

MODELOS DE POSICIONAMIENTO Y DE RADIACIÓN SOLAR ADECUADOS AL VERANERO

**Guillermo Saura González y Ricardo Osés Rodríguez,
Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara**

Recibido: Junio/2005

Aceptado: Junio/2005

En el proceso de cálculo y diseño de cámaras de crecimiento para el cultivo *in vitro* de caña de azúcar se necesita, entre otras cosas, de información sobre el posicionamiento solar y las características climatológicas de la radiación solar en la localidad donde se ubicará la instalación. Este trabajo presenta los modelos de posicionamiento solar así como un estudio estadístico del recurso solar local, especialmente de las series de radiación solar total horaria y diaria para la ciudad de Santa Clara, utilizando la metodología del análisis estadístico descriptivo para los datos observados de la serie temporal de la estación meteorológica de superficie de Santa Clara, en el período de 1977 a 2003.

Palabras clave: Posicionamiento solar, radiación solar, veranero.

EARTH-SUN POSITIONING MODELS AND AVAILABLE SOLAR RADIATION ADEQUATED TO THE VERANERO

In the design process of growing chambers for *in vitro* sugar cane cultivation is necessary to know about the earth-sun positioning and the local solar radiation climatology. The models of earth-sun positioning and an statistic study of the local solar resource are presented in this paper, also the diary and hourly total radiation series are characterized by Santa Clara city, employing the descriptive statistic methodology for observed data of the meteorological station of Santa Clara in the period of 1977 to 2003.

Key words: Earth-sun positioning, solar radiation, veranero.

INTRODUCCIÓN

Al diseñar energéticamente cualquier instalación solar se debe partir de la tarea técnica o necesidad que se tiene y de ahí ver la disponibilidad del recurso solar en la localidad, para que posteriormente se apliquen las herramientas y procedimientos disponibles hasta obtener un diseño completo.

Esta investigación plantea los modelos de posicionamiento solar para el veranero que es utili-

zado como cámara de crecimiento para el cultivo *in vitro* de caña de azúcar en una biofábrica de Villa Clara. También se estudian las características climáticas de radiación solar en la localidad donde se ubica la instalación.

Existen varias metodologías bien establecidas para el cálculo del posicionamiento solar de una instalación,^{2, 8, 4, 9} pues es primordial la atención que se debe prestar a mantener y ser consecuente con el sistema de ángulos escogido, así como

* Licenciado del Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara. E-mail: cubasolar@civc.inf.cu.

los convenios de signos para estos. Estas metodologías se encuentran en la literatura científica, por lo que no hay necesidad de crear nuevos conocimientos para el caso del veranero, por ello solo se contempla su adecuación para aplicar el modelo sobre la base del conocimiento que ya existe.

La información climática de la radiación solar en la localidad se puede resumir en un conjunto de series “típicas” de duración anual que describen los patrones de comportamiento normal de la irradiación global, ya sea horaria, diaria, decenal o mensual sobre una superficie horizontal. Así, el año tipo o normal puede ser representado por estas series típicas y los modelos matemáticos para expresarlas.^{1, 3, 6, 7}

Por todo lo anteriormente señalado los autores plantean como objetivo obtener los datos de posicionamiento solar para el veranero y caracterizar climatológicamente la radiación solar en su zona de ubicación.

DESARROLLO

Para determinar el posicionamiento solar del veranero se buscaron sus ordenadas geográficas, así como las orientaciones de sus superficies. Se aplicó la metodología que se describe a continuación.

