



Estimación de la Radiación Solar Mediante Métodos Empíricos en Bucaramanga, Colombia.

Carlos A. Olejua-Gómez^{1*}, Andrés A. Navarro-León¹.

¹Universidad Santo Tomas, Departamento de Ciencias Básicas.

Carrera 18 # 9-27 Bucaramanga, Colombia.

[*carlos.gomez@ustabuca.edu.co](mailto:carlos.gomez@ustabuca.edu.co)

Recibido 15 de agosto de 2020; aceptado 28 de septiembre de 2020

RESUMEN

En la actualidad mundial el incremento acelerado tanto en el consumo energético como en las emisiones de gases efecto invernadero ha llevado cada vez más a enfocar los esfuerzos tecnológico y científicos en la implementación de energías renovables. La energía solar surge como una alternativa fundamental para suplir las necesidades energéticas y que experimenta todos los años un aumento en su implementación para múltiples fines. Es claro que uno de los principales ingredientes para aprovechar la energía de sol es conocer la radiación solar incidente en la zona que se desea implementar, por lo que su estimación puede realizarse mediante procesos de medición de estaciones meteorológicas, procesos de posicionamiento o modelos empíricos. En esta investigación, se determina la radiación solar incidente en la ciudad de Bucaramanga (Santander/Colombia) mediante tres modelos empíricos: Ångström-Prescott, Bristow-Campbell y Black. La información meteorológica del brillo solar, temperatura y precipitación, fueron obtenidos de la base de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM); los datos de la radiación solar se obtuvieron de la base de *Prediction Of Worldwide Energy Resources* (POWER) de la NASA. El desempeño de los modelos obtenidos se evaluó a través de las pruebas estadísticas denominadas el error

de sesgo medio, la raíz cuadrada del error cuadrático medio y el factor de correlación. En general, los modelos mostraron resultados aceptables y se pueden ser implementadas en zonas cercanas a Bucaramanga para la estimación de la radiación solar.

PALABRAS CLAVE: Energía Renovable, Radiación Solar, Modelos Empíricos, Ångström-Prescott, Bristow-Campbell.

ABSTRACT

At present the accelerated increase in both energy consumption and greenhouse gas emissions worldwide has led more and more to focus technological and scientific efforts on the implementation of renewable energies. Solar energy emerges as a fundamental alternative to meet energy needs and it undergoes every year an increase in its implementation for multiple purposes. It is clear that one of the main ingredients to take advantage of the sun's energy is to know the incident solar irradiation in the area to be implemented, so its estimation can be made by measuring processes of meteorological stations, positioning processes or empirical models. In this research, the incident solar irradiation in the city of Bucaramanga (Santander/Colombia) is determined by three empirical models: Ångström-Prescott, Bristow-Campbell and Black. The meteorological information of the solar brightness, temperature and precipitation, were obtained from the database of the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM); solar irradiation data were obtained from NASA's Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) database. The performance of the models obtained was evaluated through the statistical tests called the mean bias error, the square root of the mean quadratic error and the correlation factor. In general, the models showed acceptable results and can be implemented in areas near Bucaramanga for the estimation of solar irradiation.

KEY WORDS: Renewable Energy, Solar Radiation, Empirical Models, Ångström-Prescott, Bristow-Campbell.

INTRODUCCIÓN

Un suministro continuo de energía siempre ha sido uno de los más importantes factores de crecimiento y desarrollo económico de los países (Ekren & Yetkin, 2011). En consecuencia, un rápido crecimiento poblacional y el aumento en el consumo de combustibles fósiles esta impactando directamente al fenómeno del calentamiento global, convirtiéndose en un problema de interés mundial. Por esta razón, los investigadores introdujeron y promovieron el uso sostenible de los recursos energéticos como solución a estos grandes problemas (Fazelpour et al., 2015). Actualmente, en la mayoría de los países se están desarrollado planes para reducir la dependencia de la energía fósil y promover el desarrollo de las energías renovables, lo que se refleja en la multiplicidad de proyectos de energías renovables en las dos últimas décadas en diferentes partes del mundo (Onat & Ersoz, 2011).

