

Determinación de un modelo paramétrico para estimar la radiación solar

Determination of a parametric model for estimating solar radiation

COLCIENCIAS TIPO 1. ARTÍCULO ORIGINAL

RECIBIDO: NOVIEMBRE 22, 2013; ACEPTADO: DICIEMBRE 21, 2013

Andrés M. Vélez-Pereira, M.Sc
avelez3@cuc.edu.co

Eliana Vergara Vásquez, M.Sc
evergara6@cuc.edu.co

William Barraza Coronell
william.barraza15@gmail.com

Diana Agudelo Yepes
diana.carolina.agudelo.yepes@gmail.com

Grupo de Investigación en Tecnología Ambiental
Universidad de la Costa

Resumen

La radiación solar global se establece como una variables complejas de monitorear y su estimación es necesaria en el entendimiento de los procesos biológicos y químico del ambiente, su estimación se puede realizar mediante procesos de posicionamiento u formulas empíricas, no obstante la precisión de los resultados obtenidos no son adecuado para el entendimiento de los procesos de evaluados. El objetivo del presente trabajo fue establecer un modelo estadístico para la estimación de la radiación solar global a partir de los datos meteorológicos de alternos. La información meteorológica fue suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, de una estación que contara con la medición de radiación solar, temperatura, humedad relativa y horas de sol; Se plantearon las regresiones estadísticas sugeridas por Ångström-Prescott y Gueymard. Se evidenciaron poca relación entre las variables, presentando el mejor ajuste la regresión lineal entre la humedad relativa y la radiación solar con un coeficiente R2 de 11.14%.

Palabras Clave

Radiación Solar; estimación de la radiación solar; modelo Estadístico.

Abstract

Global solar radiation is set as monitor complex variables and their estimation is required in understanding the biological and chemical environment, the estimation process can be performed by positioning or empirical formulas, but the accuracy of the results obtained are not suitable for understanding processes evaluated. The aim of this study was to establish a statistical model for estimating global solar radiation from meteorological data alternates. Meteorological information was supplied by Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales from Colombia, from one season to tell with the measurement of solar radiation, temperature, relative humidity and sunshine duration; statistical regressions were raised suggested by Ångström -Prescott and Gueymard. It showed little relationship between the variables, presenting the best fit linear regression between relative humidity and solar radiation with a coefficient R2 of 11.14 %.

Keywords

Solar radiation; solar radiation estimation; statistical model.

Los autores agradecen a la Universidad de la Costa por el apoyo financiero recibido para el desarrollo del proyecto de investigación que da origen al presente artículo.

I. INTRODUCCIÓN

La radiación solar que llega a la tierra es una de las energías naturales renovables más importantes (Bakirci, 2009), actualmente esta fuente de energía se utiliza para muchas aplicaciones de ingeniería como el diseño solar fotovoltaico y los sistemas de energía solar térmica (Wu & Keong-Chan, 2013). Asimismo, la radiación solar superficial entrante a nivel mundial es el principal insumo para estimar la evapotranspiración y la acumulación de la biomasa en la planta, cuando se simula el crecimiento del cultivo (Bojanowski, Donatelli, Skidmore, & Vrieling, 2013). En este sentido, para una eficiente utilización de la energía solar, los datos de la energía solar y de la radiación deben medirse continuamente y con precisión en un largo plazo. Sin embargo, la medición de la radiación solar no está disponible para todos los países del mundo debido a dificultades técnicas (Benmouiza & Cheknane, 2013) y a las escasas red de estaciones que permitan las interpolaciones de valores medidos (Bojanowski et al., 2013).

En la literatura hay varios métodos empíricos utilizados para estimar la radiación solar global, los cuales la expresan como función empírica de parámetros como las horas de sol y la nubosidad o de parámetros meteorológicos (Almorox, Bocco, & Willinton, 2013); no obstante, los modelos estadísticos están siendo muy utilizados.

