determinar con mayor exactitud la disponibilidad del recurso, de modo que el modelo de irradiación desarrollado en este análisis que considera el aspecto de los cielos (despejados o cubiertos) ha sido determinante.

4.1 Tipo de radiación

En la Figura 3 se muestra el comportamiento del nivel de radiación global promedio a lo largo del año en las distintas estaciones meteorológicas considerando un índice de nubosidad de 0,3, es decir, una atmósfera turbia.

Figura 3. Radiación global media mensual en las estaciones meteorológicas.

Figure 3. Global monthly average radiation at weather stations.



Se observa un comportamiento uniforme para este parámetro en las cuatro estaciones analizadas considerándose una atmósfera turbia; sobresale Rancho Grande quien presenta para los meses de marzo, abril, agosto y septiembre los mayores valores de radiación global media mensual. Este comportamiento es de esperarse ya que se están analizando datos provenientes de estaciones que se encuentran ubicadas en una misma zona climática. Esto quiere decir que al analizar una de estas estaciones, la radiación solar global media mensual calculada será semejante, aunque presentará variación dada la latitud y altitud del lugar. Este comportamiento de la radiación global variable a lo largo del año, permite analizar los datos de acuerdo a las temporadas seca o de lluvias que se presentan en esta zona.

Los valores de brillo solar empleadas para calcular la irradiancia global promedio a partir de la radiación global promedio son de 8,3; 7,9; 7,0 y 6,6 para las estaciones Puerto Bolívar, Rancho Grande, Manaure y Nazareth respectivamente. En la tabla 2 se presentan estos valores calculados para la irradiancia global para cada atmósfera que se ha considerado.

Tabla 2. Irradiancia solar global promedio anual en las estaciones meteorológicas.

Table 2. Overall annual average solar irradiance at weather stations.

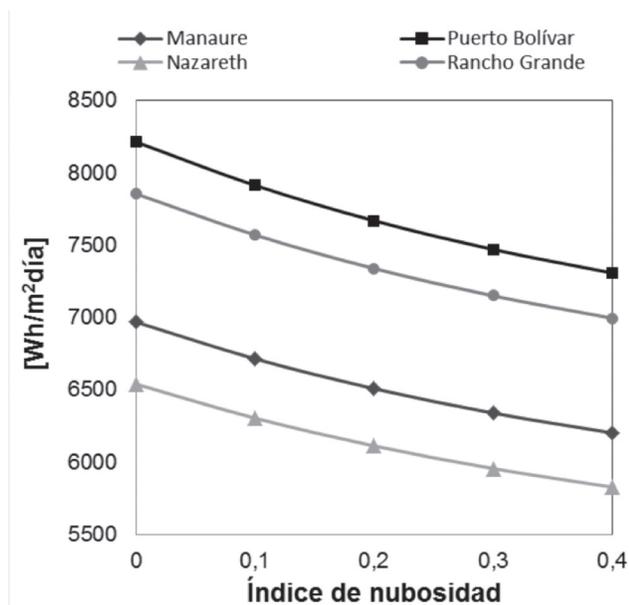
Estaciones	$I_{TH} (\beta=0,0)$	$I_{TH} (\beta=0,1)$	$I_{TH} (\beta=0,2)$	$I_{TH} (\beta=0,3)$	$I_{TH} (\beta=0,4)$
	[Wh/m ² día]				
Manaure	6966,8	6713,4	6506,7	6338,3	6201,0
Puerto Bolívar	8212,8	7912,9	7668,6	7469,6	7307,5
Nazareth	6538,3	6303,1	6111,0	5954,2	5826,3
Rancho Grande	7853,9	7569,7	7337,9	7148,8	6994,6

Se observa que el nivel de irradiancia global solar considerando una atmósfera extremadamente limpia, es mayor en la estación Puerto Bolívar mientras que la estación Nazareth es la que presenta un menor valor. Sin embargo, esta condición es poco habitual si miramos las características físicas y meteorológicas de una determinada zona; por tanto, se puede establecer

como condición de trabajo atmósferas despejadas o con mayor grado de turbidez. Para analizar mejor el comportamiento de la irradiancia solar global promedio anual en función del índice de nubosidad, se presenta la figura 4. Aquí se observa con mayor claridad la tendencia que sigue este parámetro a medida que se incrementa el índice de nubosidad.