En el reporte de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) del 2018 (Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2019) muestra que el 86 % de la energía producida para el sistema nacional interconectado (SIN) es del tipo hidráulica y solo 0.01

% es generado por la energía solar; a pesar de esto, desde el 2014 se da inicio con el primer proyecto de energía solar con el propósito de aportar al SIN y presentando un salto en el 2016, a 110 proyectos registrados para la generación de energía eléctrica y aumento a más de 200 proyectos por año (Unidad de Planeación Minero-Energética, 2019). Por otro lado IDEMA y UPME (IDEAM & UPME, 2015) reportan que el potencial solar en Colombia es en promedio de 4.5 kWh/m²/día, en donde los departamentos con mayor potencia solar anual es La Guajira, Atlántico, Cesar y Norte de Santander con un máximo de 5.5 kWh/m²/día.

El conocimiento de la radiación solar local es esencial para muchas aplicaciones (incluyendo diseño arquitectónico, modelos de crecimiento de cultivos y estimaciones de evapotranspiración) pero es en los sistemas de aprovechamiento de la energía solar como los fotovoltaicos y concentradores solares en donde a crecido su aplicación (IEA, 2016).

La radiación solar global sobre la superficie horizontal en el lugar de interés es el parámetro de entrada más crítico empleado en el diseño y la predicción del rendimiento de un dispositivo de energía solar (Hussain et al., 1999). A pesar de la importancia de las mediciones de radiación

solar, estos datos no están disponibles debido a la gran dificultad operativa para realizar las mediciones directas, y deben estimarse generalmente a través de modelos que utilizan horas de sol. Los datos sobre la duración de la luz solar están ampliamente disponibles en muchos países, y se han propuesto diversas fórmulas basadas en ellos para determinar la radiación solar.

Existen varios métodos empíricos en la literatura para estimar la radiación solar global que se expresan como función empírica de parámetros tales como horas de sol y turbidez o parámetros meteorológicos (Zhang et al., 2017). Los modelos paramétricos son complejos ya que se basan en el conocimiento de variables comúnmente disponibles o derivadas: contenido de vapor de agua, aerosol óptico y de ozono, visibilidad, etc.

En este artículo se presenta un estudio del potencial solar de Bucaramanga medida en horas mensual y anual, realizado con la ayuda de datos abiertos tomados en las plataformas de DATA NASA e IDEAM de la estación meteorológica principal de la Universidad Industrial de Santander aplicando los modelos Ångström-Prescott, Bristow-Campbell y Black.

MATERIALES Y MÉTODOS

La radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra depende de factores tanto geométricos como atmosféricos (Román, 2010), los cuales conforman una línea de constante investigación en la estimación de radiación solar global (radiación directa más la radiación difusa) (Ruiz-Arias & Gueymard, 2018), determinando la disponibilidad de energía solar de una zona o ciudad. Cuando no se dispone de instrumentos de medición debidamente calibrados durante periodos reciente, o no se tiene acceso fácil a este tipo de información, se recurre a estimar el valor de radiación a partir de modelos analíticos (Bhattarai et al., 2019) o estadísticos elaborados a partir de variables climáticas (Lapa et al., 2019).

Los métodos estadísticos o empíricos consisten en relacionar variables experimentales entre sí, y ajustarlas a funciones que obtengan una alta correlación, estos modelos suelen ser sencillos, y terminan proporcionando muy buenos resultados locales. Entre los más destacados y utilizados en este trabajo están los modelos propuestos por Ångström-Prescott (A-P), Bristow - Campbell (B-C) y Black (BL).

El modelo A-P es uno de los modelos empíricos más eficientes, que logra definir genéricamente la relación

entre la energía solar disponible a nivel del suelo y la duración de las horas de sol (Ångström, 1924; Prescott, 1940), a partir de la ecuación:

$$\frac{H_g}{H_0} = a + b \left(\frac{n}{N}\right) \quad (1)$$

Donde, H_g es el promedio mensual de la radiación global diaria (kWh/m²/día), H_0 es el promedio mensual de la radiación global extraterrestre diaria (kWh/m²/día), n duración del sol en un día medida (horas) y N es el promedio mensual de la duración máxima de la luz solar brillante en un día.

Los coeficientes a y b , son específicos de la ubicación, denominados fracciones de radiación extraterrestre en días nublados y días despejados, respectivamente, a partir de estos valores se logra estimar la radiación global en función de las horas de sol reportados para la ciudad de Bucaramanga.

Los valores diarios correspondientes de la radiación extraterrestre y la longitud del día se calcularon para cada par de datos diarios utilizando relaciones astronómicas. La única entrada requerida para calcular estos valores diarios para un día específico del año es la latitud. La radiación extraterrestre diaria en una superficie horizontal (H_0), puede ser en función de la

constante solar (G_s), la latitud del sitio (l), el factor de corrección de excentricidad de la órbita terrestre (E_0), la declinación solar (δ) y el ángulo medio de la hora de salida del sol (ω_s); H_0 se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 G_s}{\pi} E_0 \left[\cos l \cos \delta \sin \omega_s + \left(\frac{\pi \omega_s}{180}\right) \sin l \cos \delta \right] \quad (2)$$

Donde el factor de corrección E_0 , se considera como la expresión:

$$E_0 = \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 d_n}{365}\right) \right]; \quad d_n \text{ día juliano} \quad (3)$$

La constante solar G_s es la cantidad de energía recibida en la parte superior de la atmósfera terrestre, medida a una distancia media entre la Tierra-Sol orientada sobre una superficie perpendicular al Sol, donde la constante solar aceptada es de 1367 W/m², la cual es determinada mediante su promedio anual.

La declinación solar δ en grados se puede calcular a partir de la fórmula de Spencer (Spencer JW, 1971)

$$\delta = (180 / \pi)(0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma) \quad (4)$$

donde el ángulo diurno Γ (radianes) viene dado por:

$$\Gamma = 2\pi(d_n - 1)/365 \quad (5)$$

El ángulo medio de la hora de salida del sol en una superficie horizontal, o ω_s teórico de salida del sol/puesta del sol, puede calcularse en grados a partir de:

$$\omega_s = \cos^{-1}[-\tan l \tan \delta] \text{ en grados} \quad (6)$$

Y la duración del día en horas, o la duración entre el amanecer y el atardecer, es aproximada por:

$$N = \frac{2}{15} \omega_s \quad (7)$$

El modelo B-C explica la relación entre las temperaturas máximas (T_{max}) y mínimas (T_{min}) del aire y la radiación solar (Baigorria et al., 2004), teniendo en cuenta que cuando esta llega a la superficie de la tierra, una parte se refleja y el otro es absorbido, lo que hace que caliente el aire adyacente, contribuyendo a cambiar su temperatura. Con base en este argumento se construye un modelo empírico ampliamente utilizado para estimar la radiación solar debido al fácil acceso de los datos relacionados con la temperatura. Este modelo sugiere una relación entre en índice de claridad (H_g/H_0) y la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas (Bristow & Campbell, 1984):

$$\frac{H_g}{H_0} = a(1 - e^{-b(T_{max}-T_{min})^c}) \quad (8)$$

Finalmente, el modelo BL, relaciona la radiación solar global con el valor medio mensual de la proporción de cielo cubierto (\bar{n}), el cual habitualmente se denomina nubosidad y se encuentra medido en octas. (Black, 1956):

$$\frac{H_g}{H_0} = a + b\bar{n} + c\bar{n}^2 \quad (9)$$

RESULTADOS

La información meteorológica se tomó como referencia los datos de la estación 23195040 de la Universidad Industrial de Santander (UIS) con latitud de 7.13, longitud de -73.12 proporcionados por el IDEAM. Los datos expuestos por dicha estación meteorológica transcurren desde los años 1969 al 2014, asimismo, se tuvo en cuenta que durante ciertos años no existió toma parcial de datos debido a situaciones externas a la estación.

La calidad de los modelos determinados se examinó sobre la base de las siguientes mediciones estadísticas, que se recomiendan para la comparación de ecuaciones para la estimación de la radiación solar.

El error de sesgo medio (ESM), que se refiere al error sistemático, sus valores positivos indican una sobrevaloración, el negativo indica una infravaloración y

se expresa mediante la ecuación (Jacovides & Kontoyiannis, 1995; Míguez et al., 2002)

$$ESM = \frac{\sum(H_p - H_g)}{d} \quad (\text{kWh/m}^2/\text{día}) \quad (10)$$

Donde H_p es la radiación predicha por el modelo, H_g es la radiación medida y d es el número de datos, el cual corresponde al número de meses del año.

La raíz cuadrada del error cuadrático medio (RECM) muestra que la variación de las estimaciones para los datos registrados es siempre positiva y es deseable que estén cerca de cero:

$$RECM = \sqrt{\frac{\sum(H_p - H_g)^2}{d}} \quad (\text{kWh/m}^2/\text{día}) \quad (11)$$

Por último, el coeficiente de correlación (R^2):

$$R^2 = \frac{\sum(H_p - H_g)^2}{\sum(H_g - \bar{H}_g)^2} \quad (12)$$

Los resultados de las mediciones estadísticas mencionadas en las ecuaciones (10), (11) y (12) fueron calculados con los datos del IDEAM y NASA. Los datos seleccionados fueron los promedios de cada mes del año; de igual forma, para los valores de la radiación solar extraterrestre H_0 y el número de horas de sol diarias N , se determinaron a partir sus correspondientes promedios para cada mes del año; estos se muestran en la tabla 1 a continuación:

Tabla 1. Parámetros estadísticos de las regresiones aplicadas

Modelo	ESM	RECM	R ²	Coefficientes
A-P	-0.000185	0.24276	0.791384	a = 0.436 b = 0.244
B-C	0.010468	0.22491	0.679315	a = 0.597 b = 0.227 c = 1.0008
BL	0.004171	0.24662	0.816805	a = 0.592 b = 0.210 c = -0.424

La Figura 1 muestra la radiación mensual predicha por los modelos de A-P, B-C y BL y su comparación con la radiación observada.

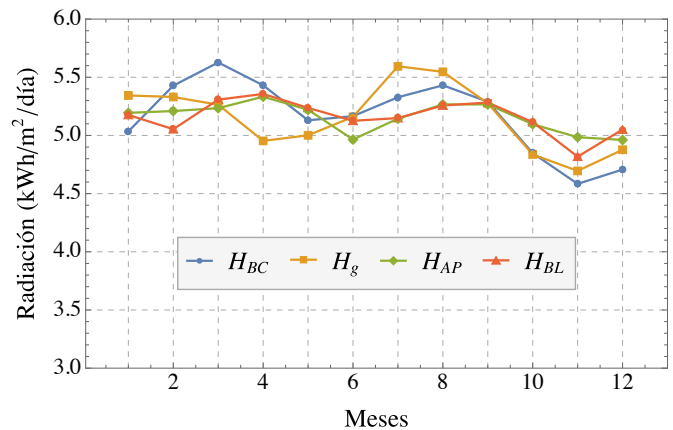


Figura 1. Comparación de la radiación predicha por los modelos empíricos de A-P, B-C y BL con la radiación observada en Bucaramanga.

CONCLUSIONES

Los modelos empíricos implementados en este trabajo presentan una buena predicción de la radiación, al momento de comparar con los valores de la radiación obtenidos de la NASA como se muestran en la figura 1. Respecto al comportamiento de los valores de radiación

predichos por los modelos, el de BL presenta un buen comportamiento similar en los primeros 3 meses del año; después del tercer mes, el modelo de B-C presenta el mejor comportamiento en la predicción de la radiación, en comparación con el valor observado de ésta. A partir del octavo mes es posible apreciar que todos los modelos empíricos presentan un comportamiento similar.

Por lo que se refiere a las correlaciones estadísticas, puede concluirse que los modelos empíricos presentados presentan un buen comportamiento, siendo el modelo de BL el que presenta un bajo ESM y RECM; el modelo de A-P presenta el R^2 más bajo, en comparación con los otros dos modelos empíricos.

Nuestros resultados indican que la regresión para el modelo de A-P propuesta en este trabajo puede ser utilizada satisfactoriamente para la estimación de la radiación global en Bucaramanga, Colombia y de manera similar, el modelo exponencial de B-C y el modelo cuadrático BL. Es importante resaltar que la implementación de estos modelos en zonas cercanas a Bucaramanga es plausible y dependerá de las variables meteorológicas que cuente la zona.

Se propone llevar a cabo los procedimientos aquí presentados con datos de radiación solar provenientes de estaciones meteorológicas cercanas a Bucaramanga y que permitan determinar con mayor precisión las variaciones de la radiación.

BIBLIOGRAFÍA

- Ångström, A. (1924). SOLAR AND TERRESTRIAL RADIATION. 19. *Monthly Weather Review*, 52(8), 397–397. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1924\)52<397:satr>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1924)52<397:satr>2.0.co;2)
- Baigorria, G. A., Villegas, E. B., Trebejo, I., Carlos, J. F., & Quiroz, R. (2004). Atmospheric transmissivity: Distribution and empirical estimation around the central Andes. *International Journal of Climatology*, 24(9), 1121–1136. <https://doi.org/10.1002/joc.1060>
- Bhattacharai, S., Ziebart, M., Allgeier, S., Grey, S., Springer, T., Harrison, D., & Li, Z. (2019). Demonstrating developments in high-fidelity analytical radiation force modelling methods for spacecraft with a new model for GPS IIR/IIR-M. *Journal of Geodesy*, 93(9), 1515–1528. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01265-7>
- Black, J. N. (1956). The distribution of solar radiation

- over the Earth's surface. *Archiv Für Meteorologie, Geophysik Und Bioklimatologie Serie B*, 7(2), 165–189. <https://doi.org/10.1007/BF02243320>
- Bristow, K. L., & Campbell, G. S. (1984). On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 31(2), 159–166. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(84\)90017-0](https://doi.org/10.1016/0168-1923(84)90017-0)
- Ekren, O., & Yetkin, B. (2011). Size Optimization of a Solar-wind Hybrid Energy System Using Two Simulation Based Optimization Techniques. In *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*. <https://doi.org/10.5772/18007>
- Fazelpour, F., Soltani, N., & Rosen, M. A. (2015). Wind resource assessment and wind power potential for the city of Ardabil, Iran. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 6(4), 431–438. <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0139-8>
- Hussain, M., Rahman, L., & Rahman, M. M. (1999). Technical note : Techniques to obtain improved predictions of global radiation from sunshine duration. *Renewable Energy*, 18(2), 263–275. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00772-1](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00772-1)
- IDEAM, & UPME. (2015). Atlas Interactivo - Radiación IDEAM. In *IDEAM* (p. 1). <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- IEA. (2016). *IEA | International Energy Agency - Statistics Search*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/>
- Jacovides, C. P., & Kontoyiannis, H. (1995). Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. *Agricultural Water Management*, 27(3–4), 365–371. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01152-9](https://doi.org/10.1016/0378-3774(95)01152-9)
- Lapa, B. F. C., Hurtado, D. E. C., Cadillo, A. Y. R., Hernández, J. R. M., & Vivas, A. B. C. (2019). Estimation of global solar radiation, using extreme temperatures, applying the bristow-campbell model in the junín region. *Ingeniare*, 27(4), 643–651. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000400643>
- Míguez, J. L., Granada, E., López González, L. M., Xiberta, J., & Fernández, P. (2002). Prediction of

- global daily solar radiation using higher order statistics. *Renewable Energy*, 27(4), 647–666. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00153-7](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00153-7)
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2019). *BOLETÓN ESTADÍSTICO DE MINAS Y ENERGÍA*. <https://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/Boletin-estadistico-de-ME.aspx>
- Onat, N., & Ersoz, S. (2011). Analysis of wind climate and wind energy potential of regions in Turkey. *Energy*, 36(1), 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.10.059>
- Prescott, J. A. (1940). Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, 61(1), 114–118. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10025613338/>
- Román, R. (2010). *Efectos de los componentes atmosféricos sobre la radiación eritemática y modelo propuesto para la reconstrucción de series*. <http://www5.uva.es/renova/esp/Roman2010.pdf>
- Ruiz-Arias, J. A., & Gueymard, C. A. (2018). Worldwide inter-comparison of clear-sky solar radiation models: Consensus-based review of direct and global irradiance components simulated at the earth surface. In *Solar Energy* (Vol. 168, pp. 10–29). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.008>
- Spencer JW. (1971). Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, 2(5), 172. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10005108360/>
- Unidad de Planeación Minero-Energética. (2019). *Inscripción de proyectos de Generación*. <http://www.siel.gov.co/Inicio/Generación/InscripcióndeproyectosdeGeneración/tabid/113/Default.aspx>
- Zhang, J., Zhao, L., Deng, S., Xu, W., & Zhang, Y. (2017). A critical review of the models used to estimate solar radiation. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 70, pp. 314–329). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.124>