



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES
CARRERA DE INGENIERIA AGRICOLA

Trabajo de Integración Curricular
previa a la obtención del Grado
Académico de Ingeniero Agrícola

Proyecto de Investigación:

EVALUACIÓN DE MÉTODOS INDIRECTOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL
CULTIVO *Cucumis Sativus* L (PEPINO), COMPARADOS CON LOS LISÍMETROS DE
DRENAJE.

Autor:

Jordy Fabricio Villacis Tipantuña

Director del Proyecto de Investigación:

Ing. Marlon Fernando Monge Freile

Mocache – Los Ríos – Ecuador

2026



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **Jordy Fabricio Villacis Tipantuña**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este documento, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

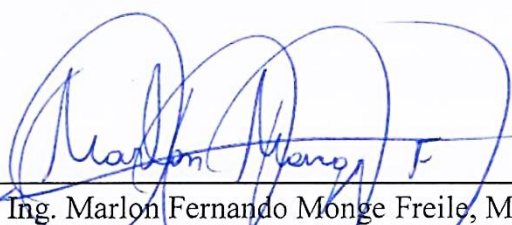
Jordy Fabricio Villacis Tipantuña

C.C.: 1753658820



INFORME FAVORABLE DEL DIRECTOR/A SOBRE LA CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, **Ing. Marlon Fernando Monge Freile**, Docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que el estudiante **Jordy Fabricio Villacis Tipantuña**, realizó el Proyecto de Investigación de grado titulado “**Evaluación de métodos indirectos de evapotranspiración del cultivo *Cucumis sativus* L (Pepino), comparados con los lisímetros de drenaje.**”, previo a la obtención del título de Grado de **Ingeniero Agrícola**, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto en los Arts. 52, 54, 57 y 59 del Reglamento de la Unidad de Integración Curricular.



Ing. Marlon Fernando Monge Freile, Msc.

DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO

El suscrito, **Ing. Marlon Fernando Monge Freile**, mediante el presente cumpla en presentar a usted, el informe de proyecto de Investigación titulado "**Evaluación de métodos indirectos de evapotranspiración del cultivo *Cucumis sativus* L (Pepino), comparados con los lisímetros de drenaje.**" Presentado por **Jordy Fabricio Villacis Tipantuña**, egresado de la Carrera de Ingeniería agrícola, que fue revisado bajo mi dirección según resolución del Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, que se ha desarrollado de acuerdo al Artículo 57 y 59 del Reglamento de la Unidad de Integración Curricular de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo y cumple con el requerimiento de análisis del sistema COMPILATIO el cual avala los niveles de originalidad en un 85% y similitud 15%, del trabajo investigativo. Valido este documento para que el estudiante siga con los trámites pertinentes, de acuerdo como lo establece el Reglamento.

ejemplo



Certificado de análisis
Compilatio Magister+ | UTEQ-ECU

VILLACIS TIPANTUÑA JORDY FABRICIO

ID : 2afd4d1757c043b3d342e1c4deba7822276b8345



8%

Textos sospechosos

Nombre del fichero : VILLACIS TIPANTUÑA JORDY FABRICIO.txt
Tamaño del archivo original : 2.43 MB
Número de palabras : 16.183
Número de caracteres : 110811

Depositante : MARLON FERNANDO MONGE FREILE
Fecha de depósito : 1 de mayo de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 1 de mayo de 2026

Ing. Marlon Fernando Monge Freile M.Sc

DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



CERTIFICACIÓN DE LOS INTEGRANTES DEL TRIBUNAL

Quevedo, 11 de mayo del 2026

Ing. Francisco Espinosa Carrillo PhD.

FACULTAD CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES

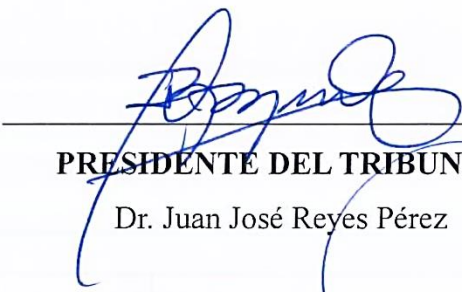
Presente

Para los trámites pertinentes remito al presente el informe favorable de consenso:

INFORME FAVORABLE

Los abajo firmantes que actuamos como Presidente y Miembros del Tribunal de la Unidad de Titulación; designada por el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, tenemos a bien de **CERTIFICAR** que el Proyecto de grado académico, Sr. Jordy Fabricio Villacis Tipantuña con cédula #1753658820, estudiante de la carrera de Ingeniería Agrícola; fue revisado por este tribunal y se encuentra aprobado y listo para su Sustentación. Dando cumplimiento a lo estipulado por el reglamento, firmo y dando fe de lo actuado, los que conformamos este tribunal.

Atentamente,



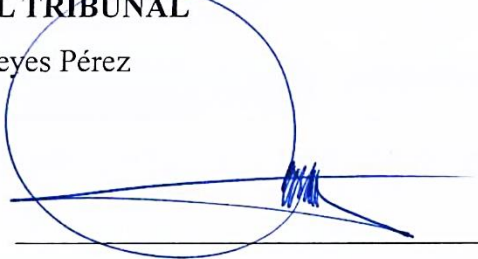
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Dr. Juan José Reyes Pérez



MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Vicente Agustín Valdivieso Vidal M.Sc.



MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Marín Cuevas Carmen Victoria, M.Sc.

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, cuya fortaleza, guía y enseñanzas fueron fundamentales para orientarme en el camino correcto de la vida y brindarme el valor necesario para superar cada desafío. Su presencia ha sido esencial en esta etapa tan importante de mi formación estudiantil y profesional.

Asimismo, extendiendo mi sincera gratitud a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, que me abrió las puertas y me permitió formar parte de esta gran familia académica. A los docentes, cuyo conocimiento, paciencia y dedicación fueron pilares a lo largo de mi carrera, les agradezco profundamente por sus valiosas enseñanzas, que han sido fundamentales en mi desarrollo profesional.

Manifiesto mi más profundo agradecimiento al Ing. Marlon Fernando Monge Freile, director de esta tesis, por su constante respaldo, su orientación generosa y su invaluable contribución, los cuales fueron esenciales para el desarrollo de esta investigación.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi familia por su inquebrantable apoyo, motivación y confianza en mi capacidad para alcanzar esta meta. Su respaldo incondicional ha sido mi mayor fortaleza, brindándome aliento en los momentos de desafío y guiándome en cada etapa de este proceso de aprendizaje. Su amor y comprensión han sido fundamentales para mi crecimiento personal y profesional.

A mis compañeros y amigos, les expreso mi profunda gratitud por su valiosa amistad, apoyo incondicional y compañía a lo largo de esta etapa universitaria. Su camaradería fue fundamental para seguir adelante y alcanzar uno de mis más anhelados objetivos.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de tesis a mi familia, quienes me acompañaron en cada paso del camino, alentándome a no rendirme jamás. Su apoyo incondicional fue fundamental en todo momento.

A mi madre, Mariana Tipantuña Vela, por su constante cuidado y dedicación a mi bienestar y educación, brindándome su apoyo incondicional desde el inicio hasta la culminación de mi carrera. Su perseverancia y confianza en mí han sido clave para lograr mi anhelado objetivo de ser profesional.

A mi padre, Jorge Villacis Orozco, por sus oraciones constantes, su amor inagotable y, especialmente, por inculcarme valores fundamentales como la honestidad, la responsabilidad, la perseverancia y el compromiso durante mi etapa académica. Su guía y ejemplo han sido pilares sólidos en mi desarrollo personal y profesional.

Al director de tesis Ing. Marlon Fernando Monge Freile por ser un gran docente y persona durante la trayectoria de este proyecto de investigación.

Jordy Fabricio Villacis Tipantuña

RESUMEN

La gestión eficiente del agua constituye uno de los mayores desafíos en la agricultura moderna, especialmente en cultivos hortícolas de alta sensibilidad hídrica. El objetivo general de esta investigación fue evaluar la precisión de cuatro métodos indirectos de estimación de la demanda hídrica en el cultivo de pepino, comparándolos con mediciones directas obtenidas mediante lisímetros de drenaje bajo las condiciones agroclimáticas del campus experimental “La María” de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, en Mocache, provincia de Los Ríos. La metodología se centró en el análisis del sistema suelo–planta–atmósfera, registrando diariamente el volumen de agua aplicada, el drenaje recolectado, la humedad del suelo y las variables meteorológicas, y aplicando los métodos Penman–Monteith, Hargreaves–Samani, Priestley–Taylor y tanque Clase A; posteriormente, se realizó un análisis estadístico basado en error, correlación y concordancia. Los resultados principales evidenciaron que el consumo hídrico del cultivo varía según la etapa fenológica, siendo mayor en fases de desarrollo y fructificación; además, los métodos Penman–Monteith, Priestley–Taylor y Hargreaves presentaron alta correlación con el lisímetro ($R^2 > 0,97$), destacando Penman–Monteith por su mayor precisión ($RMSE = 5,97$), mientras que el tanque Clase A mostró baja confiabilidad debido a limitaciones en los datos. En conclusión, la validación local de estos métodos, especialmente Penman–Monteith, permite mejorar la planificación del riego, optimizar el uso eficiente del recurso hídrico y fortalecer la sostenibilidad del cultivo en condiciones tropicales.

Palabras claves: balance hídrico, coeficiente de cultivo, programación de riego. gestión hídrica, consumo de agua, modelos agrometeorológicos, eficiencia de riego.

ABSTRACT

Efficient water management is one of the main challenges in modern agriculture, especially in highly water-sensitive horticultural crops. The general objective of this study was to evaluate the accuracy of four indirect methods for estimating crop water demand in cucumber, comparing them with direct measurements obtained through drainage lysimeters under the agroclimatic conditions of the “La María” experimental campus of the Technical State University of Quevedo, located in Mocache, Los Ríos province. The methodology focused on analyzing the soil–plant–atmosphere system by daily recording applied irrigation volume, collected drainage, soil moisture, and meteorological variables, and applying the Penman–Monteith, Hargreaves–Samani, Priestley–Taylor, and Class A pan methods; subsequently, a statistical analysis based on error, correlation, and agreement was performed. The main results showed that crop water consumption varies according to the phenological stage, reaching higher values during development and fruiting phases. Additionally, the Penman–Monteith, Priestley–Taylor, and Hargreaves methods showed high correlation with the lysimeter ($R^2 > 0.97$), with Penman–Monteith being the most accurate (RMSE=5.97), while the Class A pan method showed low reliability due to data limitations. In conclusion, local validation of these methods, especially Penman–Monteith, improves irrigation planning, optimizes water use efficiency, and enhances the sustainability of cucumber production under tropical conditions.

Keywords: Water balance, crop coefficient, irrigation scheduling, water management, water consumption, agrometeorological models, irrigation efficiency.

TABLA DE CONTENIDO

Proyecto	i
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	ii
CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO.....	iv
AGRADECIMIENTO	vi
DEDICATORIA.....	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
TABLA DE CONTENIDO	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE TABLAS.....	xv
CÓDIGO DUBLÍN.....	xvi
Introducción.....	1
CAPÍTULO I.....	3
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1. Problema de investigación.....	4
1.1.1. Planteamiento del problema.....	4
Diagnóstico	4
Pronóstico	5
1.1.2. Formulación del problema	5
1.1.3. Sistematización del problema	5
1.2. Objetivos.....	6
1.2.1. Objetivo general	6
1.2.2. Objetivos específicos	6
1.3. Justificación.....	7
CAPÍTULO II.....	8
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	8
2.1. Marco conceptual	10
2.1.1. Evapotranspiración	10
2.1.2. Transpiración	10
2.1.3. Evaporación.....	10
2.1.4. Evapotranspiración del cultivo (ETc)	11

2.1.5. Evapotranspiración de referencia (ET _o).....	11
2.1.6. Coeficiente del cultivo (K _c)	11
2.1.7. Evapotranspiración en pepino y cultivos hortícolas	12
2.2. Marco referencial.....	12
2.2.1. Cultivo de pepino.....	12
2.2.2. Taxonomía	13
2.2.3. Sistema Radicular	13
2.2.4. Tallo.....	14
2.2.5. Hoja y flor.....	14
2.2.6. Semilla	14
2.2.7. Ciclo Vegetativo	14
2.2.8. Requerimientos agroclimáticos	15
2.2.8.1. Temperatura.	15
2.2.8.2. Precipitación.	15
2.2.8.3. Luminosidad.	15
2.2.9. Requerimiento hídrico del pepino	16
2.2.10. Métodos de estimación de evapotranspiración	16
2.2.10.1. Métodos Directos.....	16
2.2.10.1.1. Lisímetro de drenaje.....	16
2.2.11. Métodos Indirectos	17
2.2.11.1. Método De Penman-Monteith Fao56.	17
2.2.11.2. Método Hargreaves.	18
2.2.11.3. Método De Priestley And Taylor.	22
2.2.11.4. Método De Tanque Evaporímetro Clase A.....	22
CAPÍTULO III	24
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	24
3.1. Localización.....	25
3.2. Tipo de Investigación	26
3.3. Método de investigación.....	26
3.3.1. Método deductivo	26
3.3.2. Método inductivo	27
3.4. Fuentes de recopilación de información	27
3.4.1. fuentes primarias	27
3.4.2. Fuentes secundarias	27

3.4.3. Fuentes terciarias	27
3.5. Diseño de la investigación.....	28
3.5.1. Tipo de estudio.....	28
3.5.2. Unidad de estudio y población	28
3.5.3. Factores de estudio y tratamientos.....	29
3.5.4. Diseño no experimental	30
3.5.5. Variables del estudio.....	31
3.5.5.1. Variables dependientes.	31
3.5.5.2. Variables independientes observadas.	31
3.5.5.3. Variables climáticas.....	32
3.5.5.4. Variables de evaluación del desempeño de los métodos	32
3.6. Instrumentos de investigación	32
3.6.1. Manejo del experimento	33
3.6.1.1. Preparación del suelo.....	34
3.6.1.2. Preparación de lisímetros.....	34
3.6.1.3. Distribución de lisímetros.....	35
3.6.1.4. Siembra y manejo del cultivo.....	35
3.6.1.5. Manejo del riego.....	35
3.6.1.5. Sensor de humedad.....	37
3.6.1.5. Registro.....	37
3.6.2. Variables evaluadas	37
3.6.2.1. Evapotranspiración del cultivo.	37
3.6.2.2. Evapotranspiración de Referencia.	38
3.6.3. Métodos de referencia.....	38
3.6.3.1. Penman–Monteith.....	38
3.6.3.2. Tanque evaporímetro Clase A.....	39
3.6.3.3. Hargreaves.....	40
3.6.3.4. Priestley–Taylor.	40
3.6.4. Coeficiente del cultivo (K_c).	41
3.7. Tratamiento de los datos.....	41
3.8. Recursos humanos y materiales.....	41
3.8.1. Recursos humanos	42
3.8.2. Materiales.....	42
3.8.2.1. Material Vegetal.	42
3.8.2.2. Materiales de oficina.....	42