Figura 4. Irradiancia solar global promedio anual en las estaciones meteorológicas en función del índice de nubosidad.

Figure 4. Overall annual average solar irradiance at weather stations depending on the rate of cloudiness.



Las estaciones Puerto Bolívar y Rancho Grande son las que registran mayor número de horas de sol, por tanto el valor de la irradiancia global promedio es mayor en estas estaciones, mientras que la estación Nazareth presenta el menor valor para este parámetro.

Comparando estos resultados con los reportados en el atlas de radiación solar de Colombia en 2005 [7], estos valores se corresponden en magnitud. A manera de ejemplo, analicemos los valores correspondientes a la estación Nazareth que es la que presenta el menor valor de irradiancia global solar en este trabajo. El valor multianual reportado para esta zona se encuentra en el intervalo de 5,0 a 5,5 [kWh/m2día] y en ese momento fue el menor valor que presentó esa zona, y el calculado con el modelo de Bird y Hulstrom, a diferentes índices de nubosidad se encuentra en el intervalo de 5,8-6,5 [kWh/m2día].

De estos niveles de irradiación, interesa distinguir la fracción que corresponde a la irradiación directa y a la irradiación difusa, ya que ello permitirá establecer qué tipo de tecnología es más conveniente desarrollar en

cada zona, ya sea la térmica de baja o media temperatura o la fotovoltaica aislada o conectada a red.

Para analizar la fracción de irradiancia directa y difusa que componen la irradiancia global promedio, se consideró una atmósfera turbia para establecer como mínimo la intensidad de la radiación en la situación más desfavorable. Los resultados hallados se muestran en la tabla 3. Como se puede observar, los niveles de irradiancia directa, aun considerándose una atmósfera turbia, son interesantes para el desarrollo de sistemas solares.

Tabla 3. Irradiancia solar global, directa y difusa promedio anual en las estaciones meteorológicas.

Table 3. Global, direct and diffuse solar irradiance average annual an the weather stations.

Estaciones	Irradiación [Wh/m² día] para una atmósfera turbia ($\beta=0.3$)		
	Global (I_{TH})	Directa (I_{DH})	Difusa (I_{dH})
Manaure	6338,3	3990,9	2347,4
Puerto Bolívar	7469,6	4699,6	2770,0
Nazareth	5954,2	3760,2	2331,9
Rancho Grande	7148,8	4507,9	2194,1

Tanto las irradiancias directas como las difusas de las estaciones analizadas presentan un comportamiento similar, destacándose la estación Puerto Bolívar con un valor de IDH de 4699,6 Wh/m2día y de 2770,0 Wh/m2día para IdH.

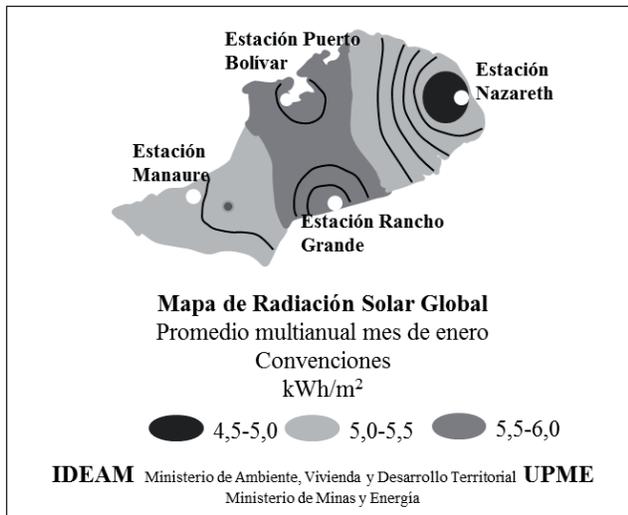
A manera de ejemplo y con fines comparativos, en la figura 5 se presenta el mapa solar de radiación global promedio multianual correspondiente al mes de enero de la zona norte de La Guajira reportados en el año 2005 [7]. De acuerdo con estos datos, las diferentes zonas demarcadas con colores negro, gris claro y gris oscuro representan los intervalos de radiación 4,5-5,0 kWh/m², 5,0-5,5 kWh/m² y 5,5-6,0 kWh/m², respectivamente, donde se encuentra que la estación Nazareth está ubicada en la zona de color negro, Rancho Grande y Puerto Bolívar en la zona de color gris oscuro y por último la estación Manaure localizada en la región de color gris claro.