Los modelos estadísticos de radiación solar, durante muchos años, han sido una gran alternativa ante la falta de equipos especializados para medir este fenómeno; uno de los modelos iniciales es el de regresión de Ångström- Prescott (1924) (UPME-IDEAM, 2005). Investigaciones como las de Yorukoglu & Celik (2006), Turk (2009), y Bacirki (2009), afirman que Ångström- Prescott propuso una relación lineal entre la proporción global de irradiación [H] para radiación global en días despejados y la proporción de las horas del sol [S] para la duración astronómica del día.

Los modelos paramétricos presentan una complejidad intermedia; se basan en el conocimiento de variables atmosféricas frecuentemente disponibles o derivables a partir de otros datos: contenido de vapor de agua, espesor óptico de aerosoles y ozono, visibilidad, etc. Los modelos paramétricos no simulan las interacciones a escala de moléculas o partículas, sino que emplean distintos algoritmos para el cálculo de las transmitancias integrales de los diferentes componentes atmosféricos combinados

en distintas formas de la ecuación de transporte, pudiendo representar de forma precisa los efectos de estos componentes sobre la radiación solar.

El modelo paramétrico de Bird & Hulstrom (1981) modificado por Iqbal (1983) computa la radiación difusa y directa y tiene en cuenta la atenuación atmosférica debida a la transmitancia por vapor de agua, aerosoles, mezcla de gases, ozono y dispersión de Rayleigh. El modelo tiene en cuenta el aumento de la transmitancia con la altura donde elige los parámetros de temperatura y humedad correspondientes a la media mensual durante los últimos 50 años derivada de los análisis de NCEP/NCAR (Lucano & Fuentes, 2010).

Cuando se habla de modelo físico, se hace referencia al método y los principios para obtener el modelo que consiste en una serie de parametrizaciones basadas en integraciones previas de las funciones de transmitancia espectral, a base de tener en cuenta separadamente las fuentes de extinción de la radiación que existen en la atmósfera. Entre los más importantes están: el modelo de Parry Moon, del Instituto de Tecnológico de Massachussets, quién elaboró en 1940 un modelo para obtener la irradiancia directa y propuso unas curvas de radiación estándar; y el Modelo de Atwater y Ball, en el cual, para el cielo despejado, se requieren los parámetros de constante solar, ángulo cenital, presión en la superficie, albedo del suelo, vapor de agua precipitable, concentración de ozono y turbiedad (Escamilla, 2010).

Por último, investigaciones previas de Sarsah y Uba (2013) establecen los modelos de regresión como una herramienta para la determinación de la radiación solar directa a partir de variables de entrada, tales como la velocidad y la dirección del viento, la radiación solar, la temperatura ambiente y las horas de sol, sin emplear un algoritmo para el cálculo de transmitancia. Bakirci (2008), Wu, Liu y Wang (2006), y Almorox, Hontoria, & Benito (2009) obtuvieron, a partir de estas variables de entrada, correlaciones que permitieron determinar modelos que se ajustan a las estimaciones de la radiación solar calculadas por mediante modelos estadísticos como el de Ångström- Prescott (1924), ya explicados. La validez de estos modelos es su principal desventaja, se debe a sus limitaciones temporales y geográficas.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La información meteorológica empleada en el presente

trabajo fue suministrada por el Instituto de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia [Ideam], tomando como referencia la *Estación meteorológica 29065030 Prado Sevilla*, localizada en el departamento del Magdalena (Colombia) en las coordenadas: 10°45' Latitud Norte, 74°09' Longitud Oeste, a una altura de 18 metros sobre el nivel del mar. Fue seleccionada por ser la estación meteorológica más cercana Barranquilla con la medición simultánea de la radiación solar, temperatura, humedad y horas de sol. El periodo de tiempo de los datos están comprendido entre Marzo de 2011 y Enero de 2012.

Una vez obtenida la información meteorológica se procedió a ordenarla y procesarla con el fin de obtener las parejas de datos que serán alimentadas para la realización de las regresiones planteadas, esto teniendo en cuenta que la información suministrada no es continua y que en muchas ocasiones presenta datos faltantes. Así mismo se realizaron análisis de varianza, tomando como factor de influencia las observaciones en un mismo mes, con el fin de establecer el comportamiento general de las variables.