3.8.2.4. <i>Materiales de campo</i>	42
CAPÍTULO IV	43
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
4.1. Resultados.....	44
4.1.1. <i>Evapotranspiración del cultivo</i>	44
4.1.2. <i>Comparación de diferentes métodos de estimación de la evapotranspiración acumulada</i>	45
4.1.3. <i>Análisis estadístico entre los métodos indirectos y el lisímetro</i>	46
4.1.4. <i>Comparación de k_c en los lisímetros</i>	47
4.2. Discusión	48
CAPÍTULO V.....	52
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
5.1. Conclusiones.....	53
5.2. Recomendaciones	54
CAPÍTULO VI	55
BIBLIOGRAFÍA	55
Bibliografía	56
CAPÍTULO VII.....	67
ANEXOS	67
7.1. Anexos	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.....	25
Figura 2.....	34
Figura 3.....	35
Figura 4.....	37
Figura 5.....	44
Figura 6.....	45
Figura 7.....	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	12
Tabla 2	13
Tabla 3	18
Tabla 4	22
Tabla 5	46

CÓDIGO DUBLÍN

Título:	"Evaluación de métodos indirectos de evapotranspiración del cultivo <i>Cucumis sativus</i> L. (Pepino), comparados con los lisímetros de drenaje."
Autor:	Jordy Fabricio Villacis Tipantuña
Palabras Clave:	Balance hídrico, coeficiente de cultivo, programación de riego. gestión hídrica, consumo de agua, modelos agrometeorológicos, eficiencia de riego.
Fecha de publicación:	12 de marzo del 2026
Editorial:	Quevedo: UTEQ, 2026
Resumen: Abstract:	La gestión eficiente del agua constituye uno de los mayores desafíos en la agricultura moderna, especialmente en cultivos hortícolas de alta sensibilidad hídrica..... Efficient water management is one of the main challenges in modern agriculture, especially in highly water-sensitive horticultural crops. The general objective of this study was to evaluate the accuracy of four indirect methods for estimating crop water demand in cucumber, comparing them with direct measurements obtained through drainage lysimeters under the agroclimatic conditions of the “La María” experimental campus of the Technical State University of Quevedo, located in Mocache, Los Ríos province.....
Descripción:	
URL:	

Introducción

Actualmente, se encuentran en uso diversas aproximaciones indirectas para valorar la evapotranspiración de referencia ETo , los métodos de Penman–Monteith FAO-56, Hargreaves, Priestley–Taylor y el estanque Clase A (Usta, 2024). son todos considerados como los más utilizados, ya que su descripción está sustentada en ser una aproximación para evaluar suelos en una amplia variedad de condiciones agroclimáticas y siendo su precisión dependiente de la respectiva aplicabilidad (Gul et al., 2021).

Sin embargo, en el medio tropical todavía no existe suficiente información sobre su precisión y viabilidad en relación con su validación local, siendo así un vacío importante respecto de este tipo de conocimiento (Chipula et al., 2025; Gul et al., 2021). La falta de calibración puede traducirse en un subestimar de los requerimientos hídricos y de cómo afecta a la eficacia del riego y a los rendimientos agrícolas (Geng et al., 2023)

Gracias a los lisímetros de drenaje es posible medir la evapotranspiración del cultivo de forma directa y al mismo tiempo precisa en condiciones de campo reales, convirtiéndose en herramientas prácticas para la evaluación y ajuste de procedimientos indirectos (Tamimi et al., 2022). A través de su implementación, es posible contrastar los resultados obtenidos por los métodos indirectos y determinar el grado de ajuste o desviación que presentan respecto a los valores reales medidos (Kumari et al., 2022). De este modo, los lisímetros se convierten en una herramienta clave para calibrar modelos y ajustar parámetros como el coeficiente de cultivo (Kc) (Goyal et al., 2023).

El coeficiente de cultivo (Kc) permite convertir la evapotranspiración de referencia (ETo) en evapotranspiración del cultivo (ETc), dado que, además su valor dependerá de varios factores como el tipo de cultivo, la etapa fenológica o las condiciones climáticas (Baştuğ et al., 2024). El uso de valores de Kc sin ajuste local o el uso de valores de Kc estáticos puede propiciar errores en el cálculo de las necesidades hídricas diarias; por ello recomendando diversos autores el uso de valores de Kc específicos para cada cultivo y fase de desarrollo utilizando datos de campo reales como los que proporcionan los lisímetros (Bayisa et al., 2024).

Es de suma importancia considerar las características de los cultivos muy sensibles como es el caso del pepino (*Cucumis sativus* L.), cultivo hortícola de ciclo corto y cuyo comportamiento es muy sensible a la disponibilidad hídrica, mucho más en las fases de floración y de desarrollo del fruto (Nikolaou et al., 2023; Yan et al., 2023).

Este es considerado un cultivo cuya producción tiene un índice de requerimiento hídrico del cultivo en función de la fase fenológica y de los factores climáticos como son la radiación solar, la temperatura y la humedad, siendo por lo tanto obligada la estimación de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) para poder realizar un manejo adecuado del riego (Baştuğ et al., 2024). La evapotranspiración entendida como la suma de la evaporación del suelo y la transpiración del vegetal sería la base del requerimiento hídricos reales del cultivo (Taheri et al., 2025; Usta, 2024).

CAPÍTULO I
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Problema de investigación

1.1.1. Planteamiento del problema

La estimación precisa de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) es un componente esencial para el manejo eficiente del riego en sistemas hortícolas, especialmente en cultivos sensibles como el pepino (*Cucumis sativus* L.) (Cortés & Evangelina, 1999).

En el contexto de los trópicos, las prácticas de riego son normalmente realizadas mediante métodos indirectos de estimación de la evapotranspiración del tipo de Penman–Monteith, Hargreaves y Priestley–Taylor, aunque estos modelos hayan sido desarrollados en situaciones climáticas diferente, de tal forma que su fiabilidad puede llegar a ser muy diferente si son aplicados sin previa calibración local; esto provoca una incertidumbre en la determinación real de las necesidades hídricas del cultivo que en consecuencia puede derivar en riegos deficientes o excesivos (Cerezo Alcívar, 2024).

Aunque el cultivo del pepino se muestra con gran relevancia, existen muy pocos estudios que consideren los métodos indirectos de cálculo de la evapotranspiración, que establezcan cuán precisos son comparados con las mediciones directas que se obtienen en un lisímetro de drenaje (Petruzzellis et al., 2022). La ausencia de una validación local supone la existencia de un problema técnico que dificultará implementar un programa de riego basado en datos y limita la eficiencia del uso del agua en la agricultura (Aguirre Cobeña, 2023).

Diagnóstico

En la zona agrícola de Mocache, se ha identificado que los agricultores han utilizado métodos indirectos para calcular la evapotranspiración sin someterlo antes de su uso a la comprobación de su validez en condiciones reales. La misma carencia de una serie de valores de referencia generados a partir de mediciones directas con lisímetros también esconde inconsistencias en la estimación de la ET_c. Entre los síntomas a detectar, encontramos: variabilidades en los rendimientos, ineficacia en el aprovechamiento del agua y dificultades para realizar planes de riego. La causa de fondo se encuentra en la

condición de no estar calibrados los métodos indirectos; a esto hay que añadir la total inexistencia de coeficientes de cultivo adaptados a las características climáticas que definen a la zona agrícola de Mocache.

Pronóstico

En el caso de no aplicar medidas correctivas a partir de la validación local de los métodos de estimación, la inexactitud del cálculo de la evapotranspiración podrá aumentar, afectando la programación del riego en el cultivo de pepino, lo que, repercutiría en un aumento de la pérdida del recurso hídrico; el descenso de la productividad y en el aumento de los costos de producción de los agricultores. Debemos considerar que la carencia de datos locales validados hará que no se desarrolle ni se implemente más tecnología de riego eficientes, esto mantendrá la dependencia de modelos teóricos que no han sido ajustados a las condiciones agroclimáticas de Mocache, lo que disminuirá la sostenibilidad del sistema productivo en el mediano y largo plazo.

1.1.2. Formulación del problema

¿Con qué precisión estiman la evapotranspiración los métodos indirectos (Penman–Monteith, Hargreaves, Priestley–Taylor y tanque Clase A) en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus L*) al ser comparados con las mediciones directas obtenidas mediante lisímetros de drenaje bajo las condiciones agroclimáticas de Mocache?

1.1.3. Sistematización del problema

¿Cuál es la evapotranspiración real del cultivo de pepino medida mediante lisímetros de drenaje?

¿Qué variaciones presentan los métodos indirectos en la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) en comparación con la ET_c medida en campo?

¿Qué método indirecto presenta la menor desviación respecto a los valores obtenidos con lisímetros?

¿Cuál es el coeficiente de cultivo (K_c) del pepino en cada una de sus etapas fenológicas bajo las condiciones de Mocache?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar los métodos indirectos de estimación de evapotranspiración en el cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) comparados con el método de lisímetro de drenajes.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar la evapotranspiración del cultivo de pepino mediante el método del lisímetro de drenaje.
- Analizar la precisión de cuatro métodos indirectos de estimación de la evapotranspiración de referencia (E_{To}), comparándolos con los valores de evapotranspiración del cultivo (E_{Tc}) obtenidos mediante lisímetros de drenaje.
- Establecer el coeficiente de cultivo (K_c) del pepino a lo largo de su desarrollo fenológico.

1.3. Justificación

Cuidar el agua no es solo una opción, es una urgencia para que el cultivo de pepino sea rentable hoy. Esta investigación es clave porque, al conocer cuánta agua transpira la planta, podemos aportarle exactamente la que necesita. Así evitamos el desperdicio innecesario y logramos que cada gota se traduzca en una cosecha mucho más sana y fuerte.

Los lisímetros son muy precisos, pero su alto costo y difícil manejo los alejan de la realidad del campo. Por eso, es necesario validar métodos más simples y económicos que cualquier agricultor pueda usar en su día a día. Queremos traducir la complejidad científica en una herramienta práctica que realmente facilite la vida al productor.

El aporte final será calcular el coeficiente de cultivo (K_c) mediante estos métodos indirectos para identificar cuál se aproxima más al de la FAO. Esto permitirá verificar si los estándares internacionales encajan con nuestro clima local o si requieren un ajuste específico. Así, el productor tendrá una referencia real y confiable para cumplir con los objetivos de esta investigación.

CAPÍTULO II
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Marco conceptual

2.1.1. Evapotranspiración

La evapotranspiración es considerada como la combinación simultánea de evaporación del suelo y transpiración de las plantas, constituyendo el principal componente de la demanda hídrica en los sistemas agrícolas (Villafañe et al., 2016). Este proceso integra tanto factores climáticos como fisiológicos, lo que dificulta la separación práctica de ambos componentes en condiciones de campo. Según Caycho Bustamante, (2023) para su estimación, el método de Penman–Monteith será el estándar internacionalmente recomendado debido a su base física sólida y su consistencia cuando se dispondrá de datos meteorológicos completos.

2.1.2. Transpiración

La transpiración es el proceso fisiológico mediante el cual las plantas perderán vapor de agua a través de las estomas ubicadas principalmente en las hojas, contribuyendo al equilibrio térmico y al transporte interno de nutrientes (Wu, 2024). Este proceso es regulado por la apertura estomática, la cual responderá a estímulos ambientales como la radiación solar, la disponibilidad hídrica en el suelo y el déficit de presión de vapor atmosférico (Ayma Romay, 2015). En el cultivo de pepino, la transpiración aumenta progresivamente conforme se incrementa el área foliar durante la fase de desarrollo vegetativo, elevando así la demanda hídrica del cultivo (Salinas, 2023).

2.1.3. Evaporación

La evaporación es definida como el proceso físico mediante el cual el agua pasará del estado líquido al estado gaseoso desde la superficie del suelo o cuerpos de agua, fenómeno que es directamente influenciado por la energía disponible en forma de radiación solar, este proceso depende principalmente de factores climáticos como la temperatura del aire, la velocidad del viento y la humedad relativa, los cuales determina la capacidad de la atmósfera para aceptar vapor de agua (Chavez Delgado, 2022). En suelos agrícolas cultivados con pepino, la fracción de radiación que incide directamente sobre el suelo condiciona significativamente la magnitud de la evaporación, especialmente durante las primeras etapas fenológicas cuando la cobertura vegetal es limitada (Olin Valdes, 2022; Salinas, 2023)

2.1.4. Evapotranspiración del cultivo (ETc)

La evapotranspiración del cultivo (ETc) representa la cantidad total de agua que el cultivo de pepino transfiere a la atmósfera bajo condiciones específicas de manejo y clima, integrando la evaporación del suelo y la transpiración de la planta (Saiz Rodríguez et al., 2017). Este valor cambia según la etapa fenológica, la densidad de siembra, el sistema de riego y las condiciones ambientales predominantes. (Chavarría-Vidal et al., 2023) dice que el conocimiento preciso de la ETc permite ajustar la programación del riego con el fin de evitar tanto el estrés hídrico como el uso excesivo del recurso agua.

2.1.5. Evapotranspiración de referencia (ETo)

La evapotranspiración de referencia (ETo) es definida como la pérdida combinada de agua por evaporación y transpiración desde una superficie de pasto bien regado y en condiciones óptimas de crecimiento, utilizada como estándar comparativo (Núñez González et al., 2020). Su estimación considerará variables meteorológicas como radiación solar, temperatura máxima y mínima, humedad relativa, velocidad del viento y presión atmosférica (Chavez Delgado, 2022). La ETo forma la base para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo mediante la aplicación de un coeficiente de cultivo que ajustará las diferencias fisiológicas entre especies.

2.1.6. Coeficiente del cultivo (Kc)

El coeficiente de cultivo (Kc) es un valor que relaciona la ETc con la ETo y varía según la fase de desarrollo del cultivo (Carcasi, 2022). En el pepino la etapa inicial suele estar entre 0,4 a 0,6, en la etapa de máximo desarrollo vegetativo alcanza 1,0 a 1,2, y en la etapa final desciende nuevamente (Olin Valdes, 2022). Una correcta determinación del Kc, validada con mediciones en campo, garantiza un uso eficiente del agua y una producción sostenible (Abd El-Fattah & Ibrahim, 2023).

Formula:

$$Kc = \frac{ETc}{ETo}$$

Donde

ETc: evapotranspiración del cultivo (mm d-1)

ETo: evapotranspiración de referencia (mm d-1)

Tabla 1

Valores del coeficiente del cultivo según la FAO56

Cultivo	Kc ini ⁻¹	Kc medio	Kc final
Pepino	0.5	1.4	0.7

FUENTE: FAO

ELABORADO: Autor

2.1.7. Evapotranspiración en pepino y cultivos hortícolas

Estudios empíricos recientes han estimado Kc y ETc de pepino tanto en invernadero como en condiciones de campo, tienen variaciones dependientes de microclima, manejo y etapa del cultivo; esos trabajos recomiendan obtener Kc locales para una gestión hídrica óptima (Salinas, 2023). Comparaciones entre múltiples modelos para cultivos de pepino indican que, aunque Penman–Monteith tiende a ofrecer la mejor consistencia cuando se dispone de datos completos, modelos simplificados o técnicas estadísticas pueden acercarse a su precisión si se entrenan o calibran con datos locales (Baştuğ et al., 2024).

2.2. Marco referencial

2.2.1. Cultivo de pepino

El pepino (*Cucumis sativas* L.) posee un sistema radicular relativamente superficial, lo que incrementa su dependencia de la humedad en las capas superiores del suelo (Fuentes Paz, 2015). Este rasgo lo hace particularmente sensible a fluctuaciones en la disponibilidad hídrica durante su ciclo de desarrollo (Ikhlas et al., 2023).