El cálculo de la irradiancia global empleando las transmitancias por el modelo de Bird y Hulstrom considerando todas las atmósferas analizadas, se obtuvieron los siguientes valores promedio para el mes de enero. Para la estación Nazareth (ubicada en la zona de color negro) 5,6-6,3 kWh/m², estaciones Rancho Grande y Puerto Bolívar (ubicadas en la zona de color gris oscuro) 7,2-8,2 y 7,1-8,1 kWh/m², respectivamente y en la estación Manaure (ubicada en la zona de color gris claro) 6,0-6,8 kWh/m². Se observa que los valores de

irradiación global calculados a través del modelo de Bird y Hulstrom y empleando los datos promedios multianuales desde 1983 hasta 2013 (30 años) suministrados por estas estaciones, son mayores que los intervalos considerados para esa zona en el atlas de radiación solar de Colombia.

Figura 5. Mapa de radiación solar global. Promedio multianual del mes de enero [7].

Figure 5. Map of global solar radiation. Multi-year average for January [7].



4.2 Potencial de desarrollo

A partir del modelo de Bird y Hulstrom, se evaluó el recurso solar en la zona norte de La Guajira, donde predomina un clima cálido árido, a partir de los datos meteorológicos suministrados por el IDEAM de cuatro estaciones ubicadas en la zona se identifican los posibles proyectos energéticos que han de desarrollarse en esta zona.

Para el desarrollo de instalaciones solares fotovoltaicas de tipo aislado se requiere un nivel de irradiación entre 3,0 y 4,0 kWh/m²día. En lo relativo a instalaciones solares con conexión a red se requiere, además de mayor insolación (horas de sol) y lugares libres de sombras, un nivel de irradiación superior a los 4,0 kWh/m² día. En zonas donde predomina la irradiación difusa, no es conveniente llevar a cabo instalaciones fotovoltaicas, ya que la transformación de energía presenta un bajo rendimiento. Por esta razón, los lugares con importante nubosidad a lo largo del año no son aptos para el desarrollo de instalaciones solares fotovoltaicas con conexión a red [11, 30].

En cuanto a la producción de agua caliente sanitaria (ACS), se requieren menores niveles de irradiación solar diaria, del orden de los 2,5 y 3,0 kWh/m² día. Sin embargo, donde se requieren mayor radiación directa es en

los sistemas térmicos de concentración de media y alta temperatura (CSP), ya que la temperatura que se debe alcanzar con esta tecnología es superior a los 400°C. Los lugares más idóneos deben tener muchas horas de sol directo, al menos 2000 kWh/m² día de radiación solar por metro cuadrado al año [31]. Las mejores regiones son aquellas sin mucha humedad atmosférica, polvo o humo, como estepas, zonas de matorral, sabanas, semi-desiertos y auténticos desiertos, localizados idealmente a menos de 40 grados de latitud norte o sur. Por ello, en las zonas más prometedoras del mundo están incluidos los Estados sur-occidentales de Estados Unidos, América Central y del Sur, norte y sur de África, los países mediterráneos, Oriente Próximo y Oriente Medio, Irán y las planicies desérticas de India, Pakistán, la antigua Unión Soviética, China y Australia [31].