Las relaciones geométricas entre un plano de una determinada orientación respecto a la tierra en cualquier momento (comoquiera que el plano se encuentre fijo o en movimiento relativo a la tierra) y los rayos solares provenientes del sol, o sea la posición relativa del sol con ese plano, puede ser descrita en términos de varios ángulos.^{2, 8, 4, 9} Estos ángulos y las relaciones entre ellos son las siguientes:

f: Latitud, $-90^\circ \leq f \leq 90^\circ$

d: Declinación, Positivo al norte. $-23,45^\circ \leq d \leq 23,45^\circ$

b: Inclinación, $0^\circ \leq b \leq 180^\circ$

g: Azimut, cero al sur, negativo al este, positivo al oeste, $-180^\circ \leq g \leq 180^\circ$

w: Ángulo horario, negativo en la mañana, positivo en la tarde.

q: Ángulo de incidencia,

La declinación (d) se calcula a través de la ecuación de Cooper (2)(8),

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{(284 + n)}{365} \right) \quad (1)$$

donde:

d: Está en grados y n representa el número del día.

Para el ángulo horario (w) se tiene que (2)(8)(4)(9):

$$W = 15 (t_s - 12) \quad (2)$$

Aquí w está en grados, el tiempo solar t_s en horas y f en grados.

Una ecuación importante para relacionar el tiempo solar con el local es la siguiente (2)(8)(4)(9):

$$\text{Tiempo local} = t_s - \frac{EOT}{60} + LC + D, \text{ en horas} \quad (3)$$

donde:

EOT: Es la ecuación del tiempo y se calcula según Woolf (2), como:

$$EOT = 0,258 \cos X - 7,416 \operatorname{sen} X - 3,648 \cos 2X - 9,228 \operatorname{sen} 2X \quad (4)$$

donde:

EOT: se obtiene en minutos

$$X = \frac{360(n-1)}{365.242} \text{ en grados} \quad (5)$$

LC: Corrección de la longitud:

$$LC = \frac{\left(\begin{matrix} \text{longitud} \\ \text{local} \end{matrix} \right) - \left(\begin{matrix} \text{longitud del meridiano} \\ \text{estándar de la zona temporal} \end{matrix} \right)}{15}$$

(en horas) (6)

D: ahorro,

$$\left\{ \begin{array}{l} D = 1: \text{ si hay horario de ahorro} \\ D = 0: \text{ si no hay horario de ahorro} \end{array} \right\}$$

Los ángulos f , d , w pertenecen al sistema de posicionamiento tierra-sol y se relacionan con los ángulos α , q_z y A , que pertenecen al sistema observador-sol, a través de las expresiones siguientes (8)(9):

$a = \arcsen(\sen d \sen f + \cos d \cos w \cos f)$
donde: α : Altitud solar

$$A = \arcsen\left(\frac{-\cos \delta \sen w}{\cos \alpha}\right) \quad (8)$$

donde:

A: Azimut solar,

q_z : Ángulo zenital del sol

$$q_z = 90^\circ - \alpha \quad (9)$$

La ecuación principal del posicionamiento solar es la que relaciona el ángulo de incidencia de la radiación q y los otros ángulos (2)(8)(4)(9).

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sen \delta \sen \phi \cos \beta - \sen \delta \cos \phi \sen \beta \cos \gamma \\ &+ \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos w + \cos \delta \sen \phi \sen \beta \cos \gamma \\ &\cos w + \cos \delta \sen \beta \sen \gamma \sen w \end{aligned} \quad (10)$$

En lo referente al posicionamiento solar se debe señalar que el veranero, para ser empleado como cámara de crecimiento *in vitro*, se ubica de manera que quede insertado en el proceso productivo de la biofábrica, así se encuentra en el segundo nivel del edificio orientado longitudinalmente norte-sur, y presenta una estructura geométrica similar a la de un paralelepípedo rectangular, aunque solo es ligeramente más largo que ancho, su techo es horizontal y su área es transparente, por lo que filtra la radiación solar.

Para un techo horizontal, como es el caso del veranero construido y utilizado como cámara de crecimiento *in vitro*, se tiene que $b = 0^\circ$

entonces q es q_z (ángulo zenital del sol) y la expresión (11) se reduce a:

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \phi \cos w + \sen \delta \sen \phi \quad (11)$$

el número de horas-luz se calcula como:

$$N = \frac{2}{15} \cos'(\tan \phi \tan \delta) \quad (12)$$

También es posible emplear los datos observados de N.