Por otra parte, investigaciones actuales han indicado hasta qué punto el manejo agronómico como la frecuencia de riego, la poda y el manejo del suelo repercuten en la eficiencia del uso del agua en el pepino, lo que pone en evidencia la importancia de la adaptación de técnicas de riego a condición local (Baştuğ et al., 2024).

2.2.2. Taxonomía

Según diversos estudios botánicos, la clasificación taxonómica del cultivo de pepino se establece dentro del reino vegetal y de las angiospermas por tratarse de una especie que producirá flores y frutos verdaderos (Olin Valdes, 2022). El pepino pertenecerá a la familia Cucurbitaceae, caracterizada por especies rastreras o trepadoras con frutos carnosos tipo pepónide (Enrique Cruz, 2023). La especie cultivada será *Cucumis sativus* L., ampliamente distribuida en sistemas agrícolas tropicales.

Tabla 2

Clasificación taxonómica del cultivo de pepino

Reino:	Plantae
División:	Magnoliophyta
Clase:	Magnoliopsida
Orden:	Cucurbitales
Familia:	Cucurbitaceae
Género:	<i>Cucumis</i>
Especie:	<i>Cucumis sativus</i> L.

FUENTE: FAO

ELABORADO: Autor

2.2.3. Sistema Radicular

El sistema radicular del pepino está constituido por una raíz principal pivotante poco profunda que se desarrolla rápidamente durante las primeras etapas del crecimiento, a partir de esta raíz principal emergen numerosas raíces secundarias y terciarias, responsables de la absorción de agua y nutrientes, concentrándose principalmente en los primeros 30 a 40 cm del suelo (Aguirre Cobeña & Lourdes, 2023) . La sensibilidad del sistema radicular al encharcamiento hará necesario el establecimiento del cultivo en suelos bien drenados para evitar problemas de asfixia radicular (Otero & Goñi, 2021).

2.2.4. Tallo

El tallo del pepino es herbáceo, flexible y de crecimiento rastrero o trepador, dependiendo del sistema de conducción implementado en el cultivo (Olin Valdes, 2022). Presenta entrenudos alargados y zarcillos axilares que permitirán su sujeción a tutores o estructuras verticales en sistemas intensivos (Marcano et al., 2012). Durante la fase reproductiva, el tallo continua alargándose mientras mantiene hojas, flores y frutos en distintos estados de desarrollo (Lopez Atinacio, 2018).

2.2.5. Hoja y flor

Las hojas del pepino son simples, alternas y de forma palmada o lobulada, con pecíolos largos que facilita su exposición a la radiación solar, presentarán una superficie ligeramente pubescente debido a la presencia de tricomas, característica típica de la familia Cucurbitaceae (Grumet et al., 2022). El desarrollo progresivo del área foliar incrementará la capacidad fotosintética del cultivo y, en consecuencia, su demanda hídrica (Chacón Padilla & Monge Pérez, 2020).

Las flores del pepino son unisexuales y monoicas en la mayoría de las variedades tradicionales, presentando flores masculinas y femeninas en la misma planta (Zhang et al., 2025). Las flores tienen un color amarillo brillante que presentan cinco segmentos o pétalos en la base, características del grupo para las cucurbitáceas. (Marcano et al., 2012).

2.2.6. Semilla

Las semillas del pepino tienen forma ovalada y aplanada, de color blanco crema a amarillento claro, con una longitud aproximada de 8 a 12 mm, con una cubierta protectora que les otorga viabilidad durante el almacenamiento bajo condiciones adecuadas de humedad y temperatura (Pentos et al., 2022).

2.2.7. Ciclo Vegetativo

El ciclo vegetativo del pepino varía entre 60 y 90 días según la variedad y las condiciones ambientales predominante, durante las primeras semanas se desarrollará la fase vegetativa,

caracterizada por la expansión foliar y el crecimiento del tallo principal (Chacón Padilla & Monge Pérez, 2020).

2.2.8. Requerimientos agroclimáticos

El cultivo de pepino requiere condiciones agroclimáticas cálidas y buena disponibilidad de radiación solar para alcanzar un crecimiento óptimo (Agroinformación, 2025). Se usan suelos francos o franco-arenosos, con buen drenaje y alto contenido de materia orgánica su adecuada ventilación y humedad relativa moderada favorecerán la sanidad del cultivo y reducirán la incidencia de enfermedades fúngicas (Burbano Orjuela, 2017).

2.2.8.1. Temperatura.

El pepino prospera mejor en temperaturas comprendidas entre 18 °C y 28 °C, rango que favorecerá tanto el crecimiento vegetativo como la floración (Ibarbo Espinoza & Ibarbo Espinoza, 2024). Temperaturas inferiores a 12 °C ralentizan el desarrollo del cultivo y provocan daños fisiológicos mientras que temperaturas superiores a 35 °C incrementan la transpiración y afectan la viabilidad del polen y el cuajado de frutos (Salazar Dominguez, 2024).

2.2.8.2. Precipitación.

El pepino requiere un suministro hídrico constante y uniforme, evitando tanto el déficit como el exceso de agua en el suelo se estima una necesidad hídrica total entre 400 y 600 mm durante todo el ciclo del cultivo, dependiendo de las condiciones climáticas y del sistema de riego implementado (Olin Valdes, 2022).

2.2.8.3. Luminosidad.

La luminosidad es un factor determinante en la productividad del pepino, ya que influye directamente en la tasa fotosintética se recomienda una exposición diaria de 10 a 12 horas de luz para un desarrollo óptimo del cultivo (Barrera Alarcon, 2020). Una radiación excesiva sin manejo adecuado podrá generar estrés térmico y afectar la calidad del fruto (Olin Valdes, 2022).

2.2.9. Requerimiento hídrico del pepino

El requerimiento hídrico del pepino está determinado por su elevada tasa de transpiración y rápido crecimiento vegetativo, se estima que la demanda total de agua durante el ciclo oscilará entre 400 y 700 mm, dependiendo del clima y del manejo agronómico (Aguirre Cobeña, 2023). Una programación de riego basada en la evapotranspiración del cultivo permite optimizar el recurso hídrico y mantener la productividad (Gamboa Barrio, 2024).

2.2.10. Métodos de estimación de evapotranspiración

2.2.10.1. Métodos Directos

Los métodos directos están orientados al cálculo físico-químico de las entradas y salidas de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera. Dentro de los métodos directos, el lisímetro de drenaje es uno de los más precisos, ya que calcula la evapotranspiración mediante la diferencia entre la cantidad de agua aplicada menos la cantidad de agua drenada (Salazar Badillo, 2020). El lisímetro de drenaje simula las condiciones del cultivo, produce resultados sobre el consumo de agua de manera fiable y se convierte en la técnica de referencia para ser comparada con el resto de los métodos de estimación (Shahrajabian & Sun, 2024).

2.2.10.1.1. Lisímetro de drenaje.

Sistema que permite medir la evapotranspiración real del cultivo en condiciones reales de campo. Se basa en un recipiente que contiene un suelo de las plantas representativas del cultivo diseñado para recoger y calcular el agua que produce de la percolación del agua a través del perfil edáfico (Calderón Naula, 2025).

La evapotranspiración se obtiene mediante la diferencia del agua que se aplica y el volumen que se drena. Por lo tanto, este procedimiento facilita evidencias empíricas de gran fiabilidad y también muy convenientes para la aceptación o no de los modelos de estimación (Balugani et al., 2023).

El diseño y operación de lisímetros deben ser cuidadosos, ya que factores como el drenaje libre, la homogeneidad del sustrato y el control de bordes pueden afectar la exactitud de las

mediciones, se consideran el método más adecuado para establecer coeficientes de cultivo reales y para evaluar la eficiencia de estrategias de riego (Salazar Badillo, 2020).

Formula:

$$ETc = Da - Dd \pm \Delta\theta$$

Donde:

ETc = evapotranspiración del cultivo (mm d-1)

Da = cantidad de agua aplicada (mm)

Dd = cantidad de agua drenada (mm)

$\Delta\theta$ = Diferencia de humedad del suelo a una profundidad media de la zona radicular efectiva del cultivo (positivo si se pierde agua del suelo, negativo si se gana)

2.2.11. Métodos Indirectos

Dado que los métodos directos suelen resultar costosos o difíciles de aplicar en áreas agrícolas extensas, se emplean métodos indirectos fundamentados en variables meteorológicas de fácil acceso. Estos se apoyan en ecuaciones empíricas o modelos matemáticos que permiten calcular la ETo a partir de datos como la temperatura, la radiación solar, la velocidad del viento y la humedad relativa. La exactitud de estas estimaciones depende del clima de la zona, la calidad de la información registrada y las características del cultivo analizado (Sánchez Martínez & Carvacho Bart, 2011).

2.2.11.1. Método De Penman-Monteith.

Considerado el método estándar por la FAO determina ETo incorporando múltiples variables meteorológicas temperatura promedio, máxima y mínima, humedad relativa, horas de luz solar, viento, altitud, latitud, radiación solar, etc, para el cultivo de referencia (pasto) de una altura de 0,12 m, bien regado y con una cobertura total de la superficie del suelo, la resistencia superficial estimada es de 70 s m⁻¹ y la radiación solar reflejada o albedo de 0,23 (Allan et al., 2020).

Formula:

$$ETo = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Donde:

ET_o: evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)
 R_n: radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹)
 R_a: 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)

2.2.11.2. Método Hargreaves.

La fórmula de Hargreaves método simplificado basado en la diferencia entre temperaturas máximas y mínimas. Útil en zonas con limitaciones de datos meteorológicos, aunque tiende a sobreestimar o subestimar en climas húmedos o áridos (Almorox & Grieser, 2015). Usa datos de temperatura y radiación solar, lo que la convierte en una opción sencilla.

Formula:

$$ET_o = 0,0135 \times KT \times Ra \times (T + 17,8) \times (T_{max} - T_{min})^{0.5}$$

Donde:

R_a: es la radiación solar entrante de onda corta (mm d⁻¹);

KT = coeficiente

T = Radiación solar extraterrestre, en mm/día (tabulada)

T_{max}: la temperatura máxima (°C);

T_{min}: la temperatura mínima (°C); KT, 0,162 por regiones internas y 0,19 para regiones costeras.

Para estimar la Radiación Solar Extraterrestre (R_a), existen diversas tablas en función de la latitud y el mes del año. La tabla original presenta los valores de R_a en MJ/m²/día, sin embargo, aquí se ofrece una conversión a mm/día (equivalente de agua evaporada).

Tabla 3

Radiación solar extraterrestre en mm/día.

HEMISFERIO NORTE												
Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
70	0	1,1	4,2	9,4	14,4	17,3	16,1	11,4	6,1	2	0	0
68	0	1,5	4,8	9,8	14,4	17,1	15,9	11,7	6,6	2,4	0,3	0
66	0,2	2	5,3	10,1	14,5	16,9	15,8	12	7,1	2,9	0,6	0
64	0,6	2,4	5,8	10,5	14,7	16,8	15,8	12,2	7,5	3,5	1	0,2
62	0,9	2,9	6,3	10,9	14,8	16,8	15,9	12,5	8	4	1,4	0,5
60	1,3	3,4	6,8	11,2	14,9	16,8	16	12,8	8,4	4,4	1,8	0,9
58	1,8	3,9	7,2	11,6	15,1	16,9	16,1	13,1	8,9	4,9	2,2	1,3
56	2,2	4,4	7,7	11,9	15,3	16,9	16,2	13,3	9,3	5,4	2,7	1,7
54	2,7	4,9	8,2	12,2	15,4	16,9	16,2	13,6	9,7	5,9	3,2	2,1
52	3,1	5,4	8,6	12,6	15,6	17	16,4	13,8	10,1	6,4	3,7	2,6
50	3,6	5,9	9,1	12,9	15,7	17	16,4	14	10,5	6,9	4,2	3,1
48	4,1	6,4	9,5	13,3	15,8	17,1	16,5	14,2	10,9	7,4	4,7	3,6
46	4,6	6,9	9,9	13,4	16	17,1	16,6	14,4	11,2	7,8	5,1	4
44	5,1	7,3	10,3	13,7	16	17,1	16,6	14,7	11,6	8,3	5,7	4,5
42	5,6	7,8	10,7	13,9	16,1	17,1	16,7	14,8	11,9	8,7	6,2	5,1
40	6,1	8,3	11,1	14,2	16,2	17,1	16,7	15	12,2	9,2	6,7	5,6
38	6,6	8,8	11,5	14,4	16,3	17,1	16,7	15,1	12,5	9,6	7,1	6
36	7,1	9,2	11,8	14,6	16,3	17	16,7	15,3	12,9	10	7,6	6,6
34	7,6	9,7	12,2	14,7	16,3	17	16,7	15,3	13,1	10,4	8,1	7,1
32	8,1	10,1	12,5	14,9	16,3	16,9	16,6	15,5	13,4	10,9	8,6	7,6
30	8,6	10,5	12,8	15	16,3	16,8	16,6	15,5	13,6	11,3	9,1	8,1
28	9,1	10,9	13,1	15,1	16,3	16,7	16,5	15,6	13,8	11,6	9,5	8,6
26	9,6	11,3	13,4	15,3	16,3	16,6	16,4	15,6	14,1	12	9,9	9,1
24	10	11,8	13,7	15,3	16,2	16,4	16,3	15,6	14,2	12,3	10,4	9,5
22	10,5	12,1	13,9	15,4	16,1	16,3	16,2	15,7	14,4	12,7	10,9	10
20	10,9	12,5	14,2	15,5	16	16,1	16	15,6	14,6	13	11,3	10,4
18	11,4	12,9	14,4	15,5	15,9	16	15,9	15,6	14,7	13,3	11,7	10,9

16	11,8	13,2	14,6	15,6	15,8	15,8	15,7	15,6	14,9	13,6	12,1	11,4
14	12,2	13,5	14,7	15,6	15,7	15,6	15,6	15,5	15	13,8	12,5	11,8
12	12,6	13,8	14,9	15,6	15,5	15,5	15,3	15,4	15,1	14,1	12,9	12,2
10	13	14,1	15,1	15,5	15,3	15,1	15,1	15,3	15,1	14,3	13,2	12,7
8	13,4	14,4	15,2	15,4	15,1	14,8	14,9	15,2	14,5	13,6	13,1	12,7
6	13,8	14,6	15,3	15,3	14,9	14,6	14,7	15,1	14,7	13,9	13,4	13,1
4	14,1	14,9	15,3	15,3	14,7	14,4	14,4	14,9	15,2	14,9	14,2	13,8
2	14,4	15,1	15,4	15,1	14,4	14	14,1	14,7	15,2	15,1	14,5	14,2
0	14,8	15,3	15,5	15	14,2	13,6	13,8	14,6	15,2	15,3	14,8	14,5