5. CONCLUSIONES

La evaluación del recurso solar en la zona norte de la península de La Guajira arrojó resultados dependientes del tipo de atmósfera considerado. Así, se encontraron valores para la radiación global promedio multianual en un intervalo de 6,0 a 6,8 kWh/m² día, con componentes de radiación directa de 3,4-6,5 kWh/m²día y de radiación difusa de 0,4-2,8 kWh/m²día.

Los niveles de radiación en la zona norte de la península de La Guajira son adecuados para el desarrollo de instalaciones solares de tipo eléctrico y térmico. Las instalaciones de tipo eléctrico serían fotovoltaicas, ya sean conectadas a la red o aisladas. Los resultados obtenidos indican que tecnologías como la CSP son rentables debido la cantidad de insolación e irradiación mayor a los 6,0 kWh/m² día.

El desarrollo y aprovechamiento de estos recursos requiere de apoyo e incentivos a fin de lograr las mejoras estructurales necesarias que contribuyan a su aprovechamiento e integración en el sistema energético productivo.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las entidades COLCIENCIAS y UPME por la financiación del proyecto de investigación "Desarrollo e implementación de un programa para la evaluación del recurso eólico y solar en la Costa Caribe colombiana" en el cual se enmarca los resultados publicados en este artículo y al IDEAM por suministrar toda la información meteorológica de las estaciones instaladas en la Costa Caribe colombiana.

7. REFERENCIAS

[1]. Congreso de Colombia. (2011) Ley 1450 del 16 de

- Junio de 2011 [Internet], Bogotá D.C., Congreso de Colombia. Disponible desde: <<http://www.alcaldia-bogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=43101>> [Acceso 03 de abril 2015].
- [2]. XM. (2014) Descripción del sistema eléctrico colombiano [Internet], Medellín, XM. Disponible desde: <<http://informesanuales.xm.com.co/2013/SitePages/operacion/1-4-Agentes-del-mercado.aspx>> [Acceso 11 de mayo 2014].
- [3]. IDEAM. (s.f.) Capítulo 2. Inventario nacional de emisiones de gases efecto invernadero [Internet], Bogotá D.C., IDEAM. Disponible desde: <<https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/021658/2Comunicacion/IDEAMTOMOIIICap2.pdf>> [Acceso 8 de mayo 2014].
- [4]. IEA (2013) CO2 emissions from fuel combustion, highlights [Internet], Paris. Disponible desde: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsFromFuelCombustionHighlights2013.pdf>> [Acceso 12 de mayo 2014].
- [5]. Corpoema. (2010) Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE) [Internet], Volumen 2, Bogotá D.C., UPME. Disponible desde: <http://www.upme.gov.co/Sigic/DocumentosF/Vol_2_Diagnostico_FNCE.pdf> [Acceso 5 de mayo 2014]
- [6]. UPME. (2013) Planeamiento energético y energías alternativas en Colombia [Internet], Pasto, Ministerio de Minas y Energía. Disponible desde <[http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/ckeditor_files/documents/Noticias/UPME_PERS-N_PlaneamientoEnergetico-EnergiasAlternativas_VF%20\(2\).pdf](http://www1.upme.gov.co/sites/default/files/ckeditor_files/documents/Noticias/UPME_PERS-N_PlaneamientoEnergetico-EnergiasAlternativas_VF%20(2).pdf)> [Acceso 29 de abril 2014].
- [7]. UPME-IDEAM (2005). Atlas de radiación solar de Colombia [Internet], Bogotá. Disponible desde: <<http://www.si3ea.gov.co/Home/EnergiaSolar/tabid/74/language/en-US/Default.aspx>> [Acceso 08 de abril 2015].
- [8]. N. Caldés, et al., "Economic impact of solar thermal electricity deployment in Spain", Energy Policy, 37(5), pp.1628–1636, 2009.
- [9]. J.A. Carrión, et al., "The electricity production capacity of photovoltaic power plants and the selection of solar energy sites in Andalusia (Spain)", Renewable Energy, 33(4), pp.545–552, 2008.
- [10]. J. De la Hoz, et al., "Promotion of grid-connected photovoltaic systems in Spain: Performance analysis of the period 1998–2008". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(9), pp.2547–2563, 2010.
- [11]. O.Villicaña, (2012) Método de evaluación de la radiación solar por transmisibilidad atmosférica. Aplicación a la determinación del potencial energético solar de México. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo.
- [12]. Gobernación de la Guajira (2013). Presentación de La Guajira. [Internet], Riohacha. Disponible desde: http://www.laguajira.gov.co/web/index.php?option=com_content&view=article&id=1183&Itemid=76 [Acceso 09 de abril 2015].
- [13]. Pinazo, O. Manual de climatización, Tomo II. Servicio de publicaciones, Universidad Politécnica de Valencia-España, 1995.
- [14]. J.I Prieto. Disponibilidad de la Energía Solar. Universidad de Oviedo, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, Cap. II, Oviedo, España, 2008.
- [15]. N. Noyon, (2008) Huerta Fotovoltaica de 1.2 MW con seguimiento solar y conexión a red en Sevilla, Tesis de Licenciatura. Departamento de Energía, Universidad de Oviedo, España.
- [16]. A.I. Martínez, (2007) Sistemas fotovoltaicos conectados a red. Planta Fotovoltaica 20 MW Portusa. Tesis de Licenciatura, Departamento de Energía. Universidad de Oviedo, Oviedo, España.
- [17]. Saffaripour M., Mehrabian H. "Numerical methods applied to global solar radiation modeling - comparison with measured data". International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, pp.777-789, 2009.
- [18]. Bird R., Hulstrom R. A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces. Solar Energy Research Institute, EEUU, 1981.
- [19]. Atwater M., Ball J. "A surface solar radiation model for cloudy atmosphere", Monthly weather review, pp.879-888, 1980.
- [20]. D. Hoyt. "A model for calculation of solar global insolation". Solar Energy, pp.27-35, 1978.
- [21]. A. Lacis, J. Hansen, "A parametrization for the absorption in solar radiation in the Earth's Atmosphere", Journal of the atmospheric sciences, pp.118-133, 1973.
- [22]. ASHRAE, Handbook of fundamentals. New York, 1972.

