



ARTÍCULO ORIGINAL

CU-ID: <https://cu-id.com/2284/v12n2e03>

Comparación de métodos de estimación de la evapotranspiración del cultivo del tomate en casas de cultivo

Comparison of methods for estimating the evapotranspiration of tomato cultivation in growing houses

Oscar A. Rosales-Rodríguez^I, José Enrique Alfonso-Valdés^{II}, Iván Santana-Amar^{II}, Alfredo Socorro-García^I, Dr.C. Carmen E. Duarte-Díaz^{III}

^I Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical (INIFAT) "Alejandro de Humboldt". Boyeros, La Habana, Cuba.

^{II} Agropecuaria Militar, Atabey, Cuba.

^{III} Instituto de investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Boyeros, La Habana, Cuba.

RESUMEN. Con el objetivo de determinar las necesidades hídricas del *Solanum Lycopersicum L.*, sobre sustrato de fibra de coco, bajo condiciones protegidas, se realizó un trabajo experimental en una casa de cultivo protegido bajo condiciones climáticas controladas en la localidad del Wajay. Municipio Boyeros, La Habana, Cuba. Se calculó la Evapotranspiración de referencia (ET_o), por los métodos de Penman-Monteith, Hargreaves-Samani, Turc y el de la Integral de radiación y se comparó los volúmenes de agua obtenidos en el cálculo de la Evapotranspiración del cultivo (ET_c), con los del método control del volumen de drenaje (método patrón). La evapotranspiración de referencia estimada por los métodos Penman-Monteith, Integral de radiación, Hargreaves-Samani, se encuentran en intervalo semejante (3,5-7,1 mm), diferenciándose las evaluadas por el método de Turc encontrándose por encima de (7,1 mm). Se determinaron las necesidades hídricas del cultivo (ET_c) de tomate, sobre sustrato de fibra de coco bajo condiciones protegidas la cual estuvo entre 1910-3068 Litros casa ⁻¹. El método de control del volumen de drenaje puede ser utilizado conjuntamente con los métodos empíricos propuestos de Penman-Monteith, Integral de radiación y Hargreaves-Samani, para corregir los parámetros de (pH y CE), con las fracciones de lavado.

Palabras clave: clima, fibra de coco, riego

ABSTRACT. In order to determine the water needs of *Solanum Lycopersicum L.*, on coconut fiber substrate, under protected conditions, an experimental work was carried out in a protected cultivation house under controlled climatic conditions in the town of Wajay. Boyeros Municipality, Havana, Cuba. The reference Evapotranspiration (ET_o) was calculated by the methods of Penman-Monteith (FAO-56), Hargreaves-Samani (1985), Turc (1954) and that of the Radiation Integral and the volumes of water obtained in the calculation of the Evapotranspiration of the crop (ET_c), with those of the drainage volume control method (standard method). The reference evapotranspiration estimated by the Penman-Monteith, Radiation Integral, Hargreaves-Samani methods, are in a similar interval (3.5 -7.1 mm), differing from those evaluated by the Turc method, being above (7, 1 mm). The hydric needs of the tomato crop (ET_c) were determined, on coconut fiber substrate under protected conditions which was between 1910-3068 Liters. house ⁻¹. The drainage volume control method can be used together with the proposed empirical methods of Penman-Monteith, Radiation Integral and Hargreaves-Samani, to correct the parameters of (pH and EC), with the washing fractions

Keywords: Climate, Coconut Fiber, Waterings

^IAutor para correspondencia: Oscar A. Rosales-Rodríguez, e-mail: entomologia2@inifatr.co.cu ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2683-3046>

Recibido: 23/09/2021.

Aprobado: 14/03/2022.

INTRODUCCION

La evaporación es un proceso mediante el cual el agua en forma líquida se convierte en vapor de agua y luego se remueve de la superficie, para este cambio de estado se requiere energía que proviene en *gran medida por la radiación solar y en menor grado por la temperatura del aire* (Cisneros *et al.*, 2017). La remoción se presenta como resultado de la diferencia de presión de vapor de agua predominante entre la superficie y la atmósfera en determinado lugar (Cid *et al.*, 2018). Cuando la superficie es un espejo de agua (lago, laguna, mar) en este proceso sólo intervienen parámetros climatológicos tales como: la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento (Chaterlán and Rodríguez, 2017). Cuando se trata de la superficie del suelo se le suman otros tipos de parámetros como: el porcentaje de suelo cubierto por una vegetación dada y la cantidad de agua disponible en la superficie evaporante (Pérez, 2017).

La transpiración es la pérdida de agua desde los órganos aéreos en forma de vapor como consecuencia natural de las características anatómicas fundamentales de las plantas (López *et al.*, 2017). Las células del parénquima o mesófilo acuoso tienen una superficie húmeda en contacto con los espacios intercelulares y estos a su vez se comunican con el medio exterior a través de los estomas de manera, que el agua de las células se evapora y pasa al aire a través de los espacios intercelulares (Méndez and Ponce de León, 2017). Por otra parte, el agua perdida es remplazada, por la que llega procedentes de las raíces a través de los vasos conductores de la xilema (Salisbury and Ross, 2017).

