

# Modelación de la radiación solar para el sistema de bombeo fotovoltaico en el riego por aspersión



## Modeling of solar radiation for the photovoltaic pumping system in sprinkler irrigation

<https://cu-id.com/2177/v33n4e07>

✉ Yaily Beltran Perez<sup>I\*</sup>, ✉ Oscar Brown Manrique<sup>II</sup>, ✉ Nestor Mendez Jurjo<sup>II</sup>, ✉ Isaf Álvarez Sevilla<sup>III</sup>

<sup>I</sup>Cooperativa de Producción Agropecuaria 8 de marzo, Ciego de Ávila, Cuba.

<sup>II</sup>Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez (UNICA), Ciego de Ávila, Cuba.

<sup>III</sup>Instituto de Fomento Municipal, Guatemala.

**RESUMEN:** Los modelos matemáticos son fundamentales para la simulación de radiación solar, ya que el diseño eficaz, la optimización del rendimiento de los sistemas fotovoltaicos y garantizan un suministro estable de energía eléctrica. El presente estudio se desarrolló en la Unidad Básica de Producción Cooperativa Delia con el objetivo de estimar la radiación solar para el sistema de bombeo fotovoltaico del riego por aspersión en el cultivo del frijol. La metodología utilizada consistió en la aplicación del modelo de Hottel para determinar las componentes de la radiación solar sobre superficie horizontal y el método de Solener en función de la inclinación de la superficie del panel fotovoltaico. Los resultados demostraron que la radiación solar global que se produce sobre un plano horizontal para los municipios de Venezuela, Primero de Enero, Morón y Sancti Spiritus en los diferentes meses del año varía entre 3952,07 y 10626,30 W m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>. La radiación solar global que incide sobre la superficie del panel fotovoltaico colocado con una inclinación de 21° permite incrementar el valor de esta variable entre 12 y 30% mejorando la cantidad de horas de sol pico diariamente para el funcionamiento del generador fotovoltaico.

**Palabras clave:** componentes de la radiación solar, energía solar, panel fotovoltaico.

**ABSTRACT:** Mathematical models are fundamental for the simulation of solar radiation; allowing the effective design, optimization of the performance of photovoltaic systems and guaranteeing a stable supply of electrical energy. The present study was developed at the Delia Cooperative Basic Production Unit with the objective of estimating solar radiation for the photovoltaic pumping system for sprinkler irrigation in bean cultivation. The methodology used consisted of the application of the Hottel model to determine the components of solar radiation on a horizontal surface and the Solener method based on the inclination of the surface of the photovoltaic panel. The results showed that the global solar radiation that occurs on a horizontal plane for the municipalities of Venezuela, Primero de Enero, Morón and Sancti Spiritus in the different months of the year varies between 3952.07 and 10626.30 W m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>. The global solar radiation that falls on the surface of the photovoltaic panel placed with an inclination of 21° allows increasing the value of this variable between 12 and 30%, improving the number of peak sun hours daily for the operation of the photovoltaic generator.

**Keywords:** components of solar radiation, solar energy, photovoltaic panel.

## INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la radiación solar global es esencial para muchas aplicaciones, tales como el uso de la energía solar como fuente alterna, modelos de simulación de crecimiento de los cultivos, en la arquitectura en el diseño de sistemas, estimación de la evapotranspiración, entre otras; sin embargo, la

disponibilidad de datos de radiación solar global es escasa, haciendo que el uso de técnicas numéricas sea una alternativa esencial. Con tales técnicas indirectas, otros datos meteorológicos son matemáticamente explorados con el fin de estimar la cantidad de radiación solar global que llega a la tierra y la radiación global (Ayllón, 2012).

\*Autor para correspondencia: Yaily Beltran-Perez, e-mail: [yailybeltran@gmail.com](mailto:yailybeltran@gmail.com)

Recibido: 03/01/2024

Aceptado: 05/09/2024

Los autores de este trabajo declaran no tener conflicto de intereses.