- [23]. O. Watt, On the nature and distribution of solar radiation, Departamento de Energía de EEUU, 1975.
- [24]. J. Davies, Calculation of the solar radiation incident on a horizontal surface, Canadian Atmospheric Environment Service. First Canadian Solar Radiation Data Workshop, 1979.
- [25]. J. Bosca, (1995) Contribución al estudio de la radiación solar y de la determinación de la turbiedad atmosférica. Aplicaciones a Valencia y Sevilla. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- [26]. M. Mächler, (1983) Parameterization of solar irradiation under clear skies. Tesis de maestría, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Columbia. Vancouver, Canadá.
- [27]. M. Iqbal, An introduction to solar radiation. Toronto: Academic Press, 1983.
- [28]. A. Angstrom, Techniques of determining the turbidity of the atmosphere. The Eppley Foundation for Research. Tellus XIII, 1961.
- [29]. J.V. Boscà, J.M. Pinazo, J. Cañada. (1993) Obtención del Coeficiente de Turbiedad atmosférica de Angstrom de Valencia y Sevilla [Internet]. Utilizando medidas de Radiación Solar. Departamento de Termodinámica Aplicada. Universidad Politécnica de Valencia. Disponible desde: < <http://www.vpclima.upv.es> > [Acceso 10 de marzo 2015].
- [30]. Eunice Villicañaz, Antonio Gutiérrez, José Pre-des, Jorge Xiberta, "Solar energy potential in the coastal zone of the Gulf of Mexico". Renewable Energy 81, pp-534-542, 2015.
- [31]. C. Richter, (2009) Energía Solar Térmica de Concentración, Perspectiva Mundial. Greenpeace & Asociación Europea de la Energía Solar. [Internet]. Disponible desde: <http://www.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/other/090713.pdf> [Acceso 12 de abril 2015].