La Evapotranspiración (ET) es la pérdida de agua que ocurre en una superficie como consecuencia de la combinación de los procesos de evaporación y la transpiración de la planta (Allen *et al.*, 2006).

Se plantea por (Guzmán *et al.*, 2017), que el concepto de Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), fue introducido a finales de 1970 y comienzos de 1980, por ingenieros e investigadores de riego como consecuencia del vacío teórico del concepto de ET potencial. Se define la ET_o como la ET de "un cultivo hipotético de pasto con una altura asumida de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0,23. La superficie de referencia es muy similar a una superficie extensa de pasto verde bien regada de altura uniforme, creciendo activamente y dando sombra totalmente al suelo (Cisneros *et al.*, 2018). La resistencia superficial fija de 70 s m⁻¹ implica un suelo moderadamente seco que recibe riego aproximadamente con una frecuencia semanal, históricamente se han utilizado dos cultivos de referencia: los pastos y alfalfa (Allen *et al.*, 2006).

La Evapotranspiración real del cultivo (ET_c) se refiere a la ET de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias bajo óptimas condiciones de suelo y agua, la cual alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas reinantes (López *et al.*, 2017). La ET_c puede ser calculada a partir de datos climáticos e integrando directamente los factores de la resistencia del cultivo, el albedo y la resistencia del aire en el enfoque de Penman-Monteith (Allen, 2006).

Existen referencias anteriores para el cálculo de la ET_c,

los cuales reportan que a lo largo de la historia las investigaciones en el tema se han encaminado en la evaluación de este importante indicador, sobre este en particular se puede citar a (Allen *et al.*, 1998) y específicamente Allen *et al.* (2006), que recomiendan el método de Penman Monteith y el empleo de coeficientes de cultivo (K_c).

El trabajo se realizó con el objetivo de determinar las necesidades hídricas del *Solanum Lycopersicum L* en condiciones controladas, plantado sobre sustrato de fibra de coco utilizando diferentes fórmulas para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo.

MATERIALES Y METODOS

El trabajo se realizó en una casa de cultivo protegido modelo Negev, en el Wajay, municipio Boyeros en La Habana, Cuba, con coordenadas geográficas:(Latitud: 23° 0' 45''N, Longitud: 82° 45' W) y una altitud de 64,00 metros sobre el nivel del mar.

Es un multi-tunel de estructura metálica que tiene un área total de 968 m², la longitud es de 40,00m, el ancho de 24,20m y la altura de la cumbre es de 5,80m con ventanas cenitales y abertura automatizada. Cuenta con condiciones climáticas controladas (Netafim, 2015).

Tiene instalado un sistema de riego localizado por goteo de alta frecuencia, auto compensado de botón de donde salen cuatro emisores con un gasto de 2 L.hora⁻¹ para un total de 8 L.hora⁻¹por bolsa de polietileno o Pelemix de 1 m de longitud, 0,40 m de ancho y 0,10 m de alto, con una capacidad de 15 L de fibra de coco procedente de Siri Lanka, donde se trasplantaron cuatro posturas de tomate a 0,20 m de separación del híbrido FA 180i de la firma Hazera Israelita a partir del mes de abril –agosto del año 2018, como se observa en la Figura 1.

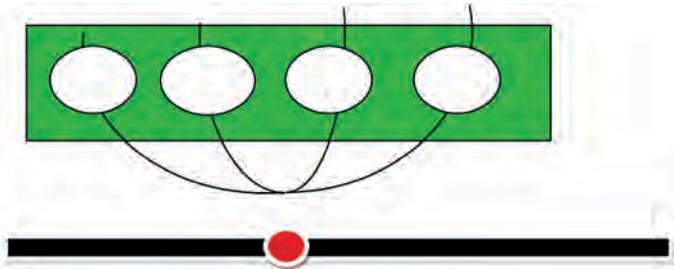


Figura 1. Bolsa de fibra de coco con un gotero de botón y cuatro emisores

Tiene un total de 12 laterales separados a 1,60 m con 444 goteros de botón, con cuatro emisores cada uno, para un total de 1776 emisores, de la firma (Netafim, 2015), procedente de Israel.

Para la estimación de la ET_o y la ET_c se tomaron datos de las variables climáticas de la estación meteorológica más cercana (Santiago de las Vegas) a partir del mes de abril hasta agosto del año 2018.

Se utilizaron para la estimación de la ET_o, los siguientes métodos que se relacionan a continuación.

Método control del volumen de drenaje

En un punto representativo de la casa se situó sobre un soporte de metal construido para tal fin una bolsa de fibra de

coco o pelemix, para recoger en dos recipientes el agua de la solución de aporte en uno y la de la solución de drenaje en otro, como se representa en la Figura 2.



FIGURA 2. Punto de control.

Se estimó el porcentaje de drenaje con el empleo de la ecuación 1.

$$PD = \frac{VgB / ne}{VgA} \cdot 100\% \quad (1)$$

donde:

PD: porcentaje de drenaje.

VgA: volumen de agua aportada de un gotero (A), en mililitros.

VgB: volumen de agua de drenaje (B) de los cuatro emisores en mm.

ne: números de emisores (cuatro emisores o estacas de un gotero de botón).

Se calcularon los parámetros de pH y CE de la solución de aporte y drenaje, con un pH metro (marca Hanna modelo HI2250) y un conductímetro (marca Hanna modelo HI9932), para determinar el porcentaje de drenaje en el método de control del volumen de drenaje considerado como patrón.

Método de Penman-Monteith (PM-FAO 56)

La expresión general utilizada fue la siguiente:
Ecuación de Penman-Monteith (Allen et al., 2006).

TABLA 1. Radiación solar extraterrestre (Ra) expresada en mm. m²·día⁻¹. (Allen et al., 2006). (Original en MJ·m⁻²·día⁻¹; 1 mm. día⁻¹= 2,45 MJ·m⁻²·día⁻¹, 1MJ=0,408mm)

| Latitud | E | F | M | A | M | J | JL | A | S | O | N | D |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 22 | 10,5 | 12,1 | 13,9 | 15,4 | 16,1 | 16,3 | 16,2 | 15,7 | 14,4 | 12,7 | 10,9 | 10,0 |

Fuente. Javier Sánchez San Román. Dpto. Geología Univ. Salamanca <http://hidrologia.usal.es>

Los datos de temperaturas empleadas en la estimación de la ETo, durante el desarrollo del ciclo del cultivo en el experimento fueron registrados en la estación meteorológica de Santiago de las Vegas, a partir del mes de abril –agosto del año 2018.

$$ETo = \frac{0,408 \cdot \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34) u_2} \quad (2)$$

donde:

ETo- evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

R_n- radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹)

Ra- radiación extraterrestre (mm día⁻¹)

G- flujo del calor de suelo (MJ m⁻² día⁻¹)

T- temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

u₂- velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹)

e_s- presión de vapor de saturación (kPa)

e_a- presión real de vapor (kPa)

e_s - e_a. Déficit de presión de vapor (kPa).

Δ- pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹)

γ- constante psicrométrica (kPa °C⁻¹)

Se utilizó la ecuación 2 con el empleo de datos de los promedios decenales de las variables climáticas estudiadas (Tabla 1).

Método de Hargreaves-Samani (1985)

Para el cálculo de ETo se utilizó la ecuación 3, donde 0,0135 es un coeficiente adimensional, R_s es la radiación solar que llega a la tierra proveniente del sol y T_m es la temperatura media del aire que se calcula con el empleo de la ecuación 4.

$$ETo = 0,0135 \cdot R_s \cdot (T_m + 17,8 \text{ °C}) \quad (3)$$

$$T_m = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \quad (4)$$

donde.

T_m-es la temperatura media del aire.

T_{Max}-temperatura máxima °C.

T_{Min}-temperatura mínima °C.

Para la evaluación de la Radiación Solar Extraterrestre (Ra) existen varias Tablas, todas ellas en función de la latitud y del mes. En este documento se incluyó la Tabla 1 de Ra de (Allen et al., 2006). La tabla original está en MJ. m⁻²·día⁻¹, aquí la presentamos en mm. m⁻²·día⁻¹ (de agua evaporada), ésta se obtuvo con el empleo de la ecuación 5. Para convertirla de mm. m⁻²·día⁻¹, se multiplica por 0,408.

$$Rs = Ra \cdot KT \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} \quad (5)$$

donde:

KT coeficiente (es un coeficiente empírico que se puede calcular a partir de datos de presión atmosférica, pero Hargreaves citado por (Hargreaves and Saman, 1983) recomienda 0,162 (adimensional) para regiones del interior y 0,19 para regiones costeras.

Método de Turc (1954)

El cálculo de la ETo se realizó mediante la ecuación 6, donde Rs es la radiación solar incidente en mm·m²·día⁻¹ de evaporación calculada a partir de la ecuación 6y la Tabla 1. La temperatura media del aire (Tm) estimada por la ecuación 4 y datos climáticos, la cual fueron registrados en la estación meteorológica de Santiago de las Vegas.

$$ETo = 0,4.(Rs + 50) \cdot \left(\frac{Tm}{Tm + 15} \right) \quad (6)$$

Método de la Integral de radiación

Para el cálculo de la ETo se empleó la ecuación 7

$$ETo = A \cdot 0,7 \cdot Rs \quad (7)$$

donde:

A- es igual a 0,67 (coeficiente estimado por (De Villele, 1974), para el cultivo del tomate).

0,7-es un coeficiente adimensional (entre 0,50 -0,70).

Rs-radiación solar incidente expresado en mm m² día⁻¹, estimados por la ecuación 5.

La evapotranspiración real del cultivo (ETc) en el interior de la casa de cultivo protegido se estimó con el empleo de la ecuación 8, después de evaluar la ETo por los diferentes métodos. Hay que tener en cuenta la transferencia de luz de la cubierta del invernadero, la cual se determina comparando la relación que existe entre la radiación que se mide en el exterior de la casa de cultivo protegido y la del interior con el empleo de un solarímetro, si la cubierta está limpia se asume un valor de 0,70; el coeficiente que depende de la especie, en este caso el tomate tiene un valor de 0,67 y el coeficiente del cultivo (Kc) el cual depende de la duración de los días de establecimiento del cultivo Tabla 2.

$$ETc = ETo \cdot Kc \quad (8)$$

donde:

ETo- evapotranspiración de referencia mm·m²·día⁻¹

Kc-coeficientes del cultivo

ETc-evapotranspiración del cultivo mm·m²·día⁻¹

En la Tabla 2 se muestra a los efectos del control del riego las etapas de crecimiento, desarrollo del cultivo, la duración en días de las diferentes etapas en el desarrollo del tomate y coeficiente del cultivo ajustados y recomendado por (León et al., 2005; Casanova et al., 2007).

TABLA 2. Duración de las feno fases del cultivo del tomate y Kc utilizadas en el experimento

| Etapas | Duración en días | Coefficiente del cultivo (Kc) |
|---|------------------|-------------------------------|
| 1-Etapa 1: Trasplante-Inicio o emisión del primer racimo floral | 0-20 | 0,30-0,70 |
| 2-Etapa 2: Inicio o emisión del primer racimo floral -Cuajado del tercer racimo | 23 | 0,90 |
| 3-Etapa 3: Cuajado del tercer racimo -Inicio de cosecha | 20 | 1,00 |
| 4-Etapa 4: Inicio cosecha-producción | 15 | 1,20 |
| 5-Etapa 5: Producción-final de cosecha | 102 | 1,00 |
| Total | 180 | |

Métodos estadísticos

Se estimaron los promedios decenales de la temperatura, humedad relativa, insolación, velocidad del viento y radiación solar, así como el porcentaje de drenaje, la desviación estándar y el error típico.

Se realizó un análisis de varianza de clasificación simple uni-factorial. Para comparar las medias de los volúmenes de agua. Se utilizó la prueba de Tukey, con un nivel de significación de p<0,05.

Para el ANOVA se utilizó el paquete estadístico infostat (2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3, se muestra el comportamiento del riego y drenaje en mililitros evaluados en el *punto de control*, así como el porcentaje de agua drenada estimado por la ecuación 1, empleado en el cultivo de tomate.

TABLA 3. Porcentaje de drenaje cuantificado para el riego al cultivo de tomate sobre sustrato de fibra de coco, bajo condiciones protegidas

| Mes | Decenas | Riego de un emisor (m L) | Promedio del drenaje de cuatro emisores (m L) | Porcentaje de drenaje (%) | Diferencia de la CE de la SA y la SD en dS.m ⁻¹ |
|-------|---------|--------------------------|---|---------------------------|--|
| Abril | 1 | 487±2 | 217±3 | 45±4 | 1,00 |
| | 2 | 1560±3 | 858±3 | 55±4 | 1,00 |
| | 3 | 1755±3 | 988±5 | 56±4 | 1,00 |

| Mes | Decenas | Riego de un emisor (m L) | Promedio del drenaje de cuatro emisores (m L) | Porcentaje de drenaje (%) | Diferencia de la CE de la SA y la SD en dS.m ⁻¹ |
|--------|---------|--------------------------|---|---------------------------|--|
| Mayo | 1 | 1688±2 | 439±5 | 26±4 | 0,96 |
| | 2 | 1961±2 | 477±4 | 24±4 | 0,59 |
| | 3 | 1227±4 | 961±5 | 20±3 | 1,50 |
| Junio | 1 | 2471±3 | 600±3 | 24±3 | 1,0 |
| | 2 | 1175±4 | 341±5 | 29±4 | 1,0 |
| | 3 | 1389±4 | 361±5 | 26±2 | 1,3 |
| Julio | 1 | 1999±4 | 420±5 | 21±4 | 0,26 |
| | 2 | 1463±4 | 337±5 | 23±4 | 1,29 |
| | 3 | 2428±4 | 351±4 | 24±4 | 1,00 |
| Agosto | 1 | 827±2 | 83±5 | 10±1 | 0,42 |
| | 2 | 1708±5 | 495±7 | 29±1 | 1,07 |
| | 3 | 1579±4 | 411±5 | 26±4 | 1,42 |

En el mes de abril se muestra el porcentaje de drenaje cuantificado al cultivo de tomate sobre sustrato de fibra de coco bajo condiciones protegidas, donde se muestra las fracciones de lavado entre 45±4-56±4 %, los cuales son muy elevados, empleados para aguas de mala calidad, aun así, se puede informar que esto es debido a que después del trasplante se persiguió lograr el establecimiento del cultivo y se aplicaron mayores volúmenes de agua. En el resto de las evaluaciones el porcentaje de drenaje estuvo entre un 10 y 29 % lo cual estuvieron en correspondencia con las recomendadas por (Langlais and Ryckewaert, 2001), para el cultivo sin suelo de hortalizas bajo condiciones protegidas en Martinica, los cuales recomiendan entre un 20 y un 30 %, para aguas de riego de media calidad, lo cual es confirmado por (Castellanos et al., 2015).

En los meses de abril - agosto, los valores registrados en la CE en la solución de drenaje, estuvieron entre 0,26-1,42dS·m⁻¹, lo cual muestra que el contenido total de las sales en la solución nutritiva fue correcto.

(Urrestarazu, 2015), informa en invernaderos en Murcia y Almería, España, se recomienda mantener una diferencia de CE entre la Solución de aporte y la Solución de drenaje entre 0,5-1,5 dS·m⁻¹, lo cual es ratificado por (Brown et al., 2018) y por (Castellanos et al., 2015) en invernaderos en México.

Para el cultivo del tomate sobre sustrato de fibra de coco, consideraciones hechas en publicaciones por los autores (Baixauli and Aquilar, 2002; Monge, 2018), aseguran que se ha podido evidenciar en varios experimentos la importancia de mantener la CE de la solución de drenaje ≤ 2,5 dS·m⁻¹, y una CE de 1,7 dS·m⁻¹ del agua de aporte, para un rendimiento potencial del 100%, ya que valores superiores provocan pérdidas en la producción, una concentración alta de sales tiene como resultado un potencial osmótico alto de la solución del suelo. Este estrés salino requiere energía y un aumento de la respiración de la planta para la absorción del agua, se reduce la actividad fotosin-

tética, la división celular y el crecimiento que provocan problemas en la germinación de las semillas y disminución de los rendimientos. El retraso puede llegar a ser letal si la emergencia de la plántula coincide con el estrés hídrico afirman (Salisbury and Ross, 2017).

En la Tabla 4 se muestra los valores decenales y mensuales de la evapotranspiración de referencia estimados por los métodos propuestos en el área experimental.

(ETo-2). Método de Penman-Monteith Allen et al. (2006), (ETo-3). Método de (Hargreaves and Saman, 1983), (ETo-4) Método de Turc según Martínez (2001), (ETo-5) Método de la Integral de radiación.

En la Tabla 4 se puede observar que los resultados obtenidos en la estimación de la Evapotranspiración de referencia (ETo), están comprendidos entre 3,5 mm-7,1 mm, sin embargo los obtenidos por el Método de Turc según Martínez (2001), están por encima de 7,1 mm, esto es debido a que en la ecuación los coeficientes de ajuste fueron obtenidos por Turc según Martínez (2001), para la cuenca de Versalles en Francia que tiene condiciones climáticas diferentes a las nuestras, por lo que requieren ser ajustadas, sin embargo este método después del método de Penman-Monteith Allen et al. (2006), fue el que mejores resultados obtuvo Barco et al. (2000), en invernaderos en Colombia y por (Almorox et al., 2008) en Uruguay con el empleo de coeficientes de ajuste de humedad relativa.

Los resultados obtenidos con el empleo del método de (Hargreaves and Saman, 1983) fue aceptable, el cual coincide con un estudio realizado por el Centre Commun de Recherche of the European Economic Community Allen et al. (2006), que parten de un estudio donde se compararon nueve métodos micro meteorológico con el de Penman-Monteith Allen et al. (2006) y fue el que presentó datos más cercano. En cuanto al método de la Integral de radiación fue el que proporcionó los datos más cercanos a los de Penman-Monteith Allen et al. (2006), en un estudio realizado en 1990 por un comité de expertos de ingenieros civiles y agrícolas en 11 localidades para el uso del

Rosales-Rodríguez *et al.*: Comparación de métodos de estimación de la evapotranspiración del cultivo del tomate en casas de cultivo agua en Estados Unidos, obtuvieron que los métodos de la radiación demostraron buenos resultados en climas húmedos donde el término aerodinámico es relativamente pequeño, pero su funcionamiento en condiciones áridas fue errático y con tendencia a subestimar la evapotranspiración.

TABLA 4. Estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) por cuatro métodos, expresados en mm·m⁻²·día⁻¹

| Mes | Decena | ET _o -2 | ET _o -3 | ET _o -4 | ET _o -5 |
|--------|--------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Abril | 1 | 5,5 | 4,6 | 12,5 | 5,4 |
| | 2 | 5,6 | 4,7 | 12,4 | 5,6 |
| | 3 | 5,0 | 4,5 | 12,4 | 5,2 |
| Mayo | 1 | 5,5 | 4,5 | 12,6 | 5,1 |
| | 2 | 5,1 | 4,2 | 12,4 | 4,9 |
| | 3 | 4,8 | 3,5 | 12,4 | 4,1 |
| Junio | 1 | 5,4 | 4,9 | 12,7 | 5,5 |
| | 2 | 5,4 | 5,0 | 12,8 | 5,4 |
| | 3 | 5,3 | 5,0 | 12,7 | 5,6 |
| Julio | 1 | 5,4 | 5,0 | 12,8 | 5,4 |
| | 2 | 5,5 | 5,1 | 12,9 | 5,6 |
| | 3 | 5,5 | 4,9 | 12,9 | 3,8 |
| Agosto | 1 | 7,1 | 4,8 | 14,9 | 3,7 |
| | 2 | 5,4 | 4,8 | 14,7 | 3,8 |
| | 3 | 5,1 | 4,6 | 14,6 | 3,6 |

Se muestran en la Tabla 5, los volúmenes de agua expresados en (mm m⁻² día⁻¹), que fueron determinados por el método de control del volumen de drenaje (método patrón) y los determinados por la Evapotranspiración del cultivo con el empleo de la ecuación 8.

Según (Allen et al., 2006) menciona que el equivalente de una lámina de riego o de evaporación de 1 mm·m⁻² es igual a 10 m³. ha o sea 1 mm equivale a 1 L·m⁻²·día⁻¹.

TABLA 5. Evapotranspiración del cultivo (ET_c), obtenida por los métodos evaluados del área en estudio expresados en mm·m⁻²·día⁻¹

| Mes | Decena | Kc | Volumen de agua en la casa (mm·m ⁻² ·día) | ET _c -2 (mm·m ⁻² ·día) | ET _c -3 (mm·m ⁻² ·día) | ET _c -4 (mm·m ⁻² ·día) | ET _c -5 (mm·m ⁻² ·día) |
|--------|--------|------|--|--|--|--|--|
| Abril | 1 | 0,30 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 1,8 | 0,8 |
| | 2 | 0,70 | 2,9 | 0,8 | 0,7 | 1,7 | 0,8 |
| | 3 | 0,90 | 3,2 | 1,7 | 1,5 | 4,1 | 1,7 |
| Mayo | 1 | 0,90 | 3,1 | 1,8 | 1,5 | 4,1 | 1,7 |
| | 2 | 0,90 | 3,6 | 1,7 | 1,4 | 4,1 | 1,6 |
| | 3 | 1,00 | 2,3 | 2,0 | 1,5 | 5,3 | 1,7 |
| Junio | 1 | 1,00 | 4,5 | 2,3 | 2,0 | 5,4 | 2,3 |
| | 2 | 1,20 | 2,2 | 2,5 | 2,3 | 6,0 | 2,5 |
| | 3 | 1,00 | 2,5 | 3,0 | 2,8 | 7,1 | 3,1 |
| Julio | 1 | 1,00 | 3,7 | 3,0 | 2,7 | 7,2 | 3,0 |
| | 2 | 1,00 | 2,7 | 3,1 | 2,8 | 7,3 | 3,1 |
| | 3 | 1,00 | 4,5 | 3,1 | 2,7 | 7,3 | 2,1 |
| Agosto | 1 | 1,00 | 1,5 | 4,0 | 2,7 | 8,4 | 2,1 |
| | 2 | 1,00 | 3,1 | 3,0 | 2,7 | 8,3 | 2,1 |
| | 3 | 1,00 | 2,9 | 3,0 | 2,6 | 8,2 | 2,2 |

Volumen de agua determinado por el método patrón, (ET_c-2). Método de Penman-Monteith Allen et al. (2006), (ET_c-3). Método de (Hargreaves and Saman, 1983), (ET_c-4) Método de Turc según Martínez (2001), (ET_c-5) Método de la Integral de radiación.

Al analizar los resultados obtenidos en el cálculo de la Evapotranspiración del cultivos por los métodos evaluados con

el empleo de los valores de coeficientes de cultivo de la Tabla 2, para las condiciones de Cuba, se puede señalar que los mismos fueron empleados en el cálculo de los requerimientos de agua para el cultivo del tomate utilizando como substrato a la zeolita cubana en el año 2000 por (Rosales et al., 2006), obteniéndose buenos resultados, con rendimientos promedios de 24 kg m⁻²,

para el cultivo del tomate, los valores máximos de Kc utilizados fueron de 1,20 respectivamente lo que coincide con los reportados por (Allen et al., 2006). Al hacer un análisis de los coeficientes por fases del cultivo encontramos los mayores valores en la fase de floración-fructificación determinados por (León et al., 2005), según resume (Duarte et al., 2017).

Luego de determinar los requerimientos hídricos por casa decenalmente en el ciclo con la cuantificación de ETo y el empleo de variables climáticas y coeficientes de cultivo, para la estimación de la ETc, se procede a compararlo con los valores que se obtuvieron con el método de control de volumen de drenaje o patrón.

TABLA 6. Volúmenes de agua (litros casa⁻¹) obtenidos según los métodos evaluados

| Métodos | Volúmen de agua (L casa ⁻¹) | Sig* |
|---|---|------|
| 1-Método del control del volumen de drenaje (patrón). | 3068 | b |
| 2-Método de Penman-Monteith Allen et al. (2006) | 2285 | b |
| 3-Método de (Hargreaves and Saman, 1983) | 1934 | b |
| 4-Método de Turc según Martínez (2001) | 7996 | a |
| 5-Método de la Integral de radiación. | 1910 | b |

*Letras distintas indican diferencias significativas (p<0,05)

Se hizo un análisis de varianza a los métodos evaluados donde $p=0,0009 \leq 0,05$, lo que indica que hay diferencia significativa entre los métodos evaluados.

Al aplicar prueba de Tukey a las medias por meses de los métodos evaluados se obtuvo los siguientes resultados.

Como se observa hay diferencia del método de Turc según Martínez (2001), con respecto a los demás métodos y el método patrón y no hay diferencia significativa entre los demás métodos, con el método patrón.

Los métodos de Penman-Monteith Allen et al. (2006), Integral de radiación y Hargreaves-Samani (1987) son los métodos que más se aproximan, para determinar la ETc en invernadero por su sencillez, lo cual corrobora los resultados obtenidos por (Casanova et al., 2007).

Resultados obtenidos por (Medrano et al., 2008) con el empleo de la integral de radiación refleja la validez de su empleo para la programación del riego en invernaderos criterio demostrado en este trabajo y compartido por (Castellanos et al., 2015), para su empleo en el cultivo del tomate.

CONCLUSIONES

- El método que más se aproxima en la estimación de las necesidades de agua del *Solanum Lycopersicum L.*, es el de Penman-Monteith (FAO-56), seguido de Hargreaves-Samani y el de la Integral de radiación.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Allen, R.G., 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Food & Agriculture Org.
- Allen, R.G., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., 1998. Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrig. Drain. Pap. 56, 300.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO 298, 0.
- Almorox, J., Hontoria, C., Benito, M., 2008. Comparación de algunos métodos de estimación de la evapotranspiración en Uruguay. Rev. Ing. Quím. 33, 5-9.
- Baixaui, B.C., Aquilar, J.M., 2002. Cultivo sin suelo de hortalizas. Generalitat valenciana Consellería de Agricultura, Pesca y Alimentación, Valencia, España.
- Barco, J., Cuartas, A., Mesa, O., Poveda, G., Vélez, J.I., Mantilla, R., Hoyos, C., Mejía, J F, Botero, B, Montoya, M, 2000. Estimación de la eva-

- La evapotranspiración de referencia estimada por los métodos Penman-Monteith, Integral de radiación, Hargreaves-Samani, se encuentran en intervalo semejante (3,5-7,1 mm), diferenciándose las evaluadas por el método de Turc encontrándose por encima de (7,1 mm).
- Según los resultados obtenidos en la determinación de la evapotranspiración de referencia (ETo) en estas condiciones, no se recomienda la utilización del método de Turc para esto.
- Los volúmenes de agua obtenidos por los diferentes métodos están entre 1910 y 3068 L-casa⁻¹ sin diferencia significativa.
- El método de control del volumen de drenaje puede ser utilizado conjuntamente con los métodos empíricos propuestos de Penman-Monteith, Integral de radiación y Hargreaves-Samani, para corregir los parámetros de (pH y CE), con las fracciones de lavado.

CONTRIBUCIONES DE AUTOR:

Conceptualización: O. Rosales. Curación de datos: O. Rosales, C. Duarte. Análisis formal: O. Rosales, Alfonso, I. Santana, A. Socorro, C. Duarte. Investigación: O. Rosales, Alfonso, I. Santana, A. Socorro, C. Duarte. Metodología: O. Rosales, Alfonso, I. Santana, A. Socorro, C. Duarte. Supervisión: O. Rosales. Validación: O. Rosales, Alfonso. Papeles/Redacción, proyecto original: O. Rosales. Redacción, revisión y edición: Alfonso, I. Santana, A. Socorro, C. Duarte.

- Rosales-Rodríguez *et al.*: Comparación de métodos de estimación de la evapotranspiración del cultivo del tomate en casas de cultivo poración en Colombia. Av. En Recur. Hidráulicos 43–51, ISSN:
- Brown, M.O., Mendez, J.N., Bernal, E.M., 2018. Evaluation of a Micro Irrigation System Powered by Wind Energy. Rev. Cienc. Téc. Agropecu. 27, 13–21.
- Casanova, A., Gómez, O., Hernández, M., Chailloux, M., Depestre, T., Pupo, F., 2007. Manual para la Producción Protegida de Hortalizas. 2da Versión. Editorial Liliana, Ministerio de la Agricultura, Quivicán, La Habana, Cuba.
- Castellanos, J.Z., Castillo, P., Molina, R., Andrade, A., 2015. Manual de producción de tomate en invernadero. Editorial Intagri, INIFAP, México.
- Chaterlán, D.Y., Rodríguez, A.Y., 2017. Propuesta para mejorar la explotación de los sistemas de riego en una Cooperativa de Producción Agropecuaria. Rev. Ing. Agríc. 7, 22–27.
- Cid, L.G., Herrera, P.J., López, S.T., González, R.F., 2018. Estimación del agua disponible para las plantas en suelos cubanos en función de la textura predominante. Rev. Cienc. Téc. Agropecu. 27, 25–32.
- Cisneros, E.Z., López, S.T., González, R.F., 2017. Adecuación de los niveles de extracción de agua en el municipio Güira de Melena. Rev. Ing. Agríc. 7, 11–16.
- Cisneros, Z.E., Cun, G.R., Rosales, N.L., González, M.D., 2018. Lluvia sólida, para un uso eficiente del agua. Resultados preliminares. Rev. Ing. Agríc. 8, 13–20.
- De Villele, A., 1974. Cultivo en invernadero. Sistema Internacional de Información para la Ciencia y la Tecnología Agrícola. (AGRIS) cultivo en invernadero. AGRIS, FAO, Roma, Italia.
- Duarte, D.C.E., Herrera, P.J., Zamora, H.E., 2017. Predicción de las normas netas de riego a futuro en el pronóstico de riego. Rev. Ing. Agríc. 7, 3–10.
- Guzmán, A., Corradini, F., Martínez, J.P., Torres, A., 2017. Manual de cultivo del tomate al aire libre. Bol. INIA Chile 3.
- Hargreaves, G.H., Saman, P., 1983. Discussion of "Application of Penman Equation Wind Function." J. Irrig. Drain. Eng. 109, 277–278.
- Langlais, C., Ryckewaert, P., 2001. Guía de los cultivos protegidos de hortalizas en zona tropical húmeda, Cirad. ed. Editions Quae, Martinica, Francia.
- León, M., Cun, R., Chaterlán, Y., Rodríguez, R., 2005. Uso eficiente del agua en el cultivo del tomate protegido. Resultados obtenidos en Cuba. Rev. Cienc. Téc. Agropecu. 14, 9–13.
- López, R.G., Pérez, E.J., Ruiz, F.J., Masaguer, A., 2017. Caracterización física e hidrofísica de sustratos orgánicos sostenibles para sistemas de naturación en espacios urbanos. Rev. Ing. Agríc. 7, 33–40.
- Martinez, M.S., 2001. Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile. Rev. Geogr. Norte Gd. 3–10, ISSN: 0718-3402.
- Medrano, E., Luis, B., Pérez, M., José, P., 2008. Relaciones hídricas y programación de riego en cultivos hortícolas en sustratos. IFAPA, El Ejido (Almería), España.
- Méndez, A., Ponce de León, D., 2017. Redes neuronales artificiales en la estimación de la evapotranspiración de referencia. Rev. Ing. Agríc. 7, 23–30.
- Monge, R.M.A., 2018. Diseño Agronómico e Hidráulico de Riegos Agrícolas a Presión. Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Netafim, 2015. Exhibición y conferencia Internacional de Agricultura. Rev. Int. Agua Riego 35, 5–10.
- Pérez, B.C., 2017. Coeficiente de evaporímetro para la programación del riego. Rev. Ing. Agríc. 7, 24–27.
- Rosales, O., Báez, C.F., Arozarena, N., Igarza, A., Casanova, A., Hernández, M., 2006. Comportamiento del tomate, pepino y melón, bajo condiciones protegidas sin suelo, utilizando Zeolita cubana. Rev. Temas Cienc. Tecnol. 10, 21–26.
- Salisbury, A., Ross, O., 2017. Fisiología de las plantas, Edition 4. ed. Wadsworth Publishing Co, USA.
- Urrestarazu, G.M., 2015. Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponía. Mundi-Prensa, Madrid, España.

Oscar A. Rosales-Rodríguez I, Inv., Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical (INIFAT) "Alejandro de Humboldt". Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: entomología2@inifat.co.cu ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2683-3046>

José Enrique Alfonso-Valdés II, Inv., Agropecuaria Militar, Atabey, Cuba, e-mail: entomología2@inifat.co.cu ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9588-9169>

Iván Santana-Amar II, Inv., Agropecuaria Militar, Atabey, Cuba, e-mail: entomología2@inifat.co.cu ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8824-4047>

Alfredo Socorro-García I, Inv., Instituto de Investigaciones Fundamentales en Agricultura Tropical (INIFAT) "Alejandro de Humboldt". Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: entomología2@inifat.co.cu ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4779-4624>

Carmen E. Duarte-Díaz, Inv. Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric). Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: carmen.duarte@iagric.minag.gob.cu ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7887-6289>

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

Este artículo se encuentra sujeto a la Licencia de Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.