HEMISFERIO SUR

Latitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
70	16,1	11,4	6,1	2	0	0	0	1,1	4,2	9,4	14,4	17,3
68	15,9	11,7	6,6	2,4	0,3	0	0	1,5	4,8	9,8	14,4	17,1
66	15,8	12	7,1	2,9	0,6	0	0,2	2	5,3	10,1	14,5	16,9
64	15,8	12,2	7,5	3,5	1	0,2	0,6	2,4	5,8	10,5	14,7	16,8
62	15,9	12,5	8	4	1,4	0,5	0,9	2,9	6,3	10,9	14,8	16,8
60	16	12,8	8,4	4,4	1,8	0,9	1,3	3,4	6,8	11,2	14,9	16,8
58	16,1	13,1	8,9	4,9	2,2	1,3	1,8	3,9	7,2	11,6	15,1	16,9
56	16,2	13,3	9,3	5,4	2,7	1,7	2,2	4,4	7,7	11,9	15,3	16,9
54	16,2	13,6	9,7	5,9	3,2	2,1	2,7	4,9	8,2	12,2	15,4	16,9
52	16,4	13,8	10,1	6,4	3,7	2,6	3,1	5,4	8,6	12,6	15,6	17
50	16,4	14	10,5	6,9	4,2	3,1	3,6	5,9	9,1	12,9	15,7	17
48	16,5	14,2	10,9	7,4	4,7	3,6	4,1	6,4	9,5	13,3	15,8	17,1
46	16,6	14,4	11,2	7,8	5,1	4	4,6	6,9	9,9	13,4	16	17,1
44	16,6	14,7	11,6	8,3	5,7	4,5	5,1	7,3	10,3	13,7	16	17,1
42	16,7	14,8	11,9	8,7	6,2	5,1	5,6	7,8	10,7	13,9	16,1	17,1
40	16,7	15	12,2	9,2	6,7	5,6	6,1	8,3	11,1	14,2	16,2	17,1
38	16,7	15,1	12,5	9,6	7,1	6	6,6	8,8	11,5	14,4	16,3	17,1
36	16,7	15,3	12,9	10	7,6	6,6	7,1	9,2	11,8	14,6	16,3	17

34	16,7	15,3	13,1	10,4	8,1	7,1	7,6	9,7	12,2	14,7	16,3	17
32	16,6	15,5	13,4	10,9	8,6	7,6	8,1	10,1	12,5	14,9	16,3	16,9
30	16,6	15,5	13,6	11,3	9,1	8,1	8,6	10,5	12,8	15	16,3	16,8
28	16,5	15,6	13,8	11,6	9,5	8,6	9,1	10,9	13,1	15,1	16,3	16,7
26	16,4	15,6	14,1	12	9,9	9,1	9,6	11,3	13,4	15,3	16,3	16,6
24	16,3	15,6	14,2	12,3	10,4	9,5	10	11,8	13,7	15,3	16,2	16,4
22	16,2	15,7	14,4	12,7	10,9	10	10,5	12,1	13,9	15,4	16,1	16,3
20	16	15,6	14,6	13	11,3	10,4	10,9	12,5	14,2	15,5	16	16,1
18	15,9	15,6	14,7	13,3	11,7	10,9	11,4	12,9	14,4	15,5	15,9	16
16	15,7	15,6	14,9	13,6	12,1	11,4	11,8	13,2	14,6	15,6	15,8	15,8
14	15,6	15,5	15	13,8	12,5	11,8	12,2	13,5	14,7	15,6	15,7	15,6
12	15,3	15,4	15,1	14,1	12,9	12,2	12,6	13,8	14,9	15,6	15,5	15,5
10	15,1	15,3	15,1	14,3	13,2	12,7	13	14,1	15,1	15,5	15,3	15,1
8	14,9	15,2	14,5	13,6	13,1	12,7	13,4	14,4	15,2	15,4	15,1	14,8
6	14,7	15,1	14,7	13,9	13,4	13,1	13,8	14,6	15,3	15,3	14,9	14,6
4	14,4	14,9	15,2	14,9	14,2	13,8	14,1	14,9	15,3	15,3	14,7	14,4
2	14,1	14,7	15,2	15,1	14,5	14,2	14,4	15,1	15,4	15,1	14,4	14
0	13,8	14,6	15,2	15,3	14,8	14,5	14,8	15,3	15,5	15	14,2	13,6

FUENTE: (ALLEN, 2000).

ELABORADO: ALLEN

2.2.11.3. Método De Priestley And Taylor.

Variante simplificada del método de Penman-Monteith, donde el componente aerodinámico se sustituye por un coeficiente empírico. Su uso es recomendado en suelos húmedos o condiciones sin déficit hídrico (Su et al., 2023).

Formula:

$$ET_o = 1,26 \times \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \times (Rn - G)$$

Donde:

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

γ : constante psicrométrica (kPa °C-1)

Rn: radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m-2 día-1)

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

2.2.11.4. Método De Tanque Evaporímetro Clase A.

Mide la evaporación directa desde una superficie de agua expuesta. La ETo se estima multiplicando la evaporación medida por un coeficiente (Kp). Su simplicidad lo hace ideal en condiciones de campo con recursos limitados (Ansorge & Beran, 2019).

Formula:

$$ET_o = K_p E_{pan}$$

Donde

ETo: evapotranspiración de referencia [mm día-1]

Kp: coeficiente del tanque evaporímetro [-]

Epan: evaporación del tanque evaporímetro [mm día-1]

Tabla 4

Coeficientes del Tanque evaporímetro (Kp) para el tanque Clase A

Viento (m s ⁻¹)	Distancia del cultivo a barlovento (m)	Húmeda relativa media (%)		
		Baja	Media	Alta
		(<40)	(40-70)	(>70)

	1	0.55	0.65	0.75
Baja	10	0.65	0.75	0.85
(< 2)	100	0.70	0.80	0.85
	1000	0.75	0.85	0.85
	1	0.50	0.60	0.65
Moderado	10	0.60	0.70	0.75
(2 – 5)	100	0.65	0.75	0.80
	1000	0.70	0.80	0.80
	1	0.45	0.50	0.60
Alta	10	0.55	0.60	0.65
(5 – 8)	100	0.60	0.65	0.70
	1000	0.65	0.70	0.75
	1	0.40	0.45	0.50
Muy alta	10	0.45	0.55	0.60
(>8)	100	0.50	0.60	0.65
	1000	0.55	0.60	0.65

FUENTE: (ALLEN, 2000).

ELABORADO: ALLEN

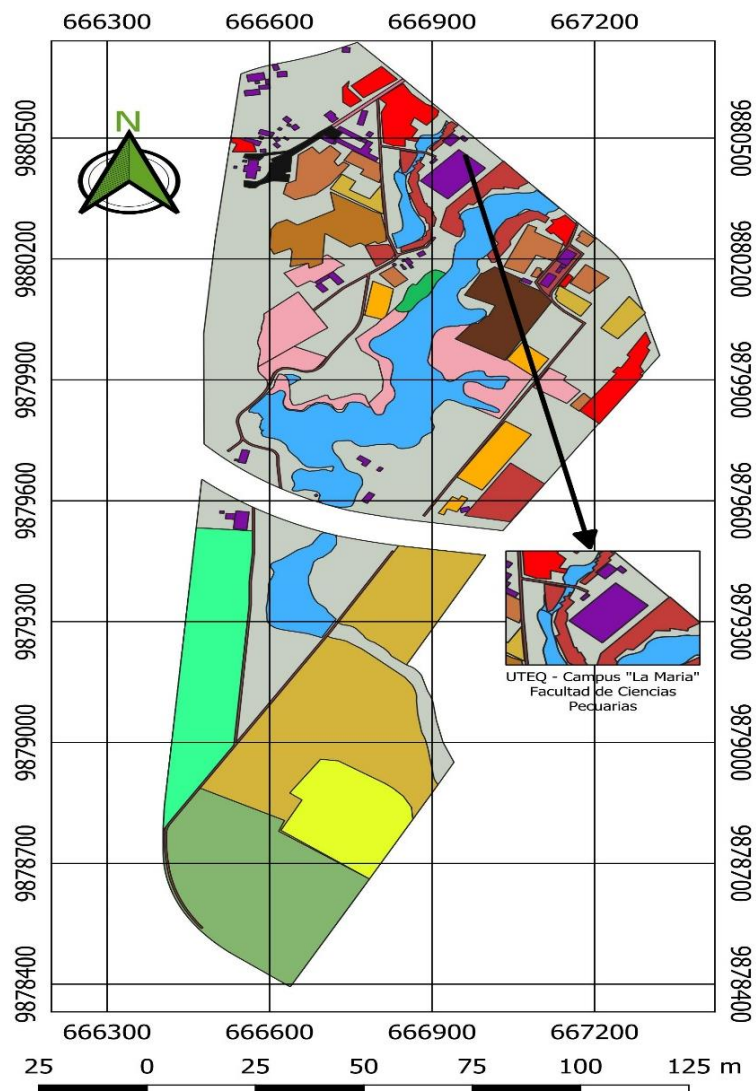
CAPÍTULO III
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Localización

La investigación se desarrolló en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), dentro del campus experimental “La María”, situado en el cantón Mocache, provincia de Los Ríos, Ecuador. El área de estudio se localiza a una altitud cercana a los 74 m s. n. m., con una temperatura media anual de aproximadamente 26 °C, una humedad relativa promedio del 85 % y una precipitación anual en torno a los 2.000 mm, de acuerdo con los registros proporcionados por la estación meteorológica de la UTEQ. Las coordenadas geográficas corresponden a la zona UTM 17S, con valores de Este: 705 842 m y Norte: 9 841 515 m, bajo el datum WGS84.

Figura 1

Mapa de localización



3.2. Tipo de Investigación

La investigación se orienta a la construcción y validación de modelos matemáticos que permiten describir y pronosticar el comportamiento hídrico del cultivo de pepino, tomando como referencia mediciones directas obtenidas mediante lisímetros de drenaje. En este contexto, los modelos indirectos de estimación de la ETo (Penman–Monteith, Hargreaves, Priestley–Taylor y Tanque Clase A) son evaluados en función de su grado de ajuste, precisión y confiabilidad frente a un método directo, considerado de mayor exactitud.

En cuanto al diseño y el control del mismo, el estudio corresponde a una investigación de tipo no experimental u observacional ya que no se persigue la manipulación intencionada de las variables independientes ni tampoco se llevan a cabo tratamientos experimentales con asignaciones aleatorias y las variables del sistema suelo–planta–atmósfera son recogidas tal y como se dan en condiciones reales de campo.

El estudio se corresponde con un estudio longitudinal, en tanto que las mediciones de las variables hídricas y climáticas se realizan en repetidas ocasiones y de forma sistemática a lo largo de todo el ciclo fenológico del cultivo de pepino, las cuales permiten dar cuenta de la variabilidad en el tiempo, de los patrones de comportamiento y de la estabilidad de los procedimientos de estimación evaluados.

3.3. Método de investigación

Para el desarrollo de la investigación se aplicaron los siguientes métodos científicos, los cuales permitieron abordar el fenómeno de estudio desde diferentes niveles de análisis:

3.3.1. Método deductivo

Este método permitió verificar la validez de los métodos Penman–Monteith, Hargreaves, Priestley–Taylor y Tanque Clase A, con los resultados experimentales obtenidos mediante los lisímetros de drenaje bajo las condiciones específicas del área de estudio, evaluando su capacidad para representar el comportamiento real de la evapotranspiración del cultivo de pepino y determinando las posibles desviaciones respecto al método de referencia.

3.3.2. Método inductivo

Este método a partir de observaciones obtenidas en campo permitió generalizar conclusiones sobre la precisión y el desempeño de los métodos indirectos de estimación de la Eto mediante mediciones directas realizadas con lisímetros de drenaje y registros meteorológicos diarios provenientes de la estación meteorológica.

Basándose en la evidencia empírica obtenida bajo condiciones locales, contribuyendo a la formulación de recomendaciones prácticas para el manejo del riego agrícola. A partir de estos datos particulares se identificaron patrones de comportamiento de la evapotranspiración del cultivo de pepino en sus distintas etapas fenológicas.

3.4. Fuentes de recopilación de información

Las fuentes de información empleadas en la investigación se dividirán en fuentes primarias, secundarias y terciarias.

3.4.1. fuentes primarias

Constituidas por los datos obtenidos directamente en campo, tales como la evapotranspiración medida mediante lisímetros de drenaje, los registros de evaporación del tanque Clase A y los datos meteorológicos diarios proporcionados por la estación climática cercana al área de estudio.

3.4.2. Fuentes secundarias

Conformadas por literatura científica especializada, incluyendo artículos, tesis universitarias, manuales técnicos y publicaciones de organismos reconocidos como la FAO.

3.4.3. Fuentes terciarias

Bases de datos académicas, repositorios digitales y documentos institucionales que servirán como apoyo para la interpretación y contextualización de los resultados obtenidos.

3.5. Diseño de la investigación

3.5.1. Tipo de estudio

El enfoque de la investigación fue cuantitativo, puesto que se orientó al análisis de variables medibles relacionadas con el comportamiento hídrico del cultivo de pepino. El tipo de estudio que adoptó, en tanto que no se manipuló intencionadamente la variable independiente, es el no experimental, observacional, en el que no se llevaron a cabo tratamientos diferenciados en el cultivo.

La investigación se limitó a la medida, el registro y el análisis de la evapotranspiración del cultivo de pepino en condiciones reales de campo, concretando así la descripción y análisis de su dinámica hídrica, hecho que le permitió llevarse a cabo sin alterar el sistema de producción. En esas condiciones, el método del lisímetro de drenaje fue utilizado como método directo, de referencia para la determinación de la evapotranspiración del cultivo, el cual fue confrontado al evaluar el desempeño de distintos métodos indirectos de estimación del mismo.

La manera en que se llevó a cabo el control agronómico aplicado fue igual entre las distintas unidades de estudio y fue la misma que se aplica en el cultivo de pepino en la zona, hecho que asegura que las conclusiones a las que llegó el estudio se exponen en condiciones agroclimáticas de la zona.

3.5.2. Unidad de estudio y población

El estudio se llevó a cabo en el área experimental de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, en las condiciones agroclimáticas de la zona mediante un sistema de lisímetros de drenaje a campo abierto para el cultivo de pepino.

La unidad de estudio o unidad experimental estuvo constituida por cada “bloque” de cultivo asociado a un lisímetro de drenaje, el cual integró el suelo, el cultivo, el riego aplicado y el volumen de agua drenada. Cada bloque estuvo conformado por tres filas de cultivo, con seis plantas por fila, establecidas a una distancia de 0,40 m entre plantas y 0,50 m entre filas, totalizando 18 plantas por bloque, con un lisímetro de drenaje instalado en la parte central.

Se definieron 8 unidades experimentales, que representaban 8 lisímetros de drenaje: 6 lisímetros contruidos para el cultivo de pepino, y los 2 lisímetros de drenaje, que se establecieron con pasto y que representaba el escenario de cobertura vegetal permanente y adicional que iba a garantizar el adecuado comportamiento hídrico del sistema suelo–planta–atmósfera.

Cada uno de los lisímetros se consideró como una unidad experimental independiente y fue identificado con un código con el que se le asignaba el seguimiento y control adecuado de la información recordada a lo largo del periodo de evaluación.

La unidad de análisis fue el registro diario de la evaporación y la transpiración obtenidos a partir del balance hídrico desarrollado en cada lisímetro, que se recogía con un intervalo de medida del tiempo de 24 horas. El procedimiento de recogida de estos registros se llevó a cabo de forma sistematizada y estandarizada, ya que por la mañana se realizaba la lectura del sensor de humedad del suelo y del volumen de drenado acumulado, posteriormente se determinaba el agua drenada y se añadía la cantidad de riego correspondiente al siguiente ciclo de medición.

La población del estudio estuvo conformada por el conjunto total de registros diarios de evapotranspiración generados durante todo el ciclo fenológico del cultivo de pepino, correspondientes a las seis unidades experimentales con cultivo, así como los 2 registros obtenidos de los lisímetros con pasto, utilizados como referencia complementaria.

3.5.3. Factores de estudio y tratamientos

El análisis desarrollado en esta investigación se centró en la observación y registro diario del comportamiento hídrico del cultivo de pepino bajo condiciones reales de campo. Para ello, se evaluaron variables directamente relacionadas con la evapotranspiración, tales como el volumen de agua aplicada mediante riego, el agua drenada, las condiciones meteorológicas predominantes y el estado fenológico del cultivo a lo largo de su ciclo productivo.

Debido a la naturaleza del estudio, no se aplicaron tratamientos agronómicos, con el objetivo de evitar interferencias externas y permitir que las variaciones observadas respondieran exclusivamente a la dinámica natural del sistema suelo–planta–atmósfera. Realizando una

comparación entre los lisímetros de drenaje y métodos de estimación indirecta de evapotranspiración.

3.5.4. Diseño no experimental

El diseño consideró ocho unidades experimentales, correspondientes a ocho lisímetros de drenaje instalados en el área de estudio. Seis de estos lisímetros estuvieron asociados al cultivo de pepino, mientras que dos se destinaron al establecimiento de pasto, utilizados como unidades de referencia para representar una cobertura vegetal permanente. Los lisímetros fueron instalados en el centro de los bloques de cultivo que se conformaron por medio de tres hileras de cultivo con seis plantas por hilera dándoles una distancia de siembra homogénea de 0,40 m entre plantas y de 0,50 m entre hileras

El diseño es de tipo longitudinal puesto que se realizaron las medidas de las variables hídricas de una forma sistemática a lo largo del ciclo fenológico de la planta cultivada y con frecuencia diaria, esta forma de repetición temporal nos permitió evaluar la variabilidad de la evapotranspiración a través del desarrollo del cultivo y a lo largo de las variaciones climáticas del medio.

El control de la variabilidad experimental se logró mediante la aplicación de un manejo agronómico homogéneo en todas las unidades experimentales, el uso de protocolos estandarizados para la toma de datos, horarios fijos de medición y una configuración operativa uniforme de los lisímetros. La comparación entre métodos indirectos de estimación de la evapotranspiración se realizó utilizando como referencia los valores obtenidos mediante el balance hídrico en lisímetros de drenaje, considerados como el método directo de mayor precisión.

El manejo de la variable experimental fue implementado también a través de un manejo agronómico homogéneo para todas las unidades experimentales, protocolos estandarizados en la recolección de datos, horarios fijos y una operación homogénea de los lisímetros. El método de comparación entre los métodos indirectos de estimación de la evapotranspiración fue el que compara los métodos indirectos que sirven de referencia para los valores de

evapotranspiración que se estimaron mediante el balance hídrico en los lisímetros de drenajes que hemos considerado como el de mayor grado de precisión.

3.5.5. Variables del estudio

Las variables consideradas en la investigación se definieron de acuerdo con los objetivos planteados y se organizaron según su función dentro del diseño metodológico, conforme a una estructura de matriz de variables.

3.5.5.1. Variables dependientes.

- Evapotranspiración del cultivo (ET_c): cantidad de agua perdida por el cultivo de pepino mediante los procesos combinados de evaporación y transpiración, determinada de forma directa a través del balance hídrico en los lisímetros de drenaje.
- Evapotranspiración de referencia (ET_o): estimación de la evapotranspiración de una superficie de referencia, calculada mediante métodos indirectos a partir de variables meteorológicas.
- Coeficiente de cultivo (K_c): relación adimensional entre la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y la evapotranspiración de referencia (ET_o), utilizada para caracterizar el comportamiento hídrico del cultivo en sus diferentes etapas fenológicas.

3.5.5.2. Variables independientes observadas.

- Volumen de agua aplicada por riego (D_a): cantidad de agua que se entrega al sistema en cada riego.
- Volumen de agua drenada (D_d): cantidad de agua percolada y recogida en cada uno de los lisímetros después de cada riego.
- Variación del contenido de humedad del suelo ($\Delta\theta$): cambio en la humedad del suelo registrado entre los momentos de medición.

- Precipitación efectiva: el aporte hídrico proveniente de lluvia.

3.5.5.3. Variables climáticas.

- Temperatura máxima, mínima y media del aire
- Radiación solar o radiación neta
- Humedad relativa del aire
- Velocidad del viento

Estas variables fueron utilizadas como insumo para el cálculo de la evapotranspiración de referencia mediante los métodos indirectos evaluados.

3.5.5.4. Variables de evaluación del desempeño de los métodos

- Error de estimación: diferencia entre los valores de evapotranspiración estimados por métodos indirectos y los valores medidos mediante lisímetros.
- Coeficiente de correlación (r): indicador del grado de asociación lineal entre los métodos comparados.
- Coeficiente de determinación (R^2): medida del grado de ajuste entre los valores estimados y los valores de referencia.
- Grado de concordancia: nivel de correspondencia entre los métodos indirectos y el lisímetro de drenaje como método directo.

3.6. Instrumentos de investigación

Los instrumentos de investigación incluyen equipos y herramientas utilizados para la medición precisa de las variables hídricas y climáticas. Entre los principales instrumentos se encuentran los lisímetros de drenaje, que permitirán medir directamente la evapotranspiración del cultivo, un sensor de humedad para saber el porcentaje de humedad

en los lisímetros y el tanque evaporímetro Clase A, empleado para estimar la evaporación ambiental.

Se utilizó la estación meteorológica de la UTEQ para registrar las variables climáticas; una balanza digital y probetas graduadas fueron utilizadas para medir el agua drenada y la aplicada, las hojas de registro fueron utilizadas para la organización y sistematización de la información que se va obteniendo a partir del experimento correspondiente.

3.6.1. Manejo del experimento

El sistema experimental fue implementado con el fin de obtener registros precisos y consistentes del balance hídrico del cultivo. Para ello, se acondicionó el terreno mediante la excavación de huecos de 50 cm × 50 cm, los cuales permitieron la correcta instalación de los lisímetros de drenaje y el desarrollo adecuado del sistema radicular.

Los lisímetros fueron elaborados a partir de recipientes de plástico de 20 L, a los cuales se les modificó con un sistema de salida inferior para el drenaje del agua percolada. En el interior de los recipientes se introdujo malla fina para evitar el paso de partículas del suelo; el perfil interior de los lisímetros fue elaborado a partir de capas sucesivas de grava, arena y suelo franco, siendo el superior libre, a modo de evitar los derrames del agua aplicada durante el riego.

Una vez instalados y en nivelación, cada uno de los lisímetros fueron registrados con una etiqueta individualmente, lo cual nos garantizó el poder controlar la información que se iba generando a partir del experimento. La siembra del cultivo de pepino fue uniforme en cada uno de los seis lisímetros y, para la siembra de pasto, fueron utilizados dos lisómetros para representar la cobertura vegetal.

El sistema agronómico mantuvo la uniformidad para todas las unidades, integrando el riego controlado, el control de las malezas y el seguimiento y control del desarrollo fenológico del cultivo. Para cada evento de riego se registraron el volumen de agua aplicada y drenada, lo que hizo posible estimar la evapotranspiración del cultivo mediante el balance hídrico.

El contenido de humedad del suelo se inspecciona diariamente mediante un sensor, a una profundidad representativa del sistema de raíces, en el que se realizaron las lecturas antes de comenzar el riego. La información se recopiló en un cuaderno de campo que posteriormente fue almacenado en un formato digital, garantizando de este modo la trazabilidad y el control de la calidad de los datos.

3.6.1.1. Preparación del suelo.

La preparación del suelo consistió en la limpieza de malezas, la aplicación de cal para su acondicionamiento y la excavación de hoyos de 50 cm × 50 cm en cada bloque. Estas labores aseguran el establecimiento óptimo del cultivo y la correcta instalación de los lisímetros.

3.6.1.2. Preparación de lisímetros

Los lisímetros se elaboraron utilizando baldes plásticos de 20 litros, adaptados con llaves de drenaje en la parte inferior para permitir la recolección del agua. En la base interna del balde se colocó una malla para evitar el arrastre de partículas finas del suelo durante el drenaje. El suelo utilizado en los lisímetros fue tomado del área de estudio y presenta una textura franco arcillosa para el cultivo de pepino. Previamente a su uso, el suelo será tamizado para eliminar residuos y lograr una estructura homogénea, la colocación de capa de suelo (21cm), grava (6cm) y arena (4cm) en la base del lisímetro, con el fin de asegurar un drenaje eficiente y evitar encharcamientos que puedan afectar el desarrollo radicular del cultivo.

Figura 2

Estructura del lisímetro

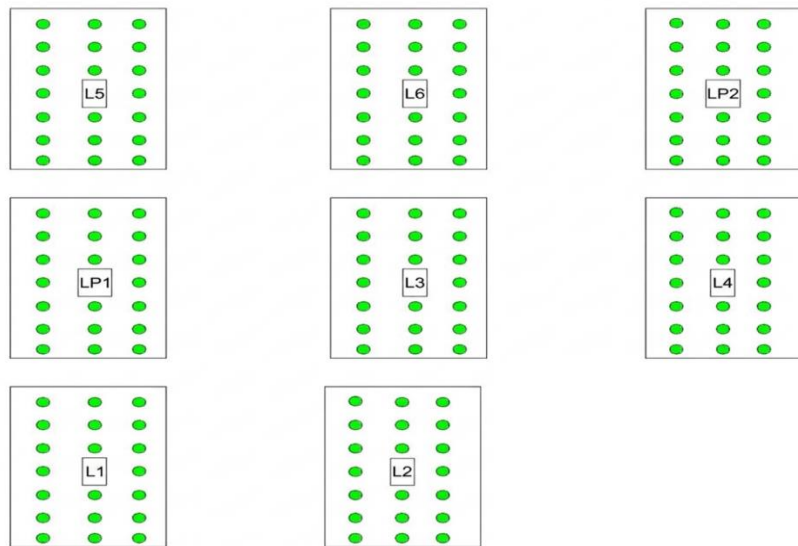


3.6.1.3. Distribución de lisímetros

Cada lisímetro con el cultivo fue identificado como (L1, L2, L3, L4, L5, L6) y los lisímetros con pasto con (LP1, LP2) para garantizar la calidad de los datos.

Figura 3

Identificación de lisímetros



3.6.1.4. Siembra y manejo del cultivo

La siembra del pepino se realizó de forma uniforme en cada lisímetro, respetando la densidad y el distanciamiento recomendados para el cultivo. Se seleccionaron semillas de buena calidad genética y sanitaria para asegurar una germinación homogénea.

En la etapa de crecimiento del cultivo se llevaron a cabo las prácticas agronómicas adecuadas, la fertilización y el control de plagas y enfermedades, con el objetivo de mantener las plantas con el estado adecuado para el crecimiento y que ningún factor externo interfiriera en la evapotranspiración.

3.6.1.5. Manejo del riego

Se aplicó el riego de forma manual para cada una de las unidades experimentales con ayuda de una probeta. Los volúmenes de agua aplicados fueron cuidadosamente calculados antes de cada riego, y el agua drenada fue recogida y medida posteriormente.

El volumen de riego aplicado al lisímetro depende de la evapotranspiración y de los aportes de agua por lluvia. A mayor temperatura, la evapotranspiración aumenta, lo que incrementa la demanda hídrica del cultivo; en consecuencia, se requiere aplicar un mayor volumen de agua para compensar la pérdida de humedad del suelo. Por el contrario, cuando existe precipitación, esta reduce la necesidad de riego, ya que contribuye al suministro de agua en el sistema, este se obtuvo con la siguiente formula:

$$(E_{to} \text{ (mm)} - \text{Lluvia (mm)} \times 2) \times \text{Área del lisímetro en m}^2 \times 1000$$

- E_{to} (mm): Es el total de agua que el entorno y las plantas pierden hacia la atmósfera.
- Lluvia (mm) x 2: Se resta porque es un riego natural que ya recibió el sistema.
“x2” es un ajuste experimental para evitar el exceso de riego.
- Área del lisímetro: Se usa para transformar la medida de altura (lámina) en una cantidad de volumen real.
- Multiplicar por 1000: Es el paso final para expresar el volumen de agua en litros en lugar de mililitros.

Para determinar las necesidades hídricas del lisímetro se realizó un balance hídrico tal y como lo determina la FAO, la diferencia que existe entre la demanda de agua del cultivo (E_{to}) y la lluvia que efectivamente aprovecha el suelo (P_e) lo que nos permite determinar exactamente la cantidad de agua necesaria, en cuanto al agua que se evapora, para poder manejarlo la lámina calculada pasa de mm a litros mediante la conversión que $1 \text{ mm} = 1 \text{ L/m}^2$, lo que nos ha permitido afirmar que cada planta podría recibir el volumen de agua necesario para su desarrollo.

El procedimiento permite la obtención de la evapotranspiración del cultivo, la diferencia entre el agua suministrada y el agua drenada, resguardando así que los datos obtenidos son confiables para poder evaluar los métodos indirectos.

3.6.1.5. Sensor de humedad.

El monitoreo del contenido de humedad se realizó diariamente con ayuda de un medidor de ph y humedad (kelway) posicionado a la altura de la zona radicular, efectuando lecturas obligatorias antes de cada riego para asegurar el rigor del balance hídrico. Este procedimiento permitió registrar la variación del contenido de agua en el suelo, dato que constituye la variable de control esencial para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo.

Figura 4

kelway medidor de ph y humedad



3.6.1.5. Registro.

Se implementó una bitácora de campo para el registro diario de variables críticas, incluyendo riego, drenaje y humedad del suelo, asociando cada entrada a la fecha y lisímetro correspondiente. Para garantizar la integridad de los datos y minimizar riesgos de pérdida, la información fue digitalizada.

3.6.2. Variables evaluadas

Las variables evaluadas en la investigación están directamente relacionadas con el comportamiento hídrico del cultivo. La variable principal será la evapotranspiración del cultivo (ETc), medida directamente mediante lisímetros de drenaje. Adicionalmente, se evalúa la evapotranspiración de referencia (ETo) estimada por los distintos métodos indirectos y el coeficiente de cultivo (Kc), el cual permite relacionar la ETo con la ETc en las diferentes etapas fenológicas del pepino.

3.6.2.1. Evapotranspiración del cultivo.

Se registra el volumen de agua aplicada (D_a) y, al día siguiente, el volumen de agua drenada (D_d), permitiendo así calcular la evapotranspiración neta del cultivo como la diferencia entre ambos valores. Este procedimiento se mantuvo a lo largo del ciclo fenológico del pepino para obtener datos continuos y representativos del comportamiento hídrico del cultivo. Esto con la ayuda de la siguiente fórmula:

$$ET_c \text{ o } ET_o = D_a - D_d$$

Donde:

ET_c = evapotranspiración del cultivo (mm d⁻¹)

ET_o = evapotranspiración de referencia (mm d⁻¹)

D_a = cantidad de agua aplicada (mm)

D_d = cantidad de agua drenada (mm)

3.6.2.2. Evapotranspiración de Referencia.

A partir de los datos obtenidos mediante el método directo del lisímetro de drenaje instalado en el cultivo de pepino, se evalúa la precisión de cuatro métodos indirectos comúnmente utilizados para estimar la evapotranspiración de referencia (ET_o). Esta comparación se basa en la relación entre las estimaciones generadas por los métodos indirectos y los valores reales de evapotranspiración del cultivo (ET_c) obtenidos experimentalmente.

La ET_o se obtiene gracias a registros climáticos de la estación meteorológica automatizada adyacente a la zona de estudio; la estación dará valores de variables ambientales necesarios como son: radiación solar diaria, temperatura del aire máxima y mínima, humedad relativa (máxima y mínima) y velocidad del viento. Estos valores permiten la adecuada aplicación de los diferentes métodos, teniendo en cuenta sus exigencias.

3.6.3. Métodos de referencia

3.6.3.1. Penman–Monteith.

El primer método que se aplicó será la ecuación Penman–Monteith FAO-56, reconocida internacionalmente como el estándar más confiable para estimar la ET_o debido a su base física y su capacidad para integrar múltiples factores climáticos.

Formula:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Dónde:

ET_o: evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

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

R_a: 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)

3.6.3.2. *Tanque evaporímetro Clase A.*

En la siguiente etapa del estudio, se implementa el método del tanque evaporímetro Clase A para la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o), aprovechando su capacidad de representar la evaporación directa desde una superficie libre de agua (Allen et al., 1998). Esta técnica permite integrar de forma conjunta los efectos de las principales variables climáticas, como la radiación solar incidente, la temperatura del aire, la velocidad del viento y la humedad relativa, lo cual la convierte en una herramienta útil para representar el proceso de evaporación total del ambiente de cultivo.

El procedimiento de trabajo consiste en la cuantificación de la evaporación medida cada día en el tanque de Clase A, que es el utilizado para el cálculo de la ET_o, multiplicado por un coeficiente empírico (K_p) creado a partir de las características del lugar de trabajo, el cual permite ajustar la evaporación registrada a las condiciones de una superficie de cultivo; es así como la ET_o se puede calcular como producto de la evaporación medida diaria (E_{pan}) por el coeficiente del tanque (K_p).

$$ET_o = K_p E_{pan}$$

Donde

ET_o: evapotranspiración de referencia [mm día⁻¹]

K_p: coeficiente del tanque evaporímetro

E_{pan}: evaporación del tanque evaporímetro [mm día⁻¹]

3.6.3.3. *Hargreaves.*

La aplicación del método de Hargreaves se basa en el cálculo de la radiación solar extraterrestre (Ra), la cual se estima a partir de la fecha del año y la latitud geográfica del sitio experimental. Con esta información, se podrá determinar la ET_o de manera práctica y accesible, permitiendo su comparación directa con las mediciones obtenidas mediante lisímetros de drenaje.

Formula:

$$ET_o = 0,0135 \times KT \times Ra \times (T + 17,8) \times (T_{max} - T_{min})^{0.5}$$

Donde:

Ra: es la radiación solar entrante de onda corta (mm d⁻¹);

KT = coeficiente

T = Radiación solar extraterrestre, en mm/día (tabulada)

T_{max}: la temperatura máxima (°C);

T_{min}: la temperatura mínima (°C); KT, 0,162 por regiones internas y 0,19 para regiones costeras.

3.6.3.4. *Priestley–Taylor.*

Con el objetivo de finalizar con el análisis comparativo, se aplica el método de Priestley–Taylor para estimar el índice de evapotranspiración de referencia (ET_o) para el cultivo de pepino. Esta fórmula es la versión simplificada de la ecuación de Penman, en la que el componente aerodinámico relacionado con el efecto del viento y el gradiente de presión de vapor es sustituido por la fracción constante del componente radiactivo, con la cual minimiza la cantidad de datos necesarios.

Formula:

$$ET_o = 1,26 \times \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \times (Rn - G)$$

Donde:

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

γ : constante psicrométrica (kPa °C-1)

Rn: radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m-2 día-1)

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

3.6.4. Coeficiente del cultivo (K_c).

En cada etapa de desarrollo del pepino, se calcula el valor del K_c utilizando la relación entre la evapotranspiración del cultivo (E_{tc}) y la evapotranspiración de referencia (E_{to}) previamente estimada con los diferentes métodos indirectos lo cual permitirá modelar el comportamiento del K_c en función del tiempo y evidenciar cómo este coeficiente varía según la fase fenológica.

$$E_{tc} = E_{to} * K_c$$

Dónde:

E_{tc} : evapotranspiración del cultivo (mm/día-1)

E_{to} : Evapotranspiración de referencia (mm/día-1)

K_c : Coeficiente de cultivo

Despejando:

$$K_c = \frac{E_{tc}}{E_{to}}$$

3.7. Tratamiento de los datos

Toda la información se recolectó en hojas de cálculo para su posterior procesamiento en el software Cropwat 8.0. El análisis se centró en comparar los resultados del lisímetro contra los métodos indirectos, usando estadística descriptiva y pruebas de contraste. Para medir qué tan precisos fueron estos métodos, calculamos el R^2 y el RMSE, herramientas que nos permitieron validar el nivel de error y ajuste de los datos. Finalmente, elaboramos tablas y gráficos comparativos para que las diferencias y tendencias del cultivo se pudieran interpretar con claridad.

3.8. Recursos humanos y materiales

Para llevar a cabo la investigación se necesitó recursos humanos formados y los materiales necesarios. Ambos son indispensables para que el experimento se realice y para que la calidad de los resultados sea adecuada.

3.8.1. Recursos humanos

El equipo de trabajo fue formado por el investigador principal, responsable del diseño y ejecución del experimento Jordy Villacis y el director del proyecto de investigación Ing. Marlon Monge Msc. encargado de la supervisión del proyecto.

3.8.2. Materiales

Los materiales utilizados son material vegetal, materiales de oficina y materiales de campo, de acuerdo con su función dentro del experimento.

3.8.2.1. Material Vegetal.

Se usaron semillas certificadas de pepino (*Cucumis sativus* L.), seleccionadas por su buena adaptabilidad a las condiciones agroclimáticas de la zona de estudio y pasto ALBEDO.

3.8.2.2. Materiales de oficina.

Esto incluye cuaderno de campo, hojas de registro, bolígrafos, computadora y software estadístico para el procesamiento y análisis de resultados.

3.8.2.4. Materiales de campo.

Estos corresponden a los lisímetros de drenaje, tanque evaporímetro Clase A, balanza digital, probetas graduadas, recipientes recolectores, herramientas agrícolas y otros materiales para el manejo de cultivos y el registro de variables hídricas.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

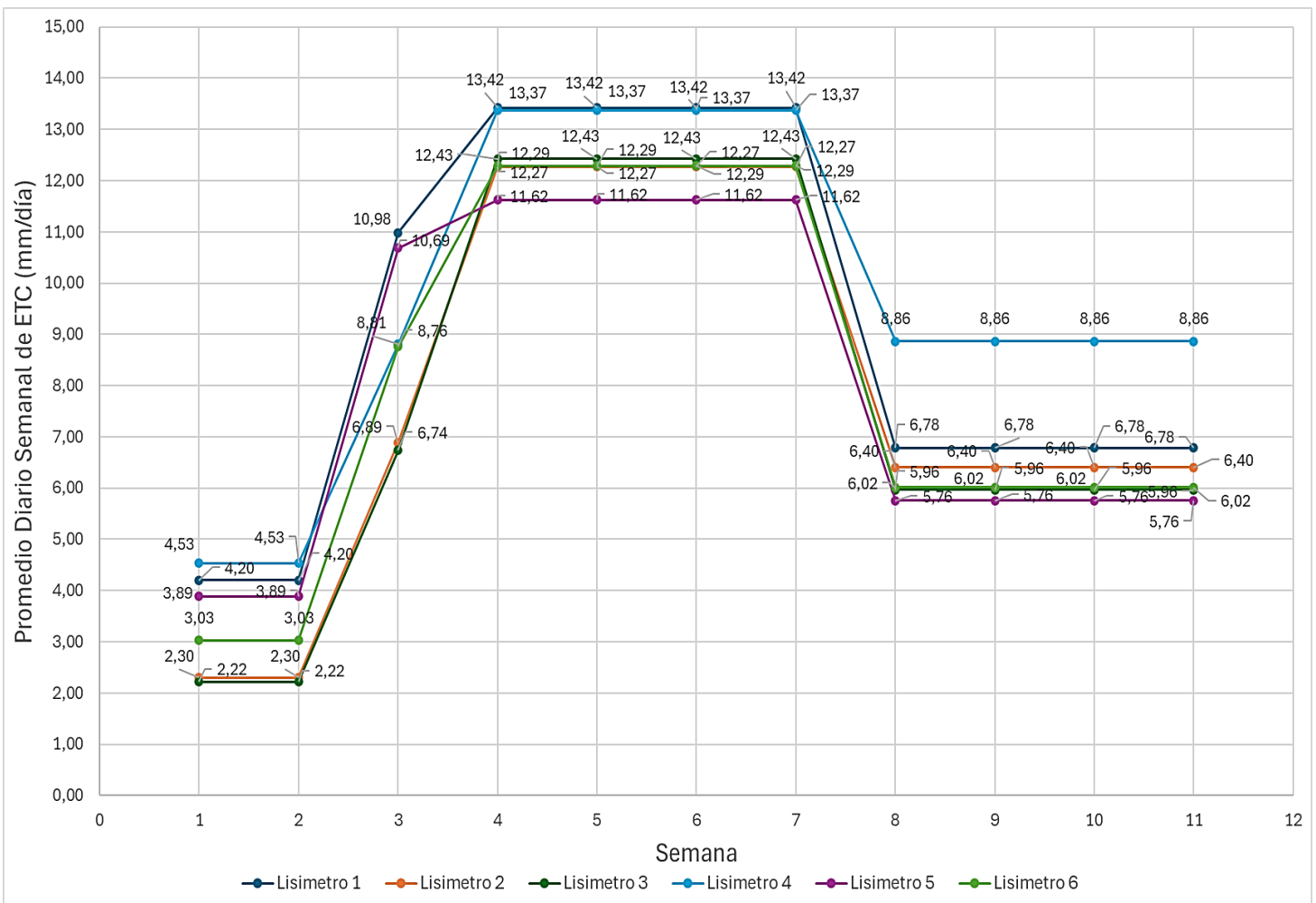
4.1. Resultados

4.1.1. Evapotranspiración del cultivo

La figura 5 presenta la evolución de la evapotranspiración (ETc) en seis lisímetros a lo largo de 11 semanas, distribuidas en tres etapas fenológicas clave. En la etapa inicial (semanas 1-2), la demanda se mantiene mínima con valores entre 2,22 y 4,53 mm/semana. El pico de consumo ocurre en la etapa media (semanas 4-7), donde se estabiliza el máximo absoluto de 13,42 mm/semana, reflejando el mayor vigor metabólico del cultivo. Finalmente, en la etapa de madurez (semanas 8-11), el consumo desciende a un rango de 5,76 a 8,86 mm/semana. La notable convergencia de los datos en estos periodos confirma que las plantas atraviesan simultáneamente las mismas fases de desarrollo, ajustando su requerimiento hídrico a las necesidades fisiológicas de cada semana.

Figura 5

Evapotranspiración cultivo de pepino lisímetro de drenaje

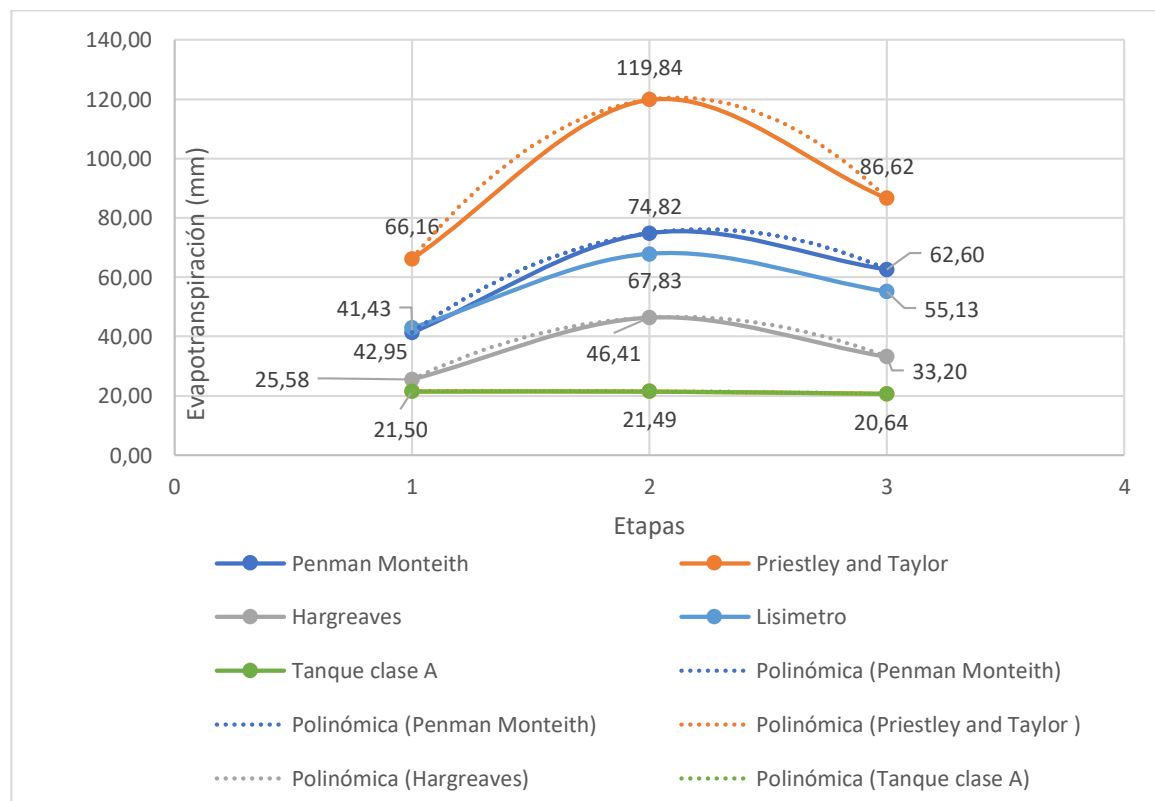


4.1.2. Comparación de diferentes métodos de estimación de la evapotranspiración acumulada

La figura 6 muestra cómo fue aumentando la evapotranspiración a lo largo del ciclo del cultivo, comparando los datos del lisímetro con los métodos indirectos. El lisímetro registró 42,95 mm en la etapa inicial, 67,83 mm en la media y 55,20 mm en la final, evidenciando un incremento progresivo hasta el cierre del ciclo. Al comparar, Penman-Monteith fue el que más se acercó a estos valores, especialmente al inicio (41,43 mm) y al final (62,60 mm), con diferencias mínimas. Mientras que la metodología de Priestley-Taylor fue la que mostró la estimación más alta, con un total de (66,16; 119,84 y 86,62 mm) que presentan una notoria sobreestimación. Hargreaves dio siempre valores intermedios (25,58; 46,41 y 33,20 mm) por debajo del lisímetro, mientras que el Tanque Clase A presentó las estimaciones más bajas (21,50; 21,49 y 20,64 mm) con una casi ausencia de variación entre las fases. De este modo, se observa que Priestley-Taylor fue el que más estimó, el Tanque Clase A el que menos y Penman-Monteith el que mantuvo un mayor acercamiento con los datos medidos de manera directa.

Figura 6

Comparación evapotranspiración del cultivo (Etc) de pepino



Nota. En el grafico las etapas son las siguientes: 1 (Etapa inicial), 2 (Etapa media) y 3 Etapa final) del cultivo de pepino.

4.1.3. Análisis estadístico entre los métodos indirectos y el lisímetro

Con los datos iniciales, medios y finales de cada método se comparó qué tan bien se ajustan respecto al valor de referencia, utilizando tres indicadores: r , R^2 y RMSE.

El coeficiente de correlación (r) muestra qué tan fuerte es la relación entre los valores estimados y los observados. En los tres primeros casos (0,9863; 0,9923; 0,9900) la relación es muy alta y positiva, lo que significa que los métodos siguen casi el mismo comportamiento que los datos reales. En cambio, el último resultado presenta una correlación de (0,0072), indicando que el método se aleja del patrón real.

El R^2 da a conocer la forma en que los datos reales quedan explicados por el modelo. Los tres primeros resultados (0,9728; 0,9847; 0,9801) consideramos resulta muy bueno ya que explican más del 90 % la variabilidad, el último (0,0001) indica que se explica menos de la mitad, o sea, de mala adaptación.

El RMSE muestra el error promedio entre los valores estimados y los valores obtenidos. El método del primero muestra un error de bajo (5,97), lo que nos muestra más precisión, mientras que los siguientes muestran errores mayores (37,57, 20,35 y 35,60), o bien con fuerte relación con los valores reales; los resultados del Tanque Clase A muestran que este método será que peor rendimiento.

Tabla 5

Indicadores estadísticos (R^2 , RMSE y coeficiente de correlación r) de los métodos de estimación de evapotranspiración respecto al lisímetro

	R^2	RMSE	r
Penman Monteith	0,9728	5,9702	0,9863
Priestley and Taylor	0,9847	37,5711	0,9923
Hargreaves	0,9801	20,3454	0,9900
Tanque clase A	0,0001	35,5816	0,0072

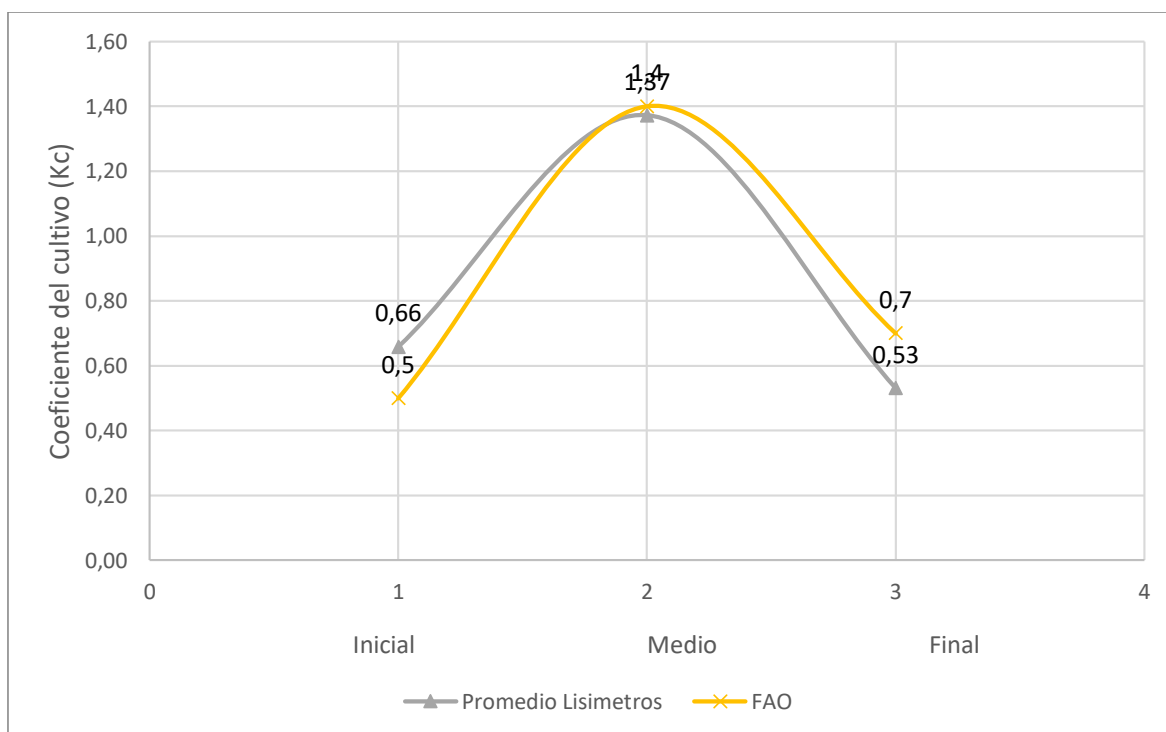
Nota. Los tres primeros métodos muestran buen comportamiento estadístico frente a los datos evaluados, mientras que el último presenta un ajuste débil y menor precisión debido a que no se obtuvieron datos completos.

4.1.4. Comparación de k_c en los lisímetros

Figura 7, muestra una comparación de los valores del coeficiente de cultivo de pepino que da la FAO con la media calculada en el estudio por el coeficiente de cultivo del lisímetro de drenaje, lo que permite enriquecer el estudio dado que se puede ver el comportamiento del cultivo en los diferentes métodos.

Figura 7

Comparación de coeficientes de cultivo



Nota: En el gráfico las etapas fenológicas son las siguientes: 1 (Etapa inicial), 2 (Etapa media) y 3 (Etapa final) del cultivo de pepino.

4.2. Discusión

En la etapa inicial, los valores de ET_c de 2,22 a 4,53 mm/semana muestran una tendencia superior a lo reportado por (Abedi-Koupai et al., 2011), quienes registraron consumos de 1,8 a 3,5 mm/semana en invernadero, sugiriendo que la exposición climática del ensayo favoreció una mayor evaporación temprana. El pico máximo de 13,42 mm/semana observado entre las semanas 4 y 7 se alinea con los hallazgos de (Olorunbon et al., 2025), quienes documentaron demandas máximas de hasta 12,9 mm/día en etapas de plena producción para el cultivo de pepino. Estos valores extremos son consistentes con los picos de 12,8 mm/semana hallados por (Li et al., 2017) en cucurbitáceas bajo alta radiación solar, validando la sensibilidad de los lisímetros ante demandas críticas.

Durante la fase de madurez (semanas 8-11), el descenso al rango de 5,76 a 8,86 mm/semana representa una reducción del consumo de entre el 34% y 57% respecto al máximo, dinámica que (Jovanovic et al., 2021) atribuyen a un coeficiente de cultivo final reducido por la senescencia. Esta caída es menos drástica que la reportada por (Yang et al., 2023), cuyos registros finales en hortalizas descendieron hasta los 4,2 mm/semana, evidenciando una actividad de transpiración residual significativa en las plantas evaluadas. Finalmente, la convergencia de los seis lisímetros en el valor exacto de 13,42 mm/semana refuerza la validez estadística del ensayo, demostrando una uniformidad fenológica comparable a los estándares de producción de alta precisión documentados por (Favaro Blanco & Vinicius Folegatti, 2003).

El modelo de Penman-Monteith destaca por su gran precisión ($R^2 = 0,9728$) por integrar variables aerodinámicas determinantes en el microclima del pepino. Esta superioridad coincide con lo indicado por Wang et al., (2021), quienes apuntan que este método es el estándar para estimar evapotranspiración en invernaderos de hortalizas dada su robustez física. La similitud en los coeficientes de Priestley-Taylor sugiere que, en condiciones de alta humedad, la radiación solar es el gran motor del flujo hídrico del cultivo. Investigaciones de Islam & Alam, (2021) muestran que, en condiciones protegidas del *Cucumis sativus*, la formula simplificada de Priestley-Taylor tiene un coeficiente elevado al depender menos del déficit de presión de vapor.

La consistencia del método de Hargreaves ($r = 0,9900$) da validez a su uso como alternativa confiable cuando solo se cuenta con información térmica para la gestión del riego en pepino. El estudio de Abdo, (2022), también confirma que los modelos de temperatura son capaces de capturar de forma adecuada la variación de demandas hídricas en cortos ciclos de producción agrícola. Esta sistematicidad puede explicarse debido a que el metabolismo del pepino responde de forma lineal a la acumulación de grados-día y por lo que las estimaciones empíricas tienden a ser una aproximación a aquellas medidas mediante lisímetro. Un análisis comparativo realizado por Hadria et al., (2021) confirma que estos tres métodos mantienen errores de estimación reducidos bajo condiciones controladas, permitiendo una planificación hídrica óptima para la especie.

La similitud entre el K_c medio determinado por el lisímetro (1,37) y el estándar FAO (1,40) valida la representatividad de la demanda hídrica máxima para el cultivo de pepino. Este fenómeno es analizado por (Geng et al., 2023), quienes indican que el coeficiente de etapa media suele ser el más estable globalmente al depender primordialmente de las características fisiológicas de la especie. Sin embargo, el valor inicial más alto en el lisímetro 0,66 en comparación con el de la FAO 0,50 sugiere una influencia directa del manejo de la humedad del suelo y la frecuencia de riego en el sitio. De acuerdo con (Pereira et al., 2015), los valores iniciales de la FAO a menudo requieren ajustes al alza cuando las condiciones de evaporación superficial son intensas.

En la etapa final los datos del lisímetro medido 0,53 y 0,70 FAO refleja una senescencia o cosecha más acelerada bajo las condiciones climáticas del experimento. Según Abou-Hussein, (2012), la duración de las fases fenológicas y sus coeficientes asociados fluctúan significativamente según el fotoperiodo y la temperatura acumulada de cada localidad. Estos resultados justifican la necesidad de realizar mediciones directas mediante lisímetros para evitar la sobreestimación del riego en las etapas de maduración del pepino. Como señalan Zhang et al., (2025), la calibración local de las curvas de K_c es indispensable para mejorar la eficiencia del uso del agua en zonas con variabilidad climática.

El método Penman–Monteith indica estimaciones más similares a los datos de los lisímetros. Evaluaciones recientes confirman, además, que este modelo se presenta como el que mejor desempeño tiene en el caso de disponer de datos completos de radiación, viento y humedad

(Raja et al., 2024). Las diferencias frente a otros métodos se deben a su base física más sólida.

El método Hargreaves muestra, en tanto, mayores discrepancias respecto a los valores medidos. Capistran et al., (2021) confirmaron que este modelo puede sobreestimar en regiones húmedas por depender únicamente de temperatura. La ausencia de variables aerodinámicas hace que no sea fiable su estimación, lo que explica la variación frente a Penman–Monteith.

El modelo Priestley–Taylor presentó comportamiento intermedio, con valores cercanos, pero no idénticos a los lisimétricos. Rehman et al., (2025) indicaron que este método responde adecuadamente cuando la radiación domina el proceso evaporativo. Sin embargo, su coeficiente alfa puede variar según condiciones locales. Las diferencias detectadas pueden relacionarse con fluctuaciones de nubosidad y viento.

Las variaciones que se han observado en el evaporímetro Clase A están relacionadas con el coeficiente de la ecuación K_c que se ha estado utilizando. López-Urrea et al., (2020) mencionan que el coeficiente K_c está dentro de un margen que va desde 0,60 a 0,85, debido al viento y con una humedad ambiental determinada. Si no es calibrado al lugar de muestreo se puede obtener estimativa que podríamos llegar a separar de la evapotranspiración real. Esta sensibilidad al coeficiente del modelo K_c es lo que podría explicar las diferencias observadas en el estudio.

En la fase inicial, los valores de K_c oscilaron alrededor de 0,45–0,60. Nikolaou et al., (2023) reportaron rangos similares para pepino bajo riego localizado. Las diferencias menores pueden asociarse a cobertura del suelo y frecuencia de riego. Groh et al., (2026) señalaron que la evaporación del suelo influye significativamente en esta etapa.

En la fase intermedia, los K_c captados eran cercanos a los 1,10–1,20. Carcasi, (2022) obtuvo coeficientes similares para cultivos hortícolas, de alta densidad. Las diferencias observadas entre estudios podrían venir dadas por diferencias en el índice de área foliar, existiendo más cobertura vegetal, mayor sería la transpiración del cultivo.

En la fase final, la tendencia del K_c fue ir decreciendo en el tiempo hasta valores cercanos a 0,80–0,90. Olin Valdes, (2022) describió una reducción similar asociada a la senescencia del follaje. La actividad fotosintética decreciente es capaz de reducir la demanda hídrica que, conjuntamente con el comportamiento fisiológico de la planta, podría explicar la coincidencia de los valores de la variable entre resultados.

Las diferencias generales de estudios están principalmente relacionadas con las diferentes condiciones climáticas de las regiones. Ibarbo Espinoza & Ibarbo Espinoza, (2024) indicaron que la varianza en radiación neta y humedad relativa podría alterar la E_{Tc} aun siendo del mismo cultivo. Marcano et al., (2012) apuntaron que la calibración a condiciones locales contribuye notablemente a la obtención de resultados más ajustados. Por lo tanto, considerar los valores reflejados en el estudio, a excepción de la población de valor K_c , podrían estar más cerca de las condiciones agroclimáticas de la zona donde se encuentra el ensayo.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

El lisímetro de drenaje permitió la determinación de la evapotranspiración real del cultivo de pepino, obteniéndose valores de ETc de 40,77 mm en la fase inicial, 95,83 mm en la fase intermedia y 55,20 mm en la fase final, evidenciando que el mayor consumo hídrico ocurrió durante la floración y el fructificación.

El método de Penman–Monteith fue el que mejor se ajustó en comparación a los datos del lisímetro, presentando un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,9728$ y un RMSE = 5,97, mostrando el mejor ajuste a diferencia de los métodos Hargreaves, Priestley–Taylor y el del Tanque Clase A.

Se determinaron valores de Kc específicos para el cultivo de pepino obteniéndose valores aproximados de 0,45–0,60 en la fase inicial, 1,10–1,20 en la fase media y de 0,80–0,90 en la fase final, diferenciándose de los valores propuestos por la FAO y demostrando la importancia de la calibración local para realizar una correcta programación del riego.

5.2. Recomendaciones

Mantener un control continuo de las mediciones realizadas en los lisímetros de drenaje obteniendo los registros a la misma hora y comprobando el correcto funcionamiento del drenaje a fin de conseguir datos adecuados sobre evapotranspiración y consumo hídrico del cultivo.

Dar prioridad al uso del método de Penman-Monteith para estimar la evapotranspiración de referencia en la programación de riego por ser el que genera más precisión y menor error que los otros métodos evaluados.

Emplear los valores de K_c obtenidos en esta investigación como referencia para la programación del riego del cultivo de pepino en la zona de estudio y complementar investigaciones futuras con nuevas valoraciones en diferentes ciclos de cultivo, a fin de validar y ajustar los coeficientes en diferentes condiciones climáticas.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

- Abd El-Fattah, N. G., & Ibrahim, M. M. (2023). Estimation of Crop Coefficient and Irrigation Water Requirements of Cucumber Using the Accumulated Heat Units (Hus) in Open Field and Greenhouse Conditions. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 14(10), 341–347.
<https://doi.org/10.21608/jssae.2023.240974.1194>
- Abdo, H. (2022). *Studying changes in evapotranspiration in different climatic regions in Syria*.
<https://agris.fao.org/search/en/providers/122526/records/65a63c14b48850e523516f07>
- Abedi-Koupai, J., Eslamian, S., & Javad Zareian, M. (2011). *Measurement and modeling of water requirement and crop coefficient for cucumber, tomato and pepper using microlysimeter in greenhouse* | Request PDF. ResearchGate.
https://www.researchgate.net/publication/284221698_Measurement_and_modeling_of_water_requirement_and_crop_coefficient_for_cucumber_tomato_and_pepper_using_microlysimeter_in_greenhouse
- Abou-Hussein, S. D. (2012). *Climate Change and Its Impact on the Productivity and Quality of Vegetable Crops (Review article)*.
- Aguirre Cobeña, L. S. (2023). *Evaluación del rendimiento del cultivo de pepino (Cucumis sativus) frente a tres fertilizantes, en la parroquia Nuevo Paraíso*.
<https://dspace.esPOCH.edu.ec/items/d88ee4d8-753c-48f1-a79d-951d86346e52>
- Allan, R., Pereira, L., & Smith, M. (2020). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56* (Vol. 56).
- Allen, R. G. (Ed.). (2000). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (repr). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper* 56. FAO.
https://www.avwatermaster.org/filingdocs/195/70653/172618e_5xAGWAx8.pdf
- Almorox, J., & Grieser, J. (2015). Calibration of the Hargreaves–Samani method for the calculation of reference evapotranspiration in different Köppen climate classes. *Hydrology Research*, 47(2), 521–531. <https://doi.org/10.2166/nh.2015.091>
- Ansorge, L., & Beran, A. (2019). Performance of simple temperature-based evaporation methods compared with a time series of pan evaporation measures from a standard 20 m² tank. *Journal of Water and Land Development*, 41(1), 1–11.
<https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0021>
- Ayma Romay, A. I. (2015). *Intercambio gaseoso de las plantas y la atmósfera desde una perspectiva bioquímica, fisiológica y ecológica*.
https://www.researchgate.net/profile/Ariel-Ayma-Romay/publication/349015880_Intercambio_gaseoso_de_las_plantas_y_la_atmosfera_desde_una_perspectiva_bioquimica_fisiologica_y_ecologica/links/601b5d3ba6fdcc37a8ff719f/Intercambio-gaseoso-de-las-plantas-y-la-atmosfera-desde-una-perspectiva-bioquimica-fisiologica-y-ecologica.pdf
- Balugani, E., Lubczynski, M. W., & Metselaar, K. (2023). *Lysimeter and In Situ Field Experiments to Study Soil Evaporation Through a Dry Soil Layer Under Semi-Arid Climate—Balugani—2023—Water Resources Research—Wiley Online Library*.
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2022WR033878>
- Barrera Alarcon, C. M. (2020). *Evaluación del efecto de la intensidad de mallas fotoselectivas en cultivo sin suelo*. <https://repositorio.ual.es/handle/10835/9748>

- Baştuğ, R., Büyüктаş, D., Büyüктаş, K., Aydinsakir, K., Naci Onus, A., & Karaca, C. (2024). *Evapotranspiration and crop coefficients of some vegetable crops grown under greenhouse conditions* | *Journal of Water and Climate Change* | IWA Publishing. <https://iwaponline.com/jwcc/article/15/7/3236/103093>
- Bayisa, G. D., Ayana, M., Mekonnen, B., Hordofa, T., & Dinka, M. O. (2024). *Drainage lysimeter based measurement of water requirement and crop coefficient of bread wheat under semi-arid climate of Melkassa, Ethiopia: Heliyon*. [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(24\)13000-9?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2405844024130009%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)13000-9?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2405844024130009%3Fshowall%3Dtrue)
- Burbano Orjuela, H. (2017). LA CALIDAD Y SALUD DEL SUELO INFLUYEN SOBRE LA NATURALEZA Y LA SOCIEDAD. *Tendencias*, 18(1), 118–126. <https://doi.org/10.22267/rtend.171801.68>
- Calderón Naula, M. (2025). *Evaluación de la evapotranspiración en Lactuca sativa (lechuga) con y sin uso de sustratos de retención de humedad variable en un lisímetro de bajo costo*. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/47085>
- Capistran, L. L., Zulueta Rodriguez, R., MurilloAmador, B., Preciado Rangel, P., Verdecia Acosta, D. M., & Hernandez Montiel, L. G. (2021). *Biodiversity of AM Fungi in Coffee Cultivated on Eroded Soil*. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/3/567>
- Carcasi, J. A. (2022). El coeficiente de cultivo (kc) en la investigación y aplicación en los cultivos andinos en el Perú. *Revista científica I+D aswan science*, 2(1), 30–34. <https://doi.org/10.51392/rcidas.v2i1.17>
- Caycho Bustamante, J. J. (2023). *Implementación del método estándar FAO Penman-Monteith en una estación meteorológica automática para la determinación de la evapotranspiración de referencia (ET_o)*.

- Chacón Padilla, K., & Monge Pérez, J. E. (2020). (PDF) *Cucumber (Cucumis sativus L.) production under greenhouse conditions: Comparison between cucumber types*. https://www.researchgate.net/publication/341767324_Cucumber_Cucumis_sativus_L_production_under_greenhouse_conditions_comparison_between_cucumber_types
- Chavarría-Vidal, A. E., Morales-Sánchez, M., Soto-Bravo, F., Chavarría-Vidal, A. E., Morales-Sánchez, M., & Soto-Bravo, F. (2023). Evapotranspiración de referencia, evapotranspiración real y el coeficiente de cultivo para el cultivo de cebolla (*Allium cepa*) c.v. Álvara promedio en invernadero. *Revista Tecnología en Marcha*, 36(3), 65–77. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6240>
- Chavez Delgado, J. C. (2022). Comportamiento de los parámetros meteorológicos: Temperatura, velocidad del viento y humedad relativa y su relación con la evaporación del agua, en la ciudad de Ilo. *Universidad José Carlos Mariátegui*. <http://repositorio.ujcm.edu.pe/handle/20.500.12819/1389>
- Chipula, G., Moyo, V., Reuben, T. N., Fiwa, L., Nkhata, M., Phiri, H., & Fandika, I. (2025). Development and evaluation of site-specific evapotranspiration models in Malawi through a comparative analysis of existing models. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 137, 103814. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103814>
- Cortés, M., & Evangelina. (1999). *Gestión de riego en cultivo de pepino (Cucumis sativus L.) en sustrato bajo invernadero: Evaluación de la transpiración durante la ontogenia* | *Archivo Digital UPM*. <https://oa.upm.es/692/>
- Enrique Cruz, Y. (2023). *Control fisiológico y molecular de la partenocarpia en la familia Cucurbitaceae*. <https://repositorio.ual.es/handle/10835/19631>

- Favaro Blanco, F., & Vinicius Folegatti, M. (2003). Evapotranspiration and crop coefficient of cucumber in greenhouse. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662003000200017>
- Gamboa Barrio, A. A. (2024). *Balance hídrico como medio de gestión del uso del agua para mejorar la productividad en el cultivo de banano (Musa Paradisiaca) en el Ecuador*. <https://dspace.utb.edu.ec/items/193d5c2b-8969-4774-9f5e-d41b61844e82>
- Geng, Q., Zhao, Y., Sun, S., He, X., Wang, D., Wu, D., & Tian, Z. (2023). Spatio-temporal changes and its driving forces of irrigation water requirements for cotton in Xinjiang, China. *Agricultural Water Management*, 280, 108218. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108218>
- Goyal, P., Sharda, R., Siag, M., & Biwalkar, N. (2023). Development of the crop coefficient for vertically trained cucumber vines grown in soilless media under naturally ventilated greenhouse conditions. *Irrigation and Drainage*, 72(2), 377–389. <https://doi.org/10.1002/ird.2793>
- Groh, J., Pütz, T., Beysens, D., Cuxart, J., Agam, N., Küpper, W., Colaizzi, P. D., Vereecken, H., Gerke, H. H., & Amelung, W. (2026). Land cover influences microclimate and non-rainfall water inputs in temperate agricultural environment. *Journal of Hydrology*, 669, 135040. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2026.135040>
- Grumet, R., Lin, Y.-C., Rett-Cadman, S., & Malik, A. (2022). Morphological and Genetic Diversity of Cucumber (*Cucumis sativus* L.) Fruit Development. *Plants*, 12(1), 23. <https://doi.org/10.3390/plants12010023>
- Gul, S., Ren, J., Xiong, N., & Fawad, M. (2021). An effective evapotranspiration estimation scheme based on statistical indicators for sustainable environments in humid and semi-arid area of Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Water Supply*, 22(3), 2493–2517. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.457>

- Hadria, R., Benabdelouhab, T., Lionboui, H., & Salhi, A. (2021). Comparative assessment of different reference evapotranspiration models towards a fit calibration for arid and semi-arid areas. *Journal of Arid Environments*, 184, 104318. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104318>
- Ibarbo Espinoza, K. Y., & Ibarbo Espinoza, K. J. (2024). *Evaluación del comportamiento agronómico del cultivo de pepino (Cucumis sativus) con la aplicación de dos bioestimulantes a base de purines*. <https://repositorio.utc.edu.ec/items/6d38bead-30ce-4cf7-92d7-300f5083b6f7>
- Ikhlas, G., GovindanRajesh, GovindanTareq, A.-A., & Tareq, A.-A. (2023). *Frontiers | Evaluation of evapotranspiration models for cucumbers grown under CO2 enriched and HVAC driven greenhouses: A step towards precision irrigation in hyper-arid regions*. https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2023.1155443/full?utm_source=chatgpt.com
- Islam, S., & Alam, A. K. M. (2021). Performance Evaluation of FAO Penman-Monteith and best alternative models for estimating reference evapotranspiration in Bangladesh. *Heliyon*, 7, e07487. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07487>
- Jovanovic, N., Pereira, L. S., & Paredes, P. (2021). *Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method*. <https://uwcscholar.uwc.ac.za/items/10.1016/j.agwat.2020.106697>
- Kumari, A., Upadhyaya, A., Jeet, P., Al-Ansari, N., Rajput, J., Sundaram, P. K., Saurabh, K., Prakash, V., Singh, A. K., Raman, R. K., Gaddikeri, V., & Kuriqi, A. (2022). Estimation of Actual Evapotranspiration and Crop Coefficient of Transplanted Puddled Rice Using a Modified Non-Weighing Paddy Lysimeter. *Agronomy*, 12(11), 2850. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112850>

- Li, G., Zhang, F., Jing, Y., Liu, Y., & Sun, G. (2017). Response of evapotranspiration to changes in land use and land cover and climate in China during 2001–2013. *Science of The Total Environment*, 596–597, 256–265. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.080>
- Lopez Atinacio, M. (2018). *Efecto de la madurez y dosis de bocashi en el crecimiento, floración, rendimiento y calidad del pepino (Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Guerrero)*. <https://rosasguerrerolab.com/wp-content/uploads/2023/09/tesis-maribel-lopez-atanacio-2018.pdf>
- López-Urrea, R., Sánchez, J. M., de la Cruz, F., González-Piqueras, J., & Chávez, J. L. (2020). Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements for sprinkler-irrigated canola. *Agricultural Water Management*, 239, 106260. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106260>
- Marcano, C., Acevedo, I., Contreras, J., Jiménez, O., Escalona, A., & Pérez, P. (2012). Crecimiento y desarrollo del cultivo pepino (*Cucumis sativus* L.) en la zona hortícola de Humocaro bajo, estado Lara, Venezuela. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(8), 1629–1636.
- Nikolaou, G., Neocleous, D., Kitta, E., & Katsoulas, N. (2023). Estimating cucumber crop coefficients under different greenhouse microclimatic conditions. *International Journal of Biometeorology*, 67(11), 1745–1756. <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02535-y>
- Núñez González, G., Velázquez Pérez, D., Pelayo Cortés, F. J., & Barboza Jiménez, P. (2020). Análisis del comportamiento de la evapotranspiración de referencia durante el periodo de lluvias en cinco estaciones meteorológicas de la cuenca Lerma-Chapala. *Ingeniería agrícola y biosistemas*, 11(2), 147–159. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2018.06.014>

- Olin Valdes, J. O. (2022). *El cultivo de pepino (Cucumis sativus L.), en condiciones de cielo abierto e invernadero*. <https://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/137961>
- Olorungbon, D., Abioye, O., Sulaimon Uthmon, N., & Omobowale, M. (2025). *Determination of Crop Coefficients and Water Requirements of Cucumber (Cucumis Sativus) under Greenhouse Conditions | Ife Journal of Technology*. <https://ijt.oauife.edu.ng/index.php/ijt/article/view/277>
- Otero, A., & Goñi, C. (2021). *Manejo del suelo en plantaciones cítricas y distribución del sistema radicular*. Montevideo: INIA. https://www.researchgate.net/profile/Alvaro-Otero-6/publication/354790527_Manejo_del_suelo_en_plantaciones_de_citricos_y_distribucion_del_sistema_radicular/links/614cb3bea595d06017e88009/Manejo-del-suelo-en-plantaciones-de-citricos-y-distribucion-del-sistema-radicular.pdf
- Pentos, K., Wondolowska-Grabowska, A., Gajda, G., Babij, M., Chohura, P., Zaleski, A., Szpunar-Krok, E., Jobczyk, W., Romaniuk, A., & Gajda, D. (2022). The Effect on the Germination Vigour of Cucumber Seeds after Receiving Magnetic Field Treatment Pre-Sowing. *Applied Sciences*, 12, 5490. <https://doi.org/10.3390/app12115490>
- Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management, Agricultural Water Management: Priorities and Challenges*, 147, 4–20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>
- Petruzzellis, F., Natale, S., Bariviera, L., Calderan, A., Mihelčič, A., Reščič, J., Sivilotti, P., Šuklje, K., Lisjak, K., Vanzo, A., & Nardini, A. (2022). High spatial heterogeneity of water stress levels in Refošk grapevines cultivated in Classical Karst. *Agricultural Water Management*, 260, 107288. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107288>

- Raja, P., Sona, F., Surendran, U., Srinivas, C. V., Kannan, K., Madhu, M., Mahesh, P., Annepu, S. K., Ahmed, M., Chandrasekar, K., Suguna, A. R., Kumar, V., & Jagadesh, M. (2024). Performance evaluation of different empirical models for reference evapotranspiration estimation over Udhagamandalam, The Nilgiris, India. *Scientific Reports*, 14(1), 12429. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60952-4>
- Rehman, A., Qamar, R., Garcia, A., Shoaib, M., & Ahmad, S. (2025). *Irrigation Management in Vegetable Crops* (pp. 269–288). https://doi.org/10.1007/978-981-96-6283-8_14
- Saiz Rodríguez, R., Aguirre López, G. L., Rodríguez, J. