



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2026,
Volumen 10, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i3

**HACIA UN MANEJO SIMPLIFICADO DEL AGUA EN
INVERNADERO: EVALUACIÓN DE TRES
MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA ETC EN EL
CULTIVO ZAPALLITO ITALIANO (*CUCURBITA
PEPO* L.)**

**TOWARDS SIMPLIFIED WATER MANAGEMENT IN
GREENHOUSES: EVALUATION OF THREE ETC ESTIMATION
METHODS IN ZUCCHINI (*CUCURBITA PEPO* L.)**

Christian Eldy Alejandro Santillan

Universidad Nacional Agraria La Molina – Perú

Luis Ramón Razuri Ramírez

Universidad Nacional Agraria La Molina - Perú

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i3.24971

Hacia un manejo simplificado del agua en invernadero: evaluación de tres métodos de estimación de la Etc en el cultivo zapallito italiano (*Cucurbita pepo* L.)

Christian Eldy Alejandro Santillan¹20221692@lamolina.edu.pe<https://orcid.org/0009-0003-0231-541X>Universidad Nacional Agraria La Molina
Perú**Luis Ramón Razuri Ramírez**lrazuri@lamolina.edu.pe<https://orcid.org/0000-0002-2435-2532>Universidad Nacional Agraria La Molina
Perú

RESUMEN

En la agricultura bajo ambiente protegido, la estimación precisa de la evapotranspiración del cultivo (ETc) es crítica para una programación eficiente del riego; sin embargo, los métodos convencionales presentan limitaciones operativas en invernaderos comerciales. El objetivo de esta investigación fue evaluar y comparar tres métodos de estimación de la ETc para la programación del riego en zapallito italiano (*Cucurbita pepo* L.) bajo condiciones de invernadero: el método de Radiación adaptado a invernadero propuesto por Fernández et al. (2001), el Tanque Evaporímetro Clase "A" y el Balance de Agua, bajo dos frecuencias de riego (F1: diaria; F2: cada dos días), mediante un diseño de parcelas divididas en bloques completos al azar con tres repeticiones. El método de Balance de Agua constituyó la referencia más precisa de la ETc real (96.96 L/m²), mientras que el método de Radiación mostró un comportamiento altamente comparable (101.25 L/m²; desviación de 4.4%), posicionándose como alternativa indirecta confiable. El Tanque Clase "A" subestimó los requerimientos hídricos (85.33 L/m²). El tratamiento F1E3 alcanzó el mayor rendimiento (3.25 kg/m²) y la mayor eficiencia en el uso del agua (24.49 kg/m³), seguido de F2E1 (23.42 kg/m³). El coeficiente de cultivo experimental mostró alta concordancia con el Kc estimado mediante tiempo térmico acumulado ($R^2 = 0.9469$). Se concluye que el método de Radiación de Fernández et al. (2001) constituye una herramienta práctica y confiable para la gestión hídrica simplificada en invernadero, con precisión comparable al método directo y menor requerimiento instrumental.

Palabras clave: manejo de agua, evapotranspiración, invernadero, tiempo térmico acumulado, eficiencia

¹ Autor principal.

Correspondencia: 20221692@lamolina.edu.pe

Towards simplified water management in greenhouses: evaluation of three ETc estimation methods in zucchini (*Cucurbita pepo* L.)

ABSTRACT

In protected agriculture, accurate estimation of crop evapotranspiration (ETc) is critical for efficient irrigation scheduling; however, conventional methods present operational limitations in commercial greenhouses. The objective of this study was to evaluate and compare three ETc estimation methods for irrigation scheduling in zucchini (*Cucurbita pepo* L.) under greenhouse conditions: the radiation-based method adapted for greenhouses proposed by Fernández et al. (2001), the Class "A" Evaporation Pan, and the Water Balance method, under two irrigation frequencies (F1: daily; F2: every two days), using a split-plot design in a randomized complete block arrangement with three replications. The Water Balance method provided the most accurate reference for actual ETc (96.96 L/m²), while the Radiation method showed highly comparable performance (101.25 L/m²; deviation of 4.4%), positioning itself as a reliable indirect alternative. The Class "A" Pan systematically underestimated water requirements (85.33 L/m²). The F1E3 treatment achieved the highest yield (3.25 kg/m²) and water use efficiency (24.49 kg/m³), followed by F2E1 (23.41 kg/m³). The experimental crop coefficient showed high agreement with the Kc estimated from accumulated thermal time ($R^2 = 0.9469$). It is concluded that the Fernández et al. (2001) Radiation method constitutes a practical and reliable tool for simplified water management in greenhouses, with precision comparable to the direct method and lower instrumental requirements.

Keywords: management, evapotranspiration, greenhouse, accumulated thermal time, efficiency

*Artículo recibido 20 mayo 2026
Aceptado para publicación: 20 junio 2026*



INTRODUCCIÓN

La gestión eficiente del agua en la agricultura representa uno de los desafíos más urgentes del siglo XXI. Para 2050, cuando la población mundial alcance los 9 000 millones de habitantes, se estima que será necesario producir un 60% más de alimentos, lo que implicará una mayor demanda sobre los recursos hídricos disponibles (FAO, 2024). Actualmente, la agricultura consume el 69% del agua dulce a nivel global, y en numerosas regiones su uso es marcadamente ineficiente (UNESCO, 2021). En este escenario, el cambio climático agudizará la escasez hídrica al intensificar la competencia entre sectores y aumentar la variabilidad en la disponibilidad del recurso (Greve et al., 2018), lo que exige estrategias productivas que maximicen la productividad del agua sin comprometer la seguridad alimentaria.

En este contexto, la agricultura bajo ambiente protegido emerge como una respuesta estratégica. Los invernaderos crean un microclima que favorece la fotosíntesis, reduce la evaporación directa del suelo y permite implementar sistemas de riego de alta precisión, mejorando sustancialmente la eficiencia en el uso del agua respecto a la producción a campo abierto (Valera et al., 2014; Salazar et al., 2014). No obstante, esta misma condición microclimática introduce una complejidad específica: la dinámica evapotranspirativa bajo cubierta difiere estructuralmente de la que ocurre en espacios abiertos, lo que invalida la aplicación directa de modelos estándar desarrollados para condiciones exteriores (Fernández et al., 2001).

El fundamento técnico de la programación del riego reside en la estimación precisa de la evapotranspiración del cultivo (ET_c), definida como la combinación de la evaporación del suelo y la transpiración de la planta. Su cálculo se realiza mediante la expresión $ET_c = E_{To} \cdot K_c$, donde E_{To} es la evapotranspiración de referencia y K_c el coeficiente de cultivo, que varía según la especie y la etapa fenológica (Allen et al., 1998). Conocer con precisión la ET_c es indispensable para suministrar el agua necesaria en cada etapa del cultivo, evitando tanto el déficit hídrico como el lixiviado de nutrientes por exceso de riego (Fernández et al., 2000; Trezza, 2008).

El estándar internacional para estimar la E_{To} es la ecuación de Penman-Monteith FAO-56 (Allen et al., 1998), cuya precisión está ampliamente documentada. Sin embargo, su implementación en invernaderos comerciales enfrenta barreras operativas importantes: requiere la medición simultánea de radiación solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, lo que implica una infraestructura

instrumental frecuentemente inaccesible para productores a pequeña y mediana escala (Butrón, 2017). Esta brecha entre el rigor técnico requerido y la capacidad operativa real constituye el problema central que motiva la presente investigación.

Frente a esta limitación, Fernández et al. (2001) propusieron un modelo de estimación de la ETo basado en la radiación solar interior del invernadero, complementado con el cálculo del coeficiente de cultivo mediante el tiempo térmico acumulado (TTA). Este enfoque fue desarrollado específicamente para el microclima de invernadero en condiciones mediterráneas y requiere menor instrumentación que Penman-Monteith, representando una alternativa indirecta con potencial de simplificación operativa. En contraste, el método del Balance de Agua —basado en la medición directa de la variación del contenido hídrico del sustrato mediante lisimetría— provee una estimación directa de la ETc real, constituyéndose como referencia experimental. Un tercer enfoque, el Tanque Evaporímetro Clase "A", es ampliamente utilizado en campo abierto, pero su comportamiento bajo cubierta no ha sido suficientemente validado.

Estudios previos en cucurbitáceas bajo invernadero en el ámbito mediterráneo (Bonachela et al., 2006; Orgaz et al., 2005) han documentado la inadecuación de métodos calibrados para condiciones exteriores y la utilidad de enfoques basados en radiación interior. Sin embargo, la validación de estos métodos en condiciones de invernadero latinoamericano, con características climáticas y constructivas distintas, representa un vacío en el conocimiento que este trabajo busca contribuir a llenar.

El cultivo de zapallito italiano (*Cucurbita pepo* L.) fue seleccionado por su relevancia comercial creciente en la agricultura protegida peruana, sus ciclos cortos de producción y su alta sensibilidad al manejo hídrico, características que lo convierten en un modelo adecuado para evaluar estrategias de programación del riego. El objetivo de esta investigación fue evaluar y comparar tres métodos de estimación de la ETc —Radiación (Fernández et al., 2001), Tanque Clase "A" y Balance de Agua— bajo dos frecuencias de riego, analizando su efecto sobre la lámina aplicada, el rendimiento y la eficiencia en el uso del agua en condiciones de invernadero, con el propósito de identificar la alternativa técnicamente más precisa y operativamente más accesible para productores comerciales.

METODOLOGÍA

La investigación fue de tipo experimental, prospectiva y cuantitativa, desarrollada entre diciembre de

2021 y marzo de 2022 en el Centro de Investigación y Extensión en Riego (CIER) del Departamento Académico de Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), ubicado en el distrito de La Molina, Lima, Perú.

El experimento se condujo en un invernadero tipo túnel de 14 m de largo $\times$ 10 m de ancho $\times$ 4 m de altura (140 m²), con estructura metálica y cubierta de malla antiáfida de 40 mesh. Se utilizó la variedad Grey Zucchini de zapallito italiano (*Cucurbita pepo* L.), cultivada en macetas de 18 L con sustrato en proporción 2:1:1:1 de materia orgánica, tierra de chacra, arena de río y musgo. El sistema de riego (Figura 1) fue por goteo con emisores autocompensantes Dripnet PCJ de 2 L/h, conectados al sistema NetBow (8 goteros por maceta), con un coeficiente de uniformidad del 93% a 1.5 bar. La fertirrigación se programó por etapas fenológicas (crecimiento, floración y cosecha) mediante soluciones nutritivas ajustadas según análisis fisicoquímicos periódicos del agua y del sustrato, controlando la conductividad eléctrica del drenaje para prevenir acumulación de sales.

Se aplicó un diseño de parcelas divididas en bloques completos al azar (DPD-BCA) con tres repeticiones, como se representa el croquis en la Figura 2, cuyo modelo lineal mixto fue: $Y_{ijk} = \mu + \beta_k + \alpha_i + (\alpha\beta)_{ik} + \gamma_j + (\alpha\gamma)_{ij} + \epsilon_{ijk}$. Las parcelas principales correspondieron a las frecuencias de riego — F1: riego diario y F2: riego cada dos días— y las subparcelas a los métodos de estimación de la ETc — E1: Radiación, E2: Tanque Clase "A" y E3: Balance de Agua—, resultando en seis tratamientos (F1E1, F1E2, F1E3, F2E1, F2E2 y F2E3). Cada parcela principal de 12.5 m $\times$ 3.0 m albergó 18 plantas con separación de 0.8 m entre plantas y 1.0 m entre hileras; se seleccionó al azar una maceta por subparcela como unidad experimental, totalizando 18 unidades experimentales.

Los tres métodos de estimación de la ETc se implementaron de la siguiente manera. El método de Radiación (E1) siguió el modelo de Fernández et al. (2001), que estima la evapotranspiración de referencia (ETo) en invernadero a partir de la radiación solar interior (RSinv) y el día del año (DDA), mediante expresiones lineales diferenciadas para $DDA < 220$ y $DDA > 220$. El coeficiente de cultivo (Kc) se determinó mediante el tiempo térmico acumulado (TTA), calculado a partir de temperaturas máximas y mínimas diarias con temperatura base de 12 °C, óptima de 32 °C y umbral superior de 42 °C, propias de las cucurbitáceas, con valores de Kc entre 0.2 y 1.1 para zapallito italiano. El método del Tanque Evaporímetro Clase "A" (E2) estimó la ETo mediante la expresión $ETo = K_p \cdot E_{pan}$, con

monitoreo diario del nivel de agua. El método de Balance de Agua (E3), considerado método directo de referencia, estimó la ET_c mediante lisimetría en maceta aplicando la ecuación $ET_c = (W_{t0} - W_{t1}) + R - D$, donde la variación del contenido hídrico se determinó por pesaje diario de las macetas a la misma hora. Los datos meteorológicos se registraron con una estación climática autónoma Rainwise Portlog instalada en el interior del invernadero.