**CONTRIBUCIONES DE AUTORES:** **Conceptualización:** Y. Beltran. **Curación de datos:** O. Brown, Y. Beltran, N. Mendez. **Investigación:** Y. Beltran, O. Brown. **Metodología:** O. Brown, Y. Beltran, I. Álvarez. **Supervisión:** O. Brown, Y. Beltran. **Validación:** O. Brown, Y. Beltran, N. Mendez. **Papeles/Redacción, borrador original:** O. Brown, Y. Beltran. **Redacción, revisión y edición:** O. Brown, Y. Beltran, N. Mendez.

Artículo bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

La determinación de la radiación solar es un objetivo de carácter estratégico para el desarrollo de la sociedad [De la Casa et al. \(2023\)](#); sin embargo, la medición de esta variable sólo se efectúa en un número limitado de estaciones meteorológicas [Goodin et al. \(1999\)](#) y como consecuencia es el elemento menos evaluado del clima y constituye una información de escasa disponibilidad.

La producción de alimentos requiere, entre muchos aspectos, el suministro de recursos básicos como agua y energía eléctrica que se logra mediante sistemas de riego que permitan un uso más racional del agua para el desarrollo óptimo de los cultivos, pero a costa de un aumento de la demanda de energía eléctrica; sin embargo, las áreas rurales no siempre cuentan con una red de energía eléctrica cercana, por lo que la utilización de la energía solar fotovoltaica, constituye una solución sustentable que mejora el rendimiento de la actividad agrícola ([García et al., 2013](#); [Ferreira et al., 2022](#)).

Por otra parte, la dificultad para la obtención de datos de radiación global diaria por el alto costo y mantenimiento de los equipos de medición, ha propiciado el desarrollo de modelos para estimar esta variable meteorológica ([Miller et al., 2008](#)). A partir de lo anteriormente expuesto, el presente trabajo tiene como objetivo modelar la radiación solar para el sistema de bombeo fotovoltaico en el riego por aspersión.

## MATERIALES Y METODOS

El experimento se realizó en la Unidad Básica de Producción Cooperativa (UBPC) Delia, ubicada en el municipio Primero de Enero en la provincia de Ciego de Ávila, situada por los 21° 45' de latitud Norte y los 78° 14' de longitud Oeste. El suelo es del tipo Ferralítico Rojo Típico y se correlaciona con el orden Ferralsoles según la base referencial mundial del recurso suelo WRB ([Palma et al., 2017](#)). Sus principales características hidrofísicas se presenta en la [Tabla 1](#) con punto de marchites de 21,22 % en base al suelo seco (bss) y velocidad de infiltración de 2,20 mm día<sup>-1</sup>.

La radiación solar sobre un plano horizontal, a nivel de la tierra se simuló con la utilización del modelo de Hottel [Álvarez et al. \(2021\)](#) el cual calcula la radiación transmitida a través de la atmósfera clara, en función del ángulo cenital, la altitud para una atmósfera estándar y el tipo de clima. La radiación directa en función del ángulo cenital está dada por la expresión:

$$R_{DIR}(\theta_z) = a_0 + a_1 e^{\left(\frac{-k}{\cos\theta_z}\right)} \quad (1)$$

$$a_0 = r_0 [0,4237 - 0,00821(6,0 - Z)^2] \quad (2)$$

$$a_1 = r_1 [0,5055 + 0,00595(6,5 - Z)^2] \quad (3)$$

$$a_k = r_k [0,2711 + 0,01858(2,5 - Z)^2] \quad (4)$$

Donde  $R_{DIF}(\theta_z)$  es la radiación difusa respecto al ángulo cenital ( $W m^2 día^{-1}$ ),  $a_0$ ,  $a_1$  y  $k$  son constantes,  $Z$  la altitud de la localidad sobre el nivel del mar (km);  $r_0$ ,  $r_1$  y  $r_k$  los factores de corrección que adquieren valores de 0,95, 0,98 y 1,02 respectivamente para el clima tropical según [Álvarez et al. \(2014\)](#); [Mossande et al. \(2015\)](#).