Para la estimación del modelo estadístico que represente un mejor ajuste para los datos se establecieron cuatro ecuaciones.

La primera ecuación a emplear es la regresión lineal sugerida por Ångström-Prescott (1924) presentada en la Ecuación 1, que describe la correlación entre la proporcionalidad de la radiación solar directa y la radiación solar terrestre, y la duración del solar medida y la duración de sol teórica.

$$\frac{H_G}{H_0} = a + b \frac{S}{S_0} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde H_G es la radiación solar medida, H_0 es la radiación solar extraterrestre (teórica), S es la duración de las horas de sol medida y S_0 es la es la duración de las horas de sol teórica.

La segunda ecuación es la planteada Ögelman, Ecevit y Tasdemiroglu (1984) quienes, al igual que Angström-Prescott, establecen la correlación entre las proporcionalidades de la radiación solar y las horas de sol, pero plantean una ecuación cuadrática que describe el ajuste, tal y como se presenta en la Ecuación 2.

$$\frac{H_G}{H_0} = a + b \frac{S}{S_0} + c \left(\frac{S}{S_0}\right)^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

La tercera y cuarta ecuaciones empleadas en este estudio las presentan Binghamen, Mellit, y Alamia (2009), estableciendo una relación lineal entre la proporcionalidad de la radiación solar teórica y medida, y las proporcionalidades obtenidas entre la temperatura medida y la máxima (Ecuación 3) y la humedad relativa medida y la máxima (Ecuación 4).

$$\frac{H_G}{H_0} = a + b \frac{T}{T_{max}} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\frac{H_G}{H_0} = a + b \frac{HR}{HR_{max}} \quad \text{Ecuación 4}$$

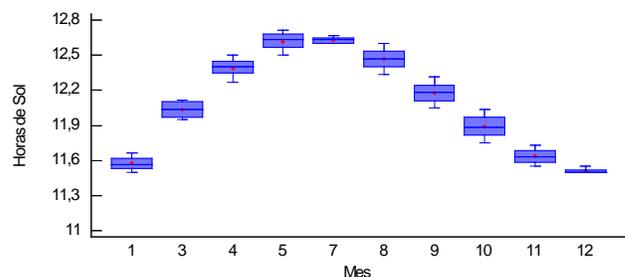
Para la selección del modelo se tendrá en cuenta el coeficiente estadístico R2 así como los resultados obtenidos del error absoluto medio.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el caso de las horas de sol, se puede inferir que los datos fluctúan en un rango no muy amplio de duración comprendidos entre 11.45 y 12.65 horas, asimismo se observa que los meses centrales del año presentan una mayor duración de las horas de sol (ver Figura 1).

Por último se puede inferir que se presenta una baja dispersión entre los datos recolectados en un mismo mes, lo cual se debe a la poca variación general de los datos soportados en la prueba de análisis de distribución de los datos, en la que se observa que los datos no tienden a ajustarse a un tipo de distribución establecida.

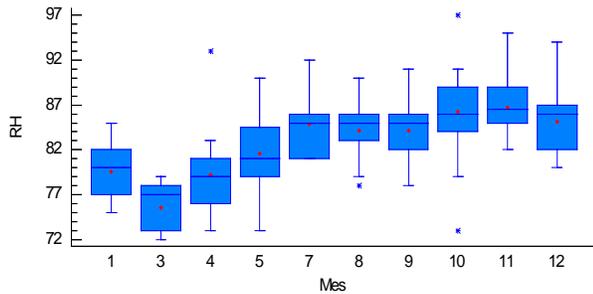
Figura 1. Medias mensuales de las horas de sol en un año



En cuanto a la humedad relativa, los análisis de distribución de los datos de un mismo mes, reportan mayor variabilidad, en comparación con la duración de las horas de sol y presentan un ligero descenso de la humedad en los primero meses del año (Figura 2). No obstante, la humedad relativa para la zona se reportó sobre 72%. Asimismo, los datos de humedad relativa se ajustan a una

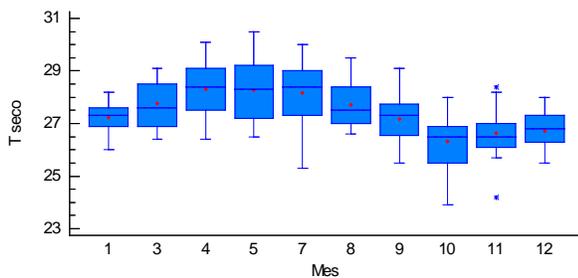
distribución normal en los valores recolectados a lo largo del año de muestreo.