La metodología descrita anteriormente fue montada en la hoja de cálculo de *Microsoft Excel*, lo que permitió la determinación de q y demás magnitudes.

En la tabla 1 se muestra la marcha mensual histórica de la insolación y la nubosidad. Como puede observarse la insolación, al igual que la nubosidad presenta un patrón en su marcha anual con un máximo y un mínimo bien definidos en el año. Así tenemos en abril el máximo valor de insolación, y en diciembre el mínimo, para el caso de la nubosidad su mínimo se presenta en febrero mientras su máximo se da en septiembre.

Como este estudio sirve de entrada a otros en los que se modelará el veranero se montaron estas ecuaciones según este algoritmo en una hoja de cálculo de *Microsoft Excel*.

Para la caracterización climática del recurso solar local, se procesaron las observaciones registradas y archivadas por el Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara, correspondientes al período 1977-2003, para las variables siguientes: Nubosidad, N_b [octavos de cielo cubierto], Insolación, I_n [horas-luz], Radiación solar total diaria, H_t [kWh/m²].

También se analizó otra variable que normalmente no forma parte de una caracterización climática, pero que en este caso es imprescindible, así se tiene la radiación solar total horaria, I_1 [kW/m²].

Tabla 1. Marcha mensual histórica de la insolación y la nubosidad para Santa Clara

Mes	Insolación (horas)	Nubosidad (Octavos)	Mes	Insolación (horas)	Nubosidad (Octavos)
Enero	6,70	3,36	Julio	7,83	4,11
Febrero	7,73	3,17	Agosto	7,57	4,26
Marzo	8,18	3,25	Septiembre	6,80	4,52
Abril	8,71	3,23	Octubre	6,79	4,15
Mayo	7,86	3,93	Noviembre	6,37	3,81
Junio	7,19	4,42	Diciembre	6,26	3,54
Valor Medio		7,33	3,81		

Por su posición geográfica, el municipio de Santa Clara se encuentra situado al centro del país, en una latitud muy próxima al Trópico de Cáncer, lo que condiciona la recepción de altos valores de radiación solar durante todo el año, con 7,33 horas luz como promedio, determinando el carácter cálido de su clima. Además, se halla en la frontera entre las zonas de circulación tropical y extratropical, recibiendo la influencia de ambas con carácter estacional.

A continuación se presentan tablas que dan la caracterización climática de la radiación solar en el municipio de Santa Clara. La tabla 2 refleja las medias mensuales de la serie histórica de radiación solar total diaria; como puede apreciarse el máximo valor se produce en el mes de abril y el mínimo en enero. Esto refuerza el criterio sobre su influencia, tanto sobre los factores astronómicos como locales; así, al analizar estos valores de conjunto con los de la tabla 1, resalta que es precisamente abril el mes con mayor insolación y menor nubosidad media.

Tabla 2. Radiación solar total diaria (kWh/m²/día): medias mensuales

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
4,01	4,80	5,74	6,76	6,73	6,67	6,53	6,39	5,72	4,97	4,09	3,65

La tabla 3 muestra las medias mensuales de la serie histórica de radiación solar total diaria, pero solo para los días despejados, así se produce un

corrimiento en los valores extremos apareciendo el valor mínimo en diciembre y el máximo en mayo.

Tabla 3. Radiación solar total diaria (kWh/m²/día): medias mensuales en días despejados

Ene	Feb	Mar	Abr	Ma y	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
4,97	5,88	6,92	7,74	8,02	7,99	7,89	7,57	6,93	6,03	5,11	4,65

Los valores medios de los extremos de la radiación solar total diaria se presentan en la tabla 4, observándose –como era de esperar– que los meses de ocurrencia de valores medios del mínimo y el máximo coinciden: mayo y diciembre, respectivamente. El período abril-agosto presenta los valores más

elevados correspondiendo con la primavera y el verano en Cuba. En la tabla puede apreciarse, además, que en los meses del período septiembre a febrero los valores máximos medios se encuentran por debajo de los mínimos medios en el período abril-agosto.