La declinación solar,  $\delta$  (°) que indica la posición angular del Sol al mediodía solar, respecto del plano del ecuador tiene en cuenta el día del año,  $d_a$  y el coseno del ángulo cenital,  $\theta_z$  que muestra la posición del Sol respecto a la vertical. Este parámetro se calculó como sigue:

$$\delta = 23,45 \text{sen} \left[ \frac{2\pi(284 + d_a)}{365} \right] \quad (5)$$

$$\cos\theta_z = \sin\phi \cdot \sin\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega_s \quad (6)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan\phi) \cdot \tan\delta \quad (7)$$

Donde  $\phi$  es la latitud geográfica (°), que señala la posición angular del lugar donde se encuentra el panel fotovoltaico respecto del ecuador terrestre. Es positivo en el hemisferio norte y negativo en el sur;  $\omega_s$  el ángulo horario al alba o al ocaso (radianes).

La radiación difusa sobre superficie horizontal, en función del ángulo cenital se calculó por la ecuación de [Liu & Jordan \(1960\)](#) y las radiaciones directa, difusa y global sobre el plano horizontal se determinaron según las ecuaciones siguientes:

$$R_{DIF}(\theta_z) = 0,2710 - 0,2939R_{DIR}(\theta_z) \quad (8)$$

$$R_{DIR(0)} = R_{DIR}(\theta_z)R_{E(0)}\cos\theta_z \quad (9)$$

$$R_{DIF(0)} = R_{DIF}(\theta_z)R_{E(0)}\cos\theta_z \quad (10)$$

**TABLA 1.** Propiedades hidrofísicas del suelo.

Profundidad (cm)	Capacidad de campo (%bss)	Densidad aparente (g cm <sup>-3</sup> )	Arena %	Limo %	Arcilla %
0 - 10	35,10	1,03	19,50	20,01	60,49
11 - 20	34,46	1,03	18,42	17,26	64,32
21 - 30	35,48	1,03	21,80	15,92	62,28

$$R_{G(0)} = R_{DIR(0)} + R_{DIF(0)} \quad (11)$$

Donde  $R_{DIR(0)}$  es la radiación directa ( $W\ m^2\ día^{-1}$ ),  $R_{DIF(0)}$  la radiación difusa ( $W\ m^2\ día^{-1}$ ),  $R_{E(0)}$  la radiación extraterrestre diaria mensual sobre superficie plana ( $W\ m^2\ día^{-1}$ ),  $R_{G(0)}$  la radiación global ( $W\ m^2\ día^{-1}$ ).

La determinación de las componentes de la radiación solar en función de la inclinación de la superficie del panel fotovoltaico se realizó a partir del conocimiento previo de la radiación global, radiación extraterrestre, radiación directa, radiación difusa sobre una superficie plana y el coeficiente de reflectividad o albedo ( $\rho$ ) con valor de 0,20 (López et al., 2023). A partir de la inclinación del panel, el índice de claridad y la fracción de difusa se obtuvieron de las ecuaciones siguientes:

$$I_C = \frac{R_{G(0)}}{R_{E(0)}} \quad (12)$$

$$F_{DIF} = \frac{R_{DIF(0)}}{R_{G(0)}} = 1 - 1.13I_C \quad (13)$$

Donde  $I_C$  el Índice de claridad (adim.),  $R_{G(0)}$  la radiación global ( $W\ m^2\ día^{-1}$ ),  $F_{DIF}$  la fracción de difusa (adim.).

Las radiaciones directa, difusa, reflejada y global sobre la superficie inclinada del panel fotovoltaico se obtuvieron como:

$$R_{DIR(\beta)} = R_{G(0)}(1 - F_{DIF})R_B \quad (14)$$

$$R_{DIF(\beta)} = \frac{1 + \cos\beta}{2}R_{G(0)}I_C \quad (15)$$

$$R_{REF(\beta)} = \frac{1 - \cos\beta}{2}\rho R_{G(0)} \quad (16)$$

$$R_{G(\beta)} = R_{DIR(\beta)} + R_{DIF(\beta)} + R_{REF(\beta)} \quad (17)$$

Donde  $R_{DIR(\beta)}$  la radiación directa ( $W\ m^2\ día^{-1}$ );  $R_{DIF(\beta)}$  la radiación difusa ( $W\ m^2\ día^{-1}$ );  $R_{REF(\beta)}$  la

radiación reflejada ( $W\ m^2\ día^{-1}$ );  $R_{G(\beta)}$  la radiación global ( $W\ m^2\ día^{-1}$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSION

En la [Figura 1](#) se expone el comportamiento de la radiación solar global referida a una superficie horizontal para el municipio Primero de Enero. Estos valores fueron obtenidos a partir de la simulación matemática mediante el método de Hottel. Se puede observar el comportamiento de la radiación global en los diferentes meses del año, encontrándose valores comprendidos entre los 3952,07 y 10626,30  $W\ m^2\ día^{-1}$  que es el rango de energía solar fotovoltaica que se tiene disponible en estas localidades para la generación de energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de sistemas de riego accionado con este tipo de energía renovable.

El valor medio de esta variable oscila entre 6,5 y 8,3  $kW\ m^2\ días^{-1}$  en la provincia de Ciego de Ávila; mientras que el mapa de radiación solar en Cuba, elaborado por el Instituto de Meteorología de Cuba, ofrece valores comprendido entre 6,4 a 6,6  $kW\ m^2\ días^{-1}$ . Las diferencias pueden ser atribuibles a que estos valores son estimaciones acertadas en el país; pero no responden a mediciones sistemáticas realizadas en estas localidades; pues estas carecen de los instrumentos requeridos para este tipo de observación.

La [Figura 2](#) se muestra el comportamiento de la radiación solar global para una inclinación del panel de  $21^\circ$ , que es el recomendado para los sistemas fotovoltaicos en Cuba. Se observa que los valores varían entre 4657,26 y 18656,07  $W\ m^2\ día^{-1}$  durante todo el año; correspondiendo la mayor energía solar a los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre los cuales presentaron valores superiores a los 11400  $W\ m^2\ día^{-1}$ . La dinámica de la radiación solar indica una disminución notable de esta variable en los meses de noviembre, diciembre y enero; con valores de 5147,93; 4124,19 y 4657,26  $W\ m^2\ día^{-1}$  respectivamente.

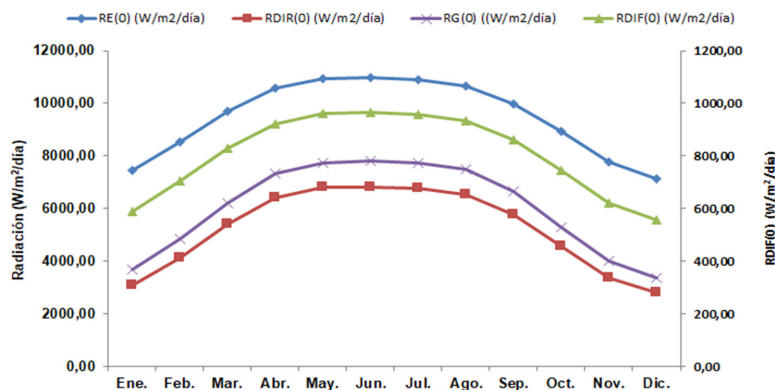


FIGURA 1. Radiación solar sobre una superficie horizontal.

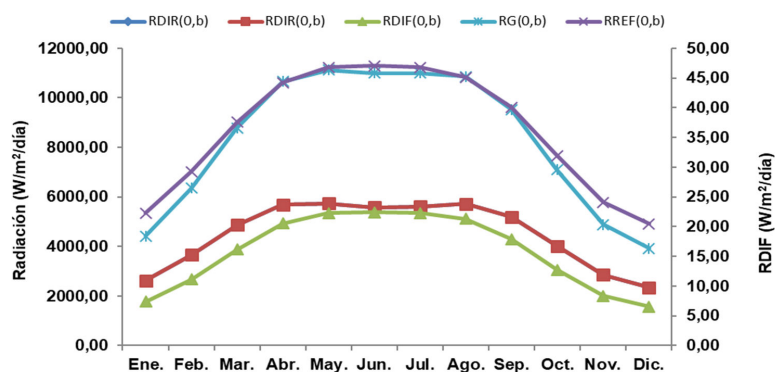


FIGURA 2. Radiación solar sobre el panel fotovoltaico con inclinación de 21°.

La utilización de una determinada inclinación del panel es un aspecto de gran importancia en el diseño de los sistemas fotovoltaico porque además de permitir mayor captación de radiación solar incidente, ofrece además la ventaja de garantizar el drenaje del agua y reducir la acumulación de polvo sobre la superficie del panel. En este sentido, estudios realizados en Cuba por [Díaz et al. \(2018\)](#) donde analizaron la influencia del ángulo de inclinación en los módulos solares sobre la generación de una central fotovoltaica, permitió comprobar que el ángulo de inclinación óptimo es igual a la latitud del lugar donde se van a instalar los parques fotovoltaicos.

La estimación de la radiación solar global mediante la modelación matemática es de gran importancia para las condiciones de los municipios de la provincia de Ciego de Ávila, debido a la carencia de instrumentos para la medición de esta variable climática. La aplicación de herramientas de este tipo favorece a muchos países que no poseen estaciones meteorológicas para la medición de los datos de radiación solar, la cual es requerida para la determinación del potencial y el desempeño de los sistemas fotovoltaicos ([Andrade & Blacutt, 2010](#)).

[Grajales \(2018\)](#) realizó la validación de diferentes modelos de estimación de la radiación solar incidente sobre una superficie horizontal en el municipio de Dosquebradas, departamento de Risaralda en Colombia. En el proceso se realizó también una simulación de la radiación solar sobre superficies óptimamente inclinadas; obteniéndose en todos los casos resultados satisfactorios.

En este sentido [Mossande et al. \(2015\)](#) aplicaron el Modelo de Hottel y Solener para la estimación de la radiación solar en condiciones de un plano horizontal y la inclinación del panel fotovoltaico según la latitud del lugar. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios y se utilizaron en el diseño de un sistema de riego solar fotovoltaico por goteo para la producción de tomate en el valle de Cavaco, República de Angola, en un área experimental de 0,23 ha. Las evaluaciones realizadas en cuanto al manejo y funcionamiento del sistema demostraron la validez de la metodología empleada para las condiciones de aridez imperante en esta localidad

## CONCLUSIONES

- La radiación solar global que se produce sobre un plano horizontal estimada por el modelo de Hottel para el municipio Primero de Enero varía entre 3952,07 y 10626,30 W m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>.
- La radiación solar global que incide sobre la superficie del panel fotovoltaico colocado con una inclinación de 21° estimada por el modelo de Solener permite incrementar el valor de esta variable entre 12 y 30%.
- En los municipios evaluados es posible disponer entre 4,0 y 6,4 horas de sol pico diariamente en los meses más críticos del año. Estos son datos que deben tenerse en cuenta para el diseño del generador fotovoltaico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁLVAREZ, H.O.; MONTAÑO, P.T.; MALDONADO, C.J.: "La radiación solar global en la provincia de Loja, evaluación preliminar utilizando el método de Hottel", *Ingenius*, 11: 25-31, 2014, ISSN: 1390-650X.
- ÁLVAREZ, O.H.; GUTIERREZ, T.D.J.; MOLINA, D.: "Estudio preliminar de la radiación solar global en Cuba a partir de modelos teóricos", *Revista de Climatología*, 21: 15-25, 2021, ISSN: 1578-8768.
- ANDRADE, M.F.; BLACUTT, L.A.: "Evaluación del modelo climático regional PRECIS para el área de Bolivia: comparación con datos de superficie", *Revista Boliviana de Física*, 16(16): 1-12, 2010, ISSN: 1562-3823.
- AYLLÓN, V.G.: "Comparación de métodos de estimación de la radiación solar en Maracay, Venezuela", *Agronomía Tropical*, 62(1-4): 139-146, 2012, ISSN: 0002-192X.
- DE LA CASA, A.; OVANDO, G.; RODRÍGUEZ, A.: "Estimación de la radiación solar global en la provincia de Córdoba, Argentina, y su empleo en un modelo de rendimiento potencial de papa", *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 32(2): 45-61, 2023, ISSN: 0325-8718.

- DÍAZ, S.R.; CASTRO, F.M.; SANTOS, F.A.; VILARAGUT, L.M.: “Análisis de la influencia del ángulo de inclinación en la generación de una central fotovoltaica”, *Revista de Ingeniería Energética*, 39(3): 146-156, 2018, ISSN: 1815-5901.
- FERREIRA, da S.O.A.P.; VARGAS, R.P.; DORTA, A.A.; FERNÁNDEZ, H.K.; HERNÁNDEZ, R.I.; MÉNDEZ, J.A.: “Uso de energías renovables en procesos agropecuarios para producir alimentos”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 31(1): 52-66, 2022, ISSN: 2071-0054.
- GARCÍA, M.F.; BEDOYA, F.J.; LÓPEZ, M.G.A.: “Modelo a escala de un sistema de riego automatizado, alimentado con energía solar fotovoltaica: nueva perspectiva para el desarrollo agroindustrial colombiano”, *Tecnura*, 17(2 Especial): 33-47, 2013, ISSN: 2248-7638.
- GOODIN, D.G.; HUTCHINSON, M.S.; VANDERLIP, R.L.; KNAPP, M.C.: “Estimating solar irradiance for crop modeling using daily air temperature data”, *Agronomy Journal*, 91: 845-851, 1999, DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1999.915845x>.
- GRAJALES, H.J.D.: “Modelo de estimación de radiación solar incidente sobre superficies horizontales e inclinadas en el CDITI para implementación de sistemas solares fotovoltaicos”, *Revista Teinova*, 3: 57-62, 2018, ISSN: 2500-7211.
- LIU, B.; JORDAN, R.: “The interrelationship and characteristics distribution of direct, diffuse and total solar radiation”, *Solar Energy*, 4(3): 1-19, 1660, DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(60\)90062-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(60)90062-1).
- LÓPEZ, P.V.P.; HERRERA, P.V.I.; MARCATOMA, T.J.A.; RAMOS, A.C.E.: “Validación del modelo Bristow-Campbell como método de estimación de la radiación solar en Riobamba con fines de generación fotovoltaica. Polo del Conocimiento”, *Revista científico-profesional*, 8(5): 1325-1346, 2023, ISSN: 2550-682X.
- MILLER, D.G.; RIVINGTON, M.; MATTHEWS, K.B.; BUCHAN, K.; BELLOCCHI, G.: “Testing the spatial applicability of the Johnson-Woodward method for estimating solar radiation from sunshine duration data”, *Agr. Forest. Meteorol.*, 148: 466-480, 2008, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.10.008>.
- MOSSANDE, R.A.; BROWN, M.O.; MUJICA, C.A.; MATA, R.C.; OSORIO, L.I.: “Riego por goteo con energía solar para el tomate en Cavaco, Benguela, Angola”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(2): 11-17, 2015, ISSN: 2071-0054.
- PALMA, L.D.J.; ZAVALA, C.J.; BAUTISTA, Z.F.; MORALES, G.M.A.; LÓPEZ, C.A.: “Clasificación y cartografía de suelos del estado de Campeche, México”, *Agro Productividad*, 10(12): 71-78, 2017.

Yaily Beltran-Perez. MSc., Especialista Principal, Cooperativa de Producción Agropecuaria 8 de Marzo, Ciego de Ávila, Cuba.

Oscar Brown-Manrique. Dr.C., Prof. Titular, Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez (UNICA), Centro de Estudios Hidrotécnicos (CEH), Ciego de Ávila, Cuba. e-mail: [obrown@unica.cu](mailto:obrown@unica.cu)

Nestor Mendez-Jurjo. Dr.C., Prof. Titular, Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez (UNICA), Departamento de Ingeniería Hidráulica, Ciego de Ávila, Cuba. e-mail: [nestorm@unica.cu](mailto:nestorm@unica.cu)

Isaí Álvarez-Sevilla. Dr.C., Supervisor de Obras, Instituto de Fomento Municipal, Guatemala. e-mail: [aisaithomas2002@gmail.com](mailto:aisaithomas2002@gmail.com)

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a fines de identificación, no existe ningún compromiso promocional relacionado con los mismos, ni para los autores ni para el editor.