Las variables evaluadas fueron: lámina de riego acumulada (L/m^2), tiempo de aplicación (min), rendimiento comercial (kg/m^2), calidad del fruto (número, diámetro polar y ecuatorial, y peso) y eficiencia en el uso del agua —EUA— (kg/m^3). La cosecha se realizó dos veces por semana durante siete semanas (4 de febrero al 21 de marzo de 2022), clasificando los frutos en miniaturas, medianos y grandes según longitud. Todos los datos se analizaron mediante ANOVA con el software RStudio a un nivel de significancia de $p < 0.05$, y las diferencias entre tratamientos se evaluaron con la prueba de Diferencia Mínima Significativa (LSD).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Coefficiente de cultivo y tiempo térmico acumulado

La evolución del coeficiente de cultivo (K_c) a lo largo del ciclo del zapallito italiano (Figura 3), el cual mostró una alta concordancia entre el K_c teórico estimado mediante el tiempo térmico acumulado (K_c -TTA) propuesto por Fernández et al. (2001) y el K_c experimental determinado a partir del cociente ET_c/ET_o , donde la ET_c provino del Balance de Agua (E3) y la ET_o del Tanque Clase "A" (E2). El ajuste mediante regresión polinómica de tercer orden arrojó un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9469$, lo que valida el uso del TTA como herramienta confiable para estimar la dinámica del K_c en condiciones de invernadero. Este resultado es consistente con lo reportado por Bonachela et al. (2006) para cucurbitáceas bajo plástico en el sureste español, donde el enfoque de tiempo térmico demostró mayor robustez que los métodos basados en días después del trasplante, al integrar el efecto de la temperatura sobre el desarrollo fenológico del cultivo. La importancia práctica de este hallazgo reside en que el K_c -TTA permite estimar la evolución del coeficiente de cultivo sin necesidad de observaciones fenológicas directas, lo que simplifica considerablemente la programación del riego a escala comercial.

Evapotranspiración del cultivo

Los valores promedio de ETc evolucionaron según la frecuencia de riego y el método de estimación (Figura 4). El mapa de calor (Figura 5) muestra que la evapotranspiración muestra que con frecuencia diaria (F1) se registraron 2.08, 1.76 y 2.12 mm/día para E1, E2 y E3, respectivamente; mientras que con riego cada dos días (F2) los valores se duplicaron aproximadamente, alcanzando 4.19, 3.54 y 4.11 mm/día. El ANOVA reveló efectos altamente significativos tanto de la frecuencia ($p < 0.001$) como del método de estimación ($p < 0.001$) sobre la ETc, sin que se detectara interacción significativa entre ambos factores ($p = 0.337$), lo que indica que actuaron de manera independiente. La prueba LSD agrupó a F2E1 y F2E3 en el nivel superior (grupo "a"), seguidos de F2E2 (grupo "b"), mientras que los tratamientos con F1 conformaron los grupos inferiores, siendo F1E2 el de menor ETc (1.76 mm/día, grupo "d") (Figura 6).

El comportamiento observado refleja el efecto del intervalo de riego sobre la acumulación de la demanda hídrica: a mayor tiempo entre aplicaciones, mayor es el requerimiento por evento. Destaca que el método del Tanque Clase "A" (E2) subestimó consistentemente la ETc respecto a E1 y E3 en ambas frecuencias, con una lámina acumulada promedio de 85.33 L/m² frente a 101.25 L/m² (E1) y 96.96 L/m² (E3). Esta subestimación de aproximadamente 12% es coherente con lo documentado por Orgaz et al. (2005), quienes demostraron que el microclima de invernadero reduce la evaporación del tanque respecto a la transpiración real del cultivo, invalidando la relación empírica que sustenta al coeficiente Kp calibrado para condiciones exteriores. Por el contrario, el método de Radiación (E1) mostró una desviación de apenas 4.4% respecto al Balance de Agua, confirmando que su formulación, diseñada específicamente para el microclima de invernadero, captura adecuadamente la dinámica evapotranspirativa bajo cubierta.

Lámina de riego

La frecuencia de riego influyó moderadamente en el volumen total aplicado, con promedios de 154.63 L/m² para F1 y 148.08 L/m² para F2, representando una diferencia de aproximadamente 4% (Tabla 1). Entre métodos, el Tanque Clase "A" registró la mayor lámina en F1 (166.43 L/m²) como consecuencia de la sobreestimación provocada por las condiciones de baja ventilación y alta humedad relativa del invernadero, mientras que el Balance de Agua presentó el menor aporte en F1 (132.77 L/m²), reflejando

la precisión del método directo para ajustar el riego a la demanda real. En términos de eficiencia expresada como litros por kilogramo producido, el Balance de Agua (E3) destacó con 40.86 L/kg en F1 y 47.64 L/kg en F2, frente a los valores más altos del Tanque Clase "A" (54.35 y 59.75 L/kg, respectivamente), evidenciando que una mayor lámina aplicada no se tradujo en mayor rendimiento sino en menor eficiencia hídrica.

Rendimiento

El rendimiento total por tratamiento osciló entre 2.47 kg/m² (F2E2) y 3.32 kg/m² (F2E3). El ANOVA identificó al método de estimación de la ETc como el factor más influyente sobre el rendimiento ($p = 0.039$), mientras que la frecuencia de riego mostró un efecto marginal ($p = 0.062$) y la interacción $F \times E$ no fue significativa ($p = 0.785$). La prueba LSD agrupó a F1E3 (1.98 kg/m²), F2E3 (1.91 kg/m²) y F1E1 (1.90 kg/m²) en el grupo estadísticamente superior ("a"), mientras que F2E2 (1.43 kg/m²) conformó el grupo inferior ("b") (Figura 7). Estos resultados evidencian que los métodos de Balance de Agua y Radiación, al proveer estimaciones más precisas de la ETc, permitieron mantener una disponibilidad hídrica adecuada en el sustrato durante las etapas críticas del cultivo, favoreciendo la formación y llenado de frutos. En contraste, la subestimación sistemática del Tanque Clase "A" indujo condiciones de déficit hídrico moderado que comprometieron el rendimiento, especialmente bajo la frecuencia F2, donde la acumulación de la demanda no satisfecha fue mayor.

El rendimiento de F1E3 (3.25 kg/m²) es comparable con los valores reportados por Flores-Velázquez et al. (2014) para zapallito italiano bajo fertirriego en invernadero (2.9–3.4 kg/m²), y superior a los obtenidos en sistemas de producción a campo abierto en condiciones tropicales, lo que confirma la ventaja del ambiente protegido con manejo hídrico preciso.

Eficiencia en el uso del agua (EUA)

El mapa de calor de la EUA (Figura 8) varió entre 16.74 kg/m³ (F2E2) y 24.49 kg/m³ (F1E3). El ANOVA evidenció que la frecuencia de riego no tuvo efecto significativo sobre la EUA ($p > 0.05$), mientras que el método de estimación resultó altamente significativo ($p < 0.001$), y se detectó una interacción significativa entre ambos factores ($p < 0.001$). Este último resultado indica que la respuesta de la EUA depende de la combinación específica de frecuencia y método, lo que confiere particular relevancia a la elección metodológica para la programación del riego.

La prueba LSD identificó a F1E3 (24.49 kg/m³) y F2E1 (23.42 kg/m³) como los tratamientos estadísticamente superiores (grupo "a"), mientras que F2E2 (16.75 kg/m³) conformó el grupo inferior ("d"). El hallazgo más relevante en la interacción (Figura 9) muestra que la perspectiva del manejo simplificado es que F2E1 —riego cada dos días con el método de Radiación de Fernández et al. (2001)— alcanzó una EUA estadísticamente equivalente a F1E3, pese a requerir menor frecuencia de intervención. Esto implica que el método indirecto de Radiación, al estimar con precisión comparable al Balance de Agua la demanda evapotranspirativa del invernadero, permite sostener una alta productividad hídrica con menor complejidad operativa. Este resultado constituye la principal aportación práctica del presente trabajo: valida el método de Fernández et al. (2001) como alternativa viable para productores comerciales que no disponen de la infraestructura necesaria para implementar el Balance de Agua o el método de Penman-Monteith FAO-56, sin sacrificar eficiencia productiva. En conjunto, los resultados posicionan al método de Radiación como un punto de equilibrio entre rigor técnico y simplicidad instrumental, representando un avance hacia la democratización de las herramientas de programación del riego en la agricultura protegida latinoamericana.

ILUSTRACIONES, TABLAS, FIGURAS

Figura 1: Diseño sistema de riego en invernadero para zapallito italiano en maceta

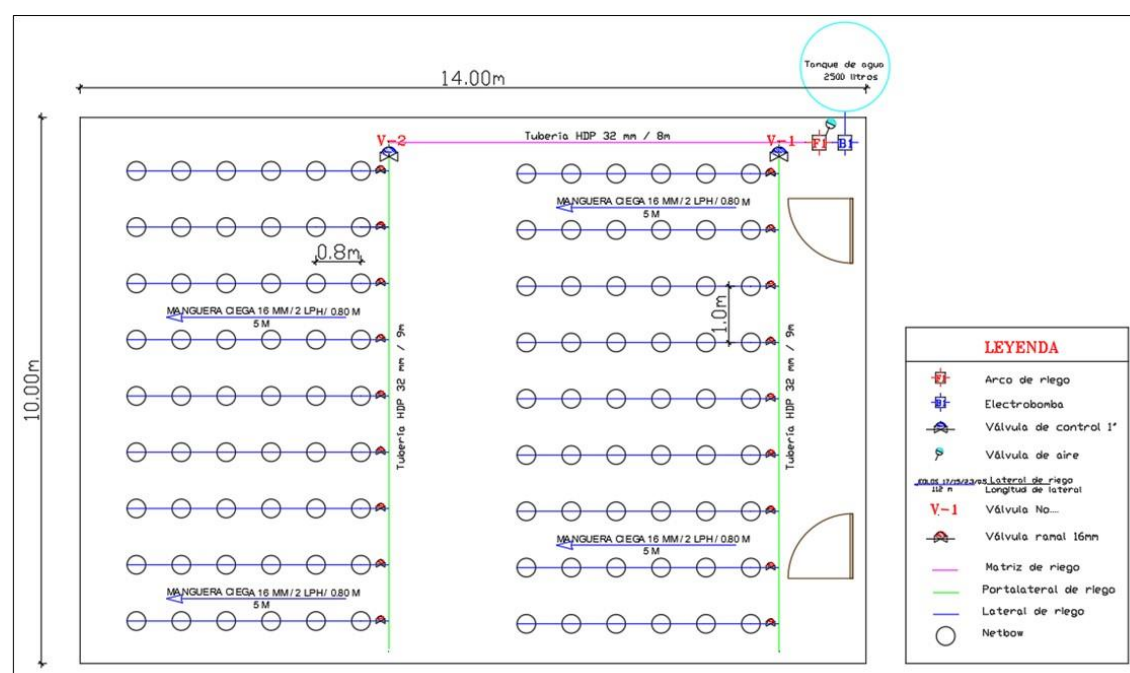


Figura 2: Croquis experimental desarrollado en zapallito en el CIER

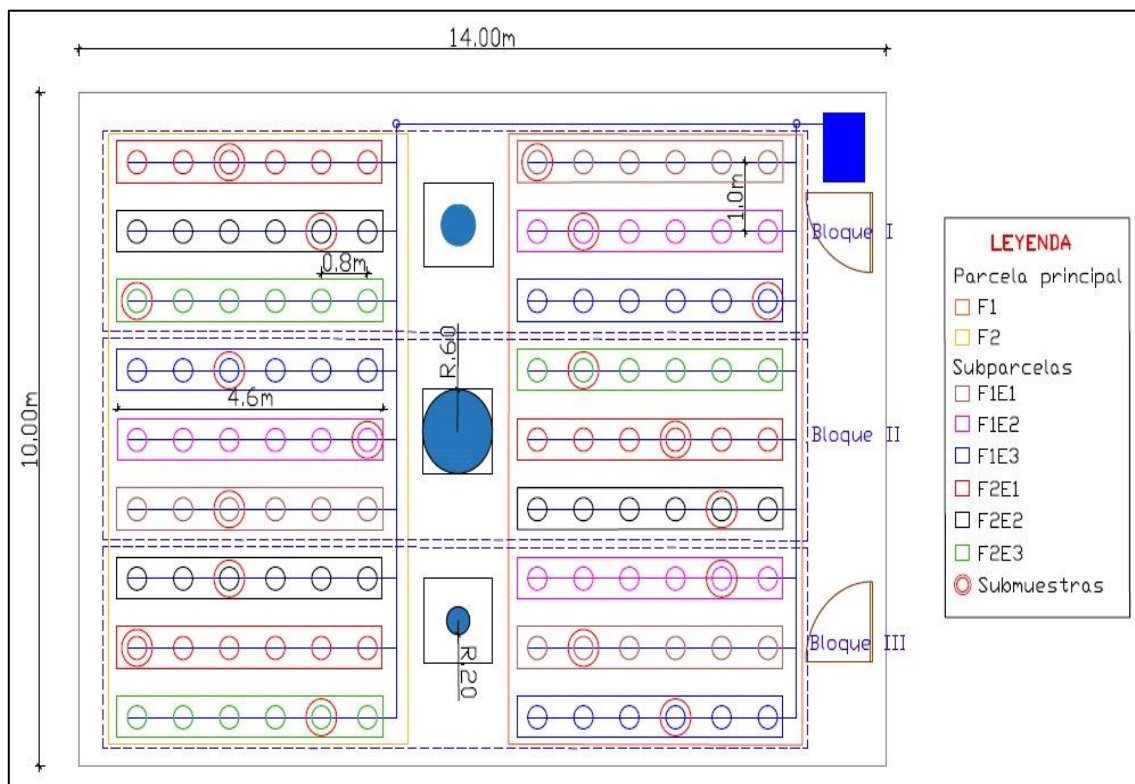


Figura 3: Relación del Kc-TTA y Kc estimado de zapallito italiano

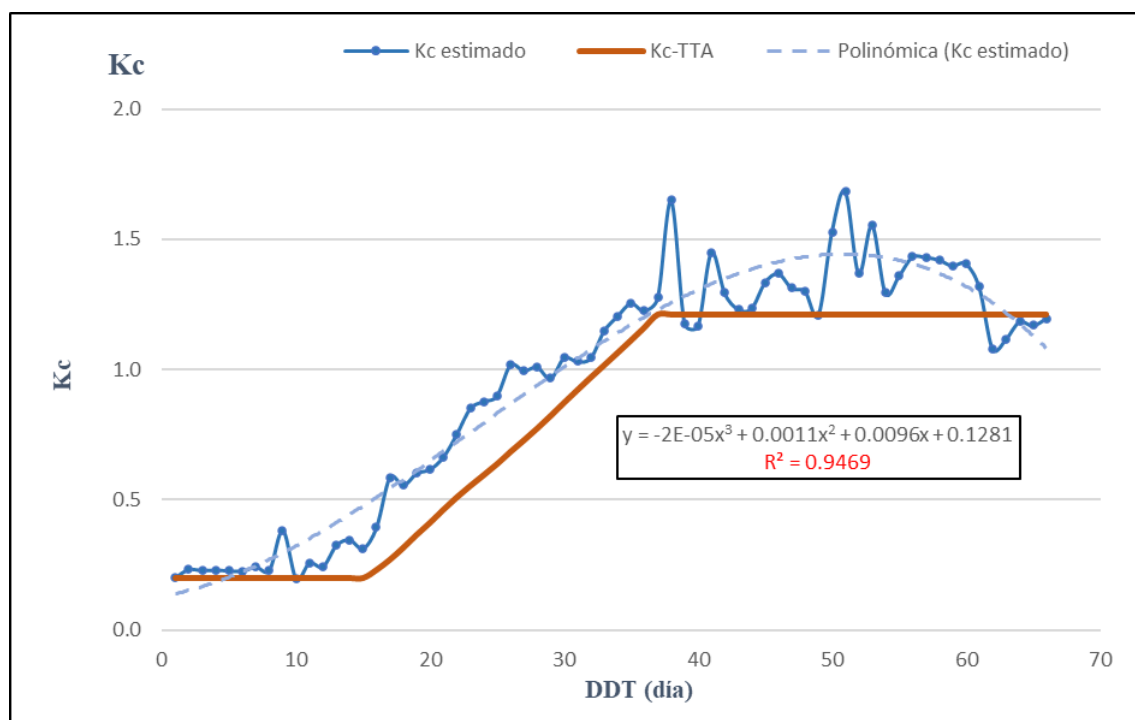


Figura 4: Evolución de la evapotranspiración del cultivo según tratamiento

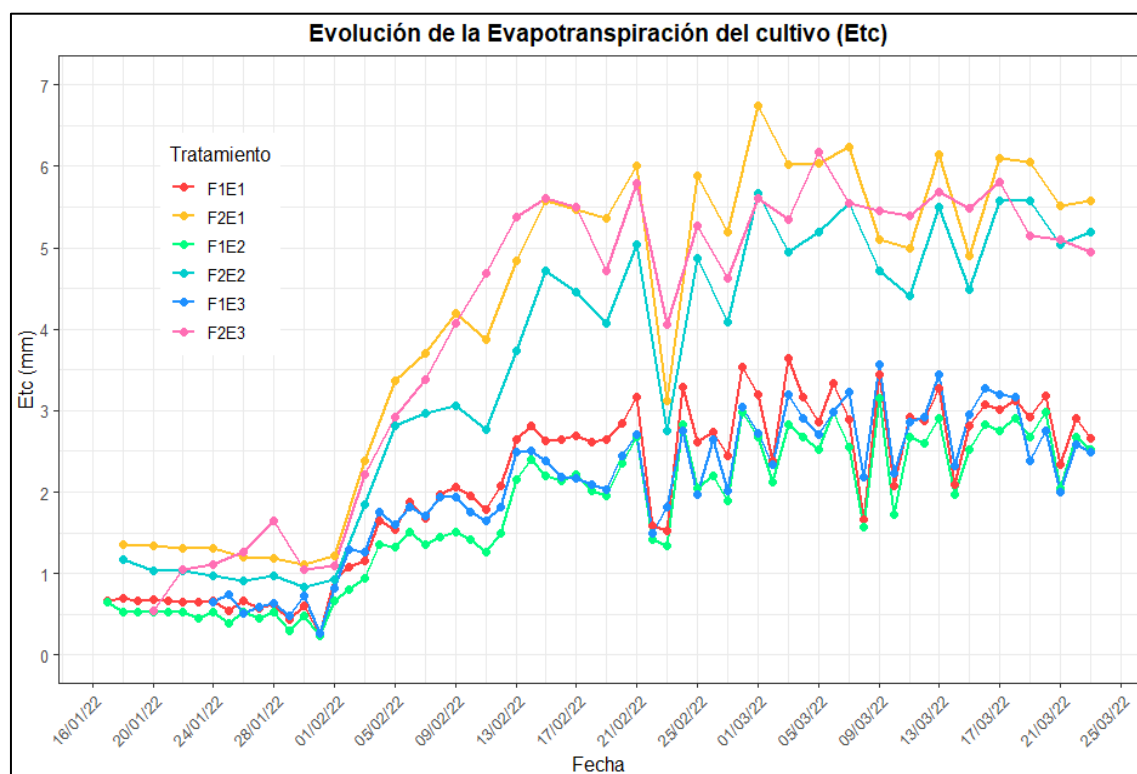


Figura 5: Mapa de calor de la evapotranspiración según tratamiento

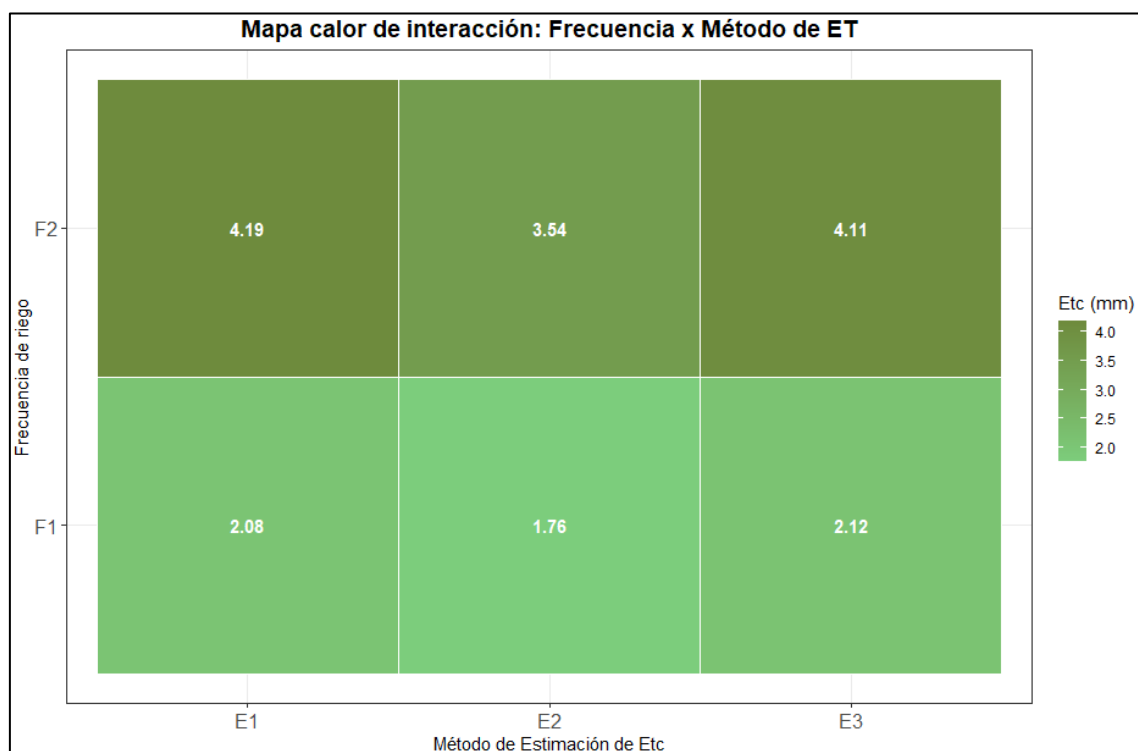


Figura 6: Diagrama de caja de la Evapotranspiración de cultivo en $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$ con agrupación estadística según la prueba LSD

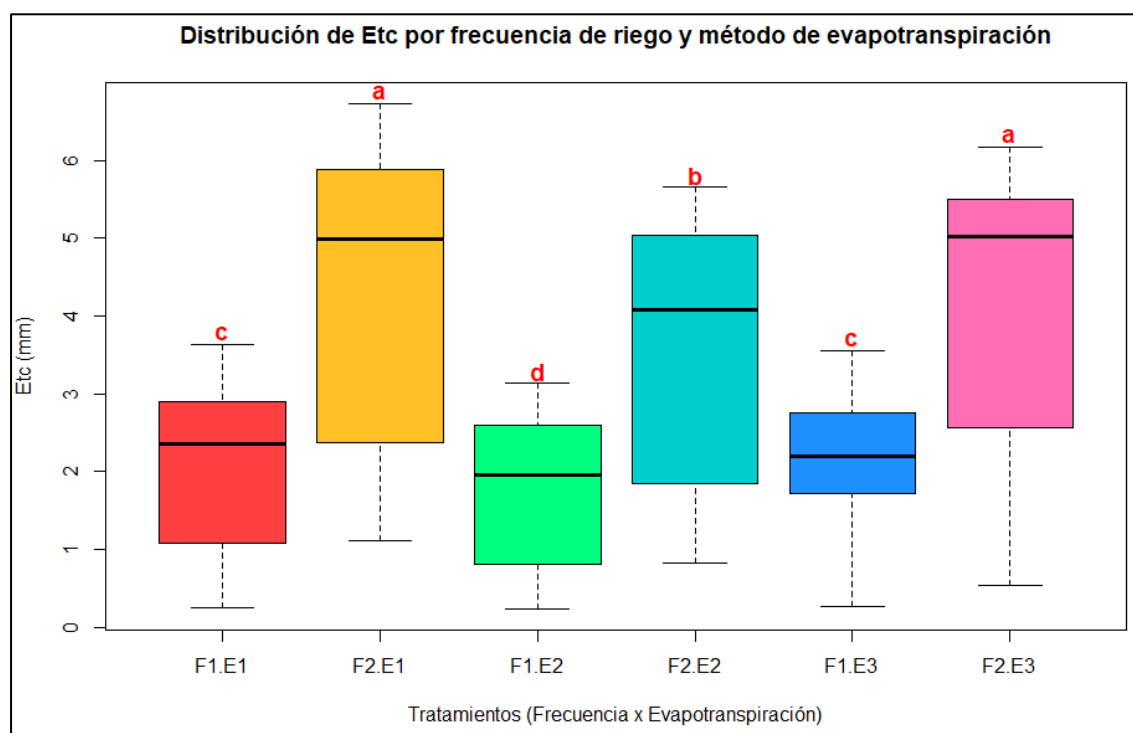


Tabla 1: Lámina de riego aplicado en L/m^2 según tratamiento

Frecuencia		F1			F2			
Método	E1	E2	E3	Promedio	E1	E2	E3	Promedio
litros	2371	2397	1912	2227	1999	2123	2275	2132
litros/m²	164.68	166.43	132.77	154.63	138.83	147.42	157.97	148.08
litros/planta	131.74	133.15	106.22	123.70	111.07	117.94	126.38	118.46
litros/fruto	8.56	9.44	7.38	8.46	8.44	9.48	7.38	8.43
litros/kg	51.03	54.35	40.86	48.75	42.72	59.75	47.64	50.03

Figura 7: Distribución del rendimiento en kg/m² por frecuencia de riego y método de estimación, con agrupación estadística según la prueba LSD

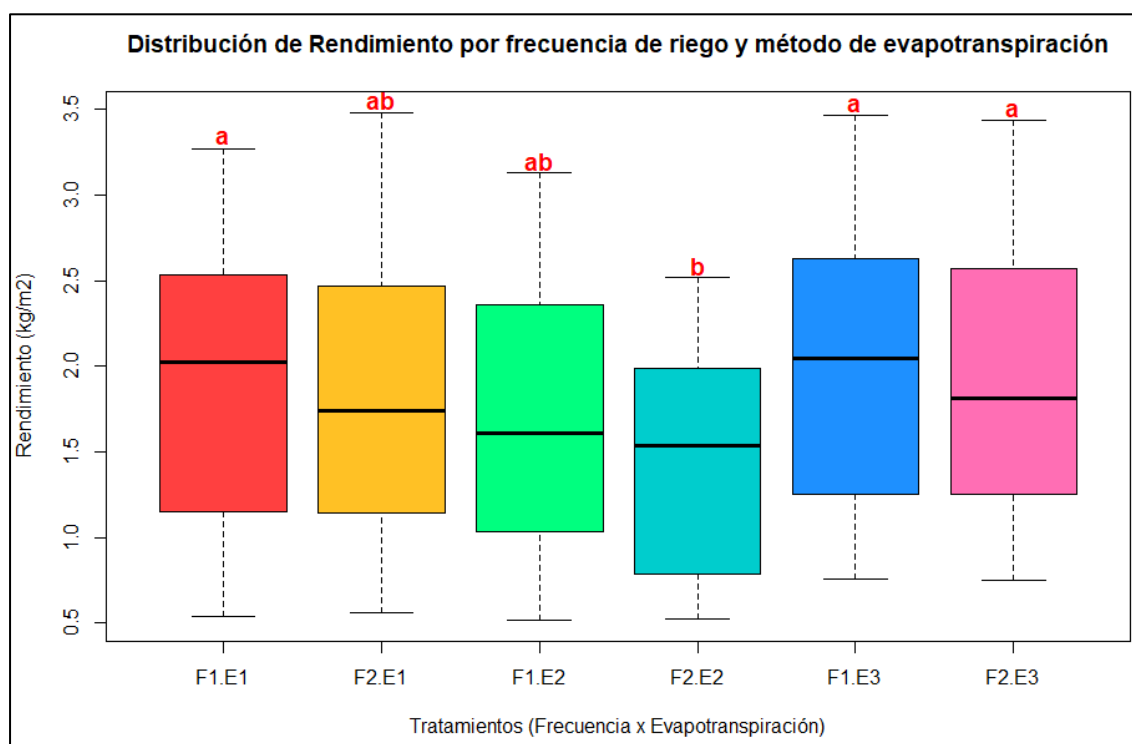


Figura 8: Mapa de calor del uso eficiente del agua según tratamiento

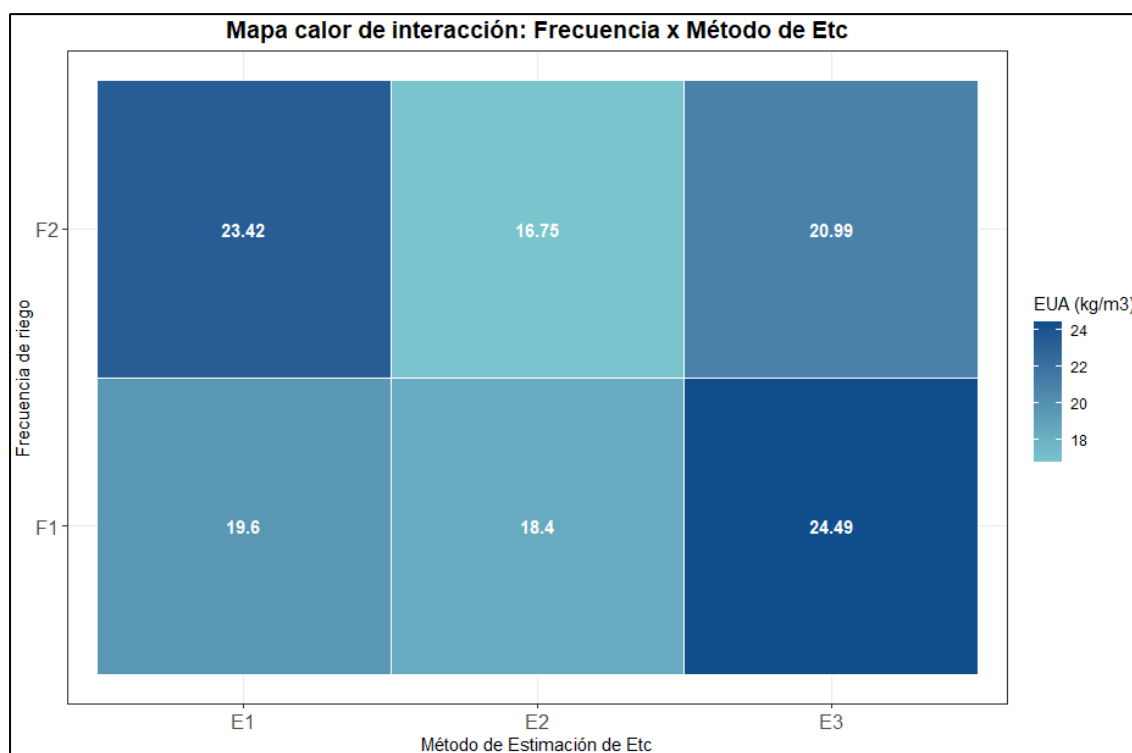
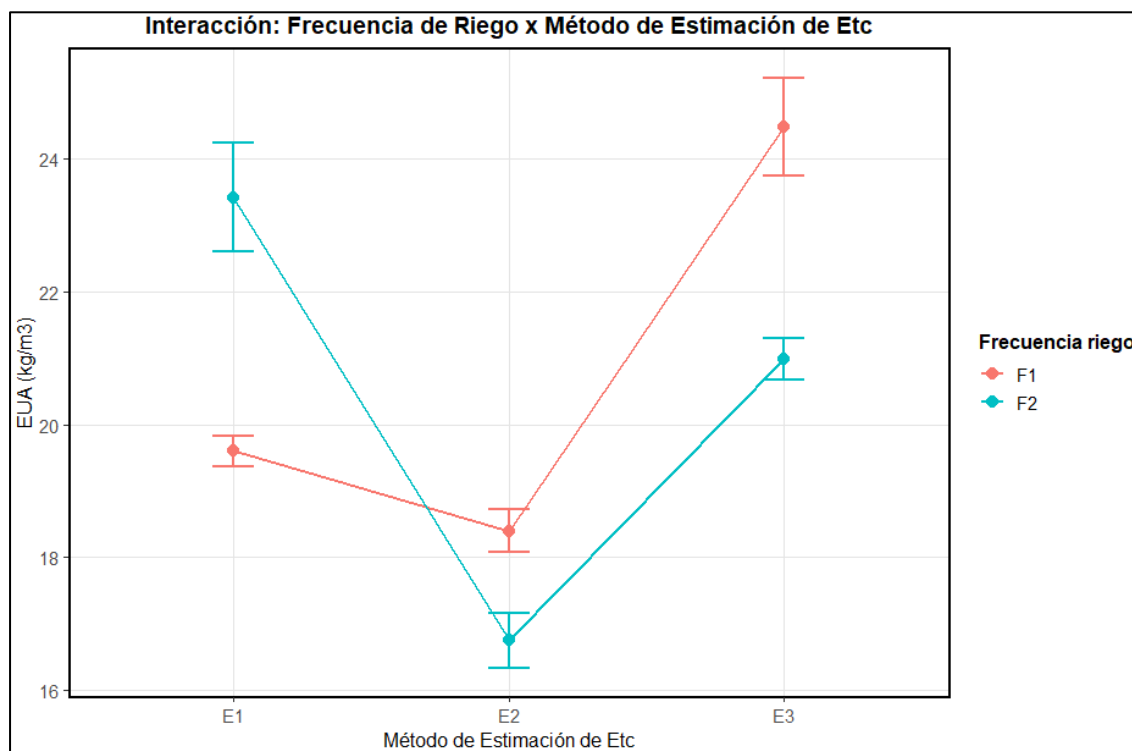


Figura 9: Interacción entre la frecuencia de riego y el método de estimación respecto a la eficiencia en el uso del agua (EUA)



CONCLUSIONES

Los tres métodos de estimación de la ETc evaluados produjeron diferencias técnicamente relevantes en la programación del riego bajo condiciones de invernadero. El método del Tanque Clase "A" subestimó sistemáticamente los requerimientos hídricos del cultivo en aproximadamente 12% respecto al Balance de Agua, consecuencia directa de su calibración para condiciones de campo abierto, que no considera la alteración del régimen evaporativo introducida por el microclima de invernadero. Esta inadecuación se tradujo en los menores rendimientos y la menor eficiencia hídrica del experimento, particularmente bajo la frecuencia F2, confirmando que su uso directo en ambientes protegidos no es recomendable sin una recalibración específica.

El método de Radiación propuesto por Fernández et al. (2001) demostró ser técnicamente equivalente al Balance de Agua como referencia directa, con una desviación de apenas 4.4% en la lámina acumulada y una EUA estadísticamente indistinguible en la combinación F2E1 (23.42 kg/m³) respecto a F1E3 (24.49 kg/m³). Esta equivalencia funcional, respaldada por la alta concordancia entre el Kc experimental y el estimado mediante tiempo térmico acumulado ($R^2 = 0.9469$), valida al método de Radiación como alternativa indirecta confiable para invernadero, con la ventaja operativa de requerir únicamente la

medición de radiación solar interior y temperaturas extremas diarias.

El rendimiento del cultivo estuvo determinado principalmente por el método de estimación de la ETc ($p = 0.039$), siendo los métodos E1 y E3 los que sostuvieron la mayor productividad. La frecuencia de riego ejerció un efecto marginal sobre el rendimiento ($p = 0.062$), mientras que la interacción entre ambos factores resultó significativa exclusivamente sobre la EUA ($p < 0.001$), evidenciando que la eficiencia hídrica depende de la combinación específica de frecuencia y método, y no de cada factor de manera aislada.

En síntesis, el método de Radiación de Fernández et al. (2001) representa el punto de equilibrio entre rigor técnico y simplicidad instrumental para la programación del riego en invernadero, constituyendo una herramienta accesible para productores comerciales sin infraestructura meteorológica completa. Su validación en condiciones de invernadero latinoamericano amplía el alcance geográfico del modelo, originalmente desarrollado para el mediterráneo español.

Quedan por resolver interrogantes de relevancia para futuras investigaciones: la recalibración del coeficiente Kp del Tanque Clase "A" bajo condiciones específicas de invernadero tropical podría habilitar su uso con mayor precisión; asimismo, la validación del método de Radiación en otros cultivos hortícolas bajo cubierta y en diferentes tipologías de invernadero —con distintos materiales de cobertura y niveles de ventilación— permitirá establecer su rango de aplicabilidad y los límites de su transferibilidad a otras condiciones productivas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Bonachela, S., González, A. M., & Fernández, M. D. (2006). Irrigation scheduling of plastic greenhouse vegetable crops based on historical weather data. *Irrigation Science*, 25(1), 53–62. <https://doi.org/10.1007/s00271-006-0034-y>
- Butrón, C. (2017). Calibración de la ecuación FAO Penman-Monteith para calcular la evapotranspiración de referencia (ETo) en condiciones de invernadero en el Centro Experimental de Cota Cota [Tesis de maestría, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio Institucional

- UMSA. <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/15245/TM-2461.pdf>
- FAO. (2024). La labor de la FAO en el agua. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/water/es/>
- Fernández, M., Gallardo, M., & Bonachela, S. (2000). Necesidades hídricas y programación de riegos en los cultivos hortícolas en invernadero y suelo enarenado de Almería. Universidad Nicolás Salmerón.
- Fernández, M., Orgaz, F., Fereres, E., López, J., Céspedes, A., Pérez, J., Bonachela, S., & Gallardo, M. (2001). Programación del riego en los cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español. Cajamar Caja Rural.
- Flores-Velázquez, J., Quezada-Martín, M. R., & Montero, J. I. (2014). Producción de calabacita (*Cucurbita pepo* L.) en invernadero bajo fertirriego en condiciones tropicales. Agrociencia, 48(4), 367–378.
- Greve, P., Kahil, T., Mochizuki, J., Schinko, T., Satoh, Y., Burek, P., Fischer, G., Tramberend, S., Burtscher, R., Langan, S., & Wada, Y. (2018). Global assessment of water challenges under uncertainty in water scarcity projections. Nature Sustainability, 1(9), 486–492. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0134-9>
- Orgaz, F., Fernández, M. D., Bonachela, S., Gallardo, M., & Fereres, E. (2005). Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. Agricultural Water Management, 72(2), 81–96. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.010>
- Rázuri, L., Teresa, A., Hernández, J., & Rosales, J. (2009). Manejo del agua en el cultivo del ají (*Capsicum chinense* Jacq.) a través de tensiómetro y tina de evaporación, utilizando riego localizado. Saber ULA, 3, 1–16. <http://www.saber.ula.ve/bitstream/handle/123456789/29811/articulo1.pdf>
- Salazar, M., Rojano, A., & López, I. (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. Tecnología y Ciencias del Agua, 5(2), 1–7. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v5n2/v5n2a12.pdf>
- Trezza, R. (2008). Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela: ¿Cuál método utilizar? Bioagro, 20(1), 1–10. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612008000200002



- UNESCO. (2021). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: el valor del agua. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000378890>
- Valera, C., Rázuri, L., Rosales, J., Jaimez, R., Proaño, J., & Mora, A. (2014). Programación y manejo del riego localizado en invernadero mediante tres métodos de estimación de la evapotranspiración en el cultivo de pimentón (*Capsicum annuum* L.). *Agricultura Andina*, 20, 1–14. <http://bdigital2.ula.ve:8080/xmlui/bitstream/handle/654321/377/articulo4.pdf>