Tabla 4. Radiación solar total diaria (kWh/m²/día): valores medios de los extremos

Valor	Meses											
	Ene	Feb	Mar	Abr	Ma y	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Minimo	3,4 9	4,3 3	4,47	6,1 8	6,20	5,8 2	6,1 1	6,1 2	5,2 2	4,4 5	3,8 6	3,2 1
Máximo	4,5 5	5,1 4	6,23	7,2 8	7,44	7,2 1	7,0 4	6,5 8	6,1 4	5,3 8	4,5 3	4,0 5

Por su parte, la tabla 5 refleja la radiación solar total horaria (en el esquema de observaciones meteorológicas trihorarias). Se puede observar cómo los valores más elevados se obtienen según la

hora en mayo o abril, así en los horarios de salida y puesta del sol es mayo el mes con una mayor disponibilidad de radiación, siendo abril en los horarios intermedios.

Tabla 5. Radiación solar total horaria (kW/m²)

Hora	Meses											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
7 am	n/d	n/d	n/d	0,18	0,19	0,19	0,14	0,14	0,17	n/d	n/d	n/d
10 am	0,43	0,50	0,57	0,71	0,70	0,69	0,68	0,67	0,64	0,57	0,49	0,41
1 pm	0,59	0,68	0,76	0,87	0,82	0,80	0,81	0,81	0,75	0,67	0,59	0,54
4 pm	0,28	0,37	0,46	0,51	0,48	0,48	0,49	0,46	0,37	0,28	0,23	0,23
7 pm	n/d	n/d	n/d	0,17	0,18	0,18	0,12	0,11	0,12	n/d	n/d	n/d

CONCLUSIONES

- 1) La metodología de cálculo propuesta para la determinación del posicionamiento solar se puso de relieve y se adecuaron los valores debidos a la geometría del diseño, así como los debidos a la ubicación geográfica para el caso del veranero ubicado en el Instituto de Biotecnología de las Plantas de Santa Clara.
- 2) La caracterización climática de la radiación solar es amplia y recoge variables específicas para estudios de energética solar, quedando claro que el sol es una magnífica fuente de energía en nuestras condiciones geográficas.

computer simulations of solar energy systems and energy consumption in buildings», Brussels, D.G. 12, 1995.

2. Duffie J. A. and W. A. Beckman: *Solar Engineering of thermal processes*, 764 pp., Ed. John Willey & Sons, 1980.
3. Hawlader M. N.; T. Y. Bong and M. Mahmood: "Some frequently used meteorological data for Singapore", *Int. J. Solar Energy*, 8: 1-11, 2000.
4. Jones R. J. *et al: Passive solar design handbook*. 475 pp. Ed. DOE/CS-0127 / 3 .2002.
5. Lamm, L. O.: "A new analytic expression for the equation of time", *Solar Energy* 26(5): 465-472, 1981.
6. Phillips W. F.: "Harmonic analysis of climatic data", *Solar Energy* 32(1): 319-328, 2004.

BIBLIOGRAFIA

1. Commission of the European Communities: «Test reference years. Weather data sets for

7. Saura G. G. y R. R. Osés: “Estudio de las temperaturas ambientales con propósitos de enfriamiento y calentamiento”, *ECOSOLAR* 3: 14-22 , 2003
8. Stine, W. B. and R. W. Harrigan: *Solar energy fundamentals and design*, 536 pp., Ed. John Willey & Sons, 2002.
9. Zimmerman, J. C.: *Sun pointing programs and their accuracy*, Sandia National Laboratories Report SAND81-0761, September, 2001.