Figura 2. Medias mensuales de la humedad relativa en un año



La temperatura reportada para el año de muestro evidencia, según la Figura 3, una amplia variabilidad en los datos del mismo mes de reporte; no obstante, esta variación a lo largo del año es escasa o muy estrecha, variando entre 23.9 y 30.5 grados centígrados, sin embargo las temperaturas tienden a acumularse hacia el extremo derecho, según lo reporta el análisis de distribución, evidenciando un ajuste de datos a una distribución logarítmica logística –y no normal–, aunque esta puede llegar a describir el comportamiento de los datos como una distribución normal.

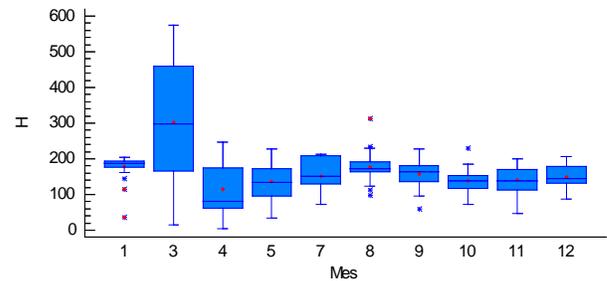
Figura 3. Medias mensuales de la temperatura en un año



Por último, los valores de radiación solar presentan alta variabilidad durante los meses de marzo y abril, la cual va disminuyendo a medida que avanza año, hasta presentar una baja variabilidad, como se aprecia en la Figura 4). Esta información se corrobora en el análisis de la distribución de los datos, la cual se ajusta a una curva logística desplazada a la derecha.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de los resultados estadísticos aplicados a los datos, resaltando los números de grupos homogéneos conformados que pueden ser corroborados de la Figura 1 a la Figura 4.

Figura 4. Medias mensuales de la Radiación solar en un año



En cuanto a las correlaciones propuestas por Ångström (1924), Ögelman et al., (1984) y Benghamen et al. (2009), la Figura 5 presenta las comparaciones entre las mediciones realizadas y las estimadas por el modelo. De ellas se puede inferir que en la regresión lineal entre la relación o razón de la radiación solar y la duración del sol se observa una baja relación, incrementándose ligeramente en la regresión cuadrática de estas mismas variables.

La baja correlación se puede atribuir al hecho de la poca variabilidad de las horas de sol frente a la alta variabilidad de la radiación solar. No obstante, las regresiones lineales entre la relación o razón de la radiación solar con la proporcionalidad de la temperatura y la humedad, presentan una mayor correlación, lo que es coherente con los resultados anteriores, donde se presenta una mayor variabilidad entre un mes y otro en la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar, lo que permite inferir las posibles relaciones.

Tabla 1. Resumen de los análisis de las series de tiempo de las variables meteorológicas

Parámetro	Rango	Media Anual	P-Valor ANOVA ^a	Grupos Homogéneos ^b
S	11.5 – 12.7	12.04	0.00	9
HR	72.0 – 97.0	83.33	0.00	5
T	23.9 – 30.5	27.30	0.00	5
HG	4.3 – 574.38	154.0	0.00	4

(a) P-crítico (0.05), si P-valor es menor que P-Crítico s existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media del parámetro entre un nivel de Mes y otro, con un nivel de confianza de 95%. (b) Establecidos por el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher.

Los resultados presentados sobre las regresiones no se ajustan a los valores de correlación R2 calculados por otros autores; para el caso de la regresión lineal entre la radiación solar y la hora de sol, Yorukoglu y Celik (2006) presenta un valor R2 de 85.9%, mientras que Benghanem et al (2009) presenta un valor de 97.28%, y Ahwide, Spena, y El-Kafrawy (2013) reportan valores de 31.4%, 14.4% y 46.65% en regresiones aplicadas en datos de Sabha, Ghdames y Trípoli de la Libia respectivamente. Ahora, si

se analizan los errores medios absolutos [MAE] se observan que los valores reportados por esta investigación son significativamente altos comparado con el presentado por Yorukoglu y Celik (2006) quienes reportan un valor de 0.0437.

Esta situación es muy similar a la presentada por la regresión cuadrática entre los valores de radiación solar y duración de las horas de sol, que muestran un valor R2 un poco más elevado que la regresión lineal anterior, pero que, no obstante, aún no alcanza a ser equiparable con el 86,6%, presentado por Yorukoglu y Celik (2006).

Por último Benghanem et al., (2009) presentan un

coeficiente R2 de 89.50% y 86.59%, para las relaciones de proporcionalidad entre la radiación solar, la temperatura y la humedad relativa, respectivamente. Comparando estos valores con los registrados en el presente proyecto se infiere que los valores, si bien son más altos que en los dos casos anteriores, no se aproximan a los registros presentados por Benghanem et al. (2009). Estas bajas relaciones se pueden atribuir a que, de los 11 meses de muestreo, solo se pudo trabajar con 246 datos de los 337 datos que se deben haber registrado.

En la Tabla 2 se presenta el resumen de los parámetros estadísticos arrojados por las regresiones aplicadas.

Figura 5. Comparación entre la radiación solar medida y la radiación solar estimada mediante las ecuaciones de (a) regresión lineal planteada por Ångström-Prescott (1924), (b) Regresión cubica planteada por Ögelman et al. (1984), (c) regresión lineal entre la radiación y la temperatura propuesta por Benghamen et al. (2009) y (d) (c) regresión lineal entre la radiación y la temperatura propuesta por Benghamen et al. (2009)

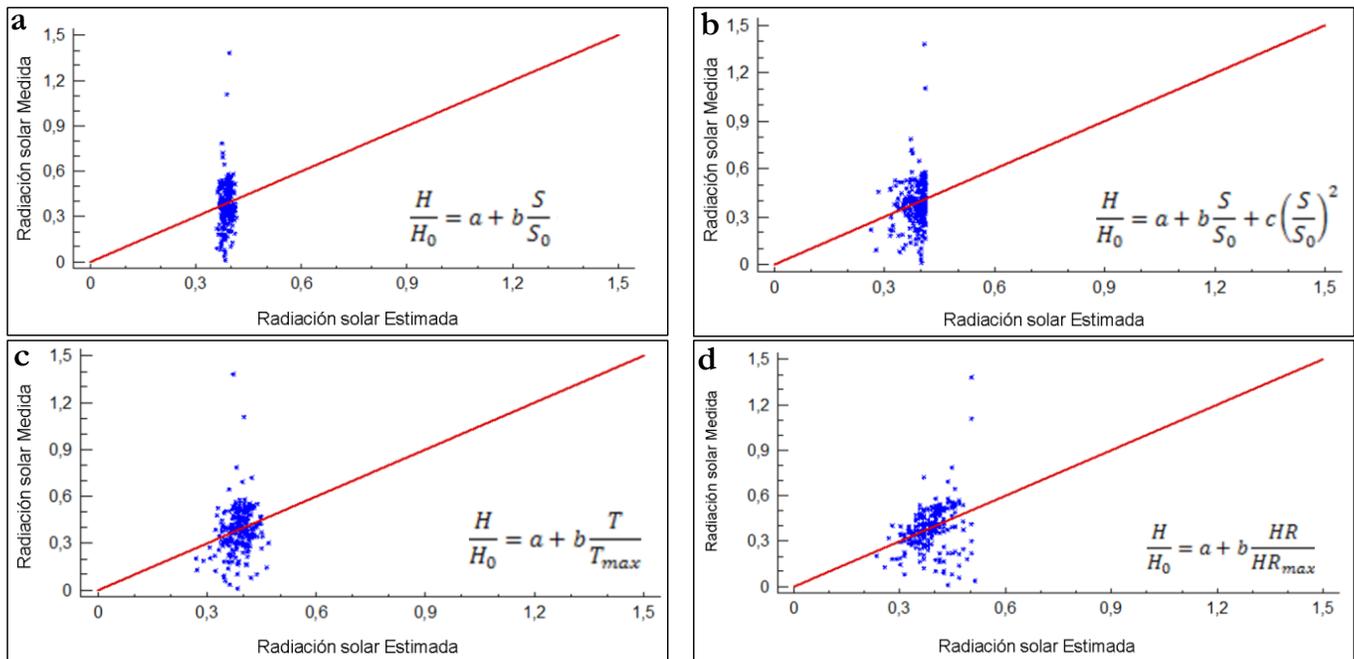


Tabla 2. Resumen de los parámetros estadísticos de las regresiones aplicadas

Función	Coeficiente de la Ecuación			Coeficiente R	Coeficiente R2	Error Medio Absoluto (MAE)
	a	b	C			
$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{S}{S_0}$	-11.24	11.49	--	0.081	0.664%	0.106
$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{S}{S_0} + c \left(\frac{S}{S_0}\right)^2$	-19776.3	39116.7	19342.4	--	3.252%	0.104
$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{T}{T_{max}}$	1.302	-1.124	--	-0.21	4.433%	0.103
$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{HR}{HR_{max}}$	1.316	-1.104	--	-0.33	11.14%	0.095

IV. CONCLUSIÓN

Las variables meteorológicas reportadas para el proyecto presentan poca variación en los datos observados durante el mismo mes; no obstante, reportan amplios cambios a lo largo del año, a pesar de su ubicación, cercana al Ecuador.

En cuanto a las correlaciones estadísticas, se puede concluir que los datos recopilados y observados no presentan un ajuste estadísticamente significativo en los diferentes tipos de modelos estudiados; sin embargo, sí se puede establecer que la humedad relativa guarda una mayor relación o ajuste, lo que permite concluir que es la variable climatológica que más influencia tiene sobre el modelo.

Por último, se puede establecer que el modelo que presenta el mejor ajuste para predecir la radiación solar para el área de estudio es la regresión propuesta por Binghamen et al., (2009), en función de la humedad relativa.

Se sugiere realizar los procedimientos aquí presentados con datos multianuales que permitan identificar, con mayor precisión, las variaciones multianuales a que tengan lugar las variables meteorológicas, y poder establecer una replicabilidad posible de los puntos que permitan comprobar la influencia de cada uno en las regresiones planteadas.

V. REFERENCIAS

- Ahwide, F., Spena, A., El-Kafrawy, A. (2013). Correlation for the average daily diffuse fraction with clearness index and estimation of beam solar radiation and possible sunshine hours fraction in Sabha, Ghdamenes and Tripoli-Libya. *APCBEE Procedia*, 5, 208-220
- Almorox, J., Bocco, M., & Willinton, E. (2013). Estimation of daily global solar radiation from measured temperatures at Cañada de Luque, Córdoba, Argentina. *Renewable Energy*, 60, 382-387
- Almorox, J., Hontoria, C., Benito, C. (2009). Models for obtaining daily global solar radiation with measured air temperature data in Madrid (Spain). *Applied Energy*, 88(5), 1703-1709
- Ångström-Prescott, A. (1924). Solar and terrestrial radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50(210), 121-125
- Bakirci, K (2009). Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey. *Energy*, 34(4), 485-501
- Bakirci, K. (2008). Correlations for estimation of solar radiation on horizontal surfaces. *Journal of Energy Engineering*, 134(4), 130-134
- Benghanem, M., Mellit, A., & Alamria, S.N. (2009). ANN-based modelling and estimation of daily global solar radiation data: A case study. *Energy Conversion and Management*, 50(7), 1644-1655
- Benmouiza, K. & Chekneane, A. (2013). Forecasting hourly global solar radiation using hybrid k-means and nonlinear autoregressive neural network models. *Energy Conversion and Management*, 75, 561-569.
- Bird, R. & Hulstrom, L.A. (1981). *Simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces*. Golden, CO: Solar Energy Research Institute.

- Bojanowski, J., Donatelli, M., Skidmore, A., & Vrieling, A. (2013). An auto-calibration procedure for empirical solar radiation models. *Environmental Modelling & Software* 49,118-128
- Escamilla, R. (2010). *Modelo atmosférico y de radiación solar para reconocimiento de firmas espectrales* [Proyecto de final de carrera]. Universidad Politécnica de Cataluña: Barcelona, España. Disponible en http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/9992/1/PFC_Raul_Escamilla.pdf
- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. Don Mills, ON: Academic Press
- Lucano, M.J., & Fuentes, I.E.M. (2010). Evaluación del potencial de radiación solar global en el departamento de Cochabamba utilizando modelos de sistemas de información geográfica e imágenes satelitales. *Revista Boliviana de Física*, 16(16), 13-21
- Ögelman, H., Ecevit, A., & Tasdemiroglu, E. (1984). A new method for estimating solar radiation from bright sunshine data. *Solar Energy*, 33(6), 619-625
- Sarsah, E.A. & Uba, F.A. (2013). Empirical correlations for the estimation of global solar radiation using meteorological data in WA, Ghana. *Advances in Applied Science Research*, 4(4), 63-71
- Turk, I.T. (2009). Estimation of Solar Radiation from Angstroms Coefficients by Using Geographical and Meteorological Data in Bishkek, Kyrgyzstan. *Journal of Thermal Science and Technology*, 29(2), 99-108
- Unidad de Planeación Minero Energética [UPME] - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2005). *Atlas de radiación solar de Colombia*. Bogotá, Colombia: UPME / IDEAM
- Wu, G., Liu, Y., & Wang, T. (2006) Methods and strategy for modeling daily global solar radiation with measured meteorological data – A case study in Nanchang station, China, *Energy Conversion and Management*, 48(9), 2447-2452
- Wu, J. & Keong-Chan, Ch. (2013). Prediction of hourly solar radiation with multi-model framework. *Energy Conversion and Management*, 76, 347–355
- Yorukoglu, M. & Celik, A.N. (2006). A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration. *Energy Conversion and Management*, 47(15-16), 2441-2450

CURRÍCULOS

Andrés M. Vélez-Pereira. Ingeniero Ambiental y Sanitario de la Universidad del Magdalena, con Maestría en Tecnología Ambiental de la Universidad de Huelva y la Universidad Internacional de Andalucía, Especialista en Gestión Ambiental de la Universidad del Magdalena. Director del Programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad de la Costa, Docente catedrático en la Especialización en Gestión Ambiental Empresarial de la Universidad de la Costa y Docente Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad del Magdalena. Amplia experiencia en temas de investigación asociados a calidad del aire, aerobiología y meteorológica. Miembro del grupo de investigación Biotecnológico Ambiental

Eliana Vergara Vasquez. Ingeniera Ambiental y Sanitaria, Candidata a Magister en Ciencias Ambientales, Docente de tiempo completo de Ingeniería Ambiental y Coordinadora de la Especialización en Gestión Ambiental Empresarial, con experiencia en el desarrollo de programas ambientales, sólida formación en investigación relacionada con el monitoreo de la calidad atmosférica y el manejo de tecnologías aplicadas. Pertenece al grupo de investigación

Biocientífico Ambiental y es líder del semillero Monitoreo y Control de la Contaminación atmosférica [GECCA] de la Universidad de la Costa-CUC.

William Barraza Coronell. Estudiante de X semestre de Ingeniería Ambiental de la Universidad de la Costa. Líder del semillero Monitoreo y Control de la Contaminación atmosférica [GECCA] de la Facultad de Ciencias Ambientales en la Universidad de la Costa.

Diana Agudelo Yepes. Estudiante de X semestre de Ingeniería Ambiental de la Universidad de la Costa. Integrante del semillero Monitoreo y Control de la Contaminación atmosférica [GECCA] de la Facultad de Ciencias Ambientales en la Universidad de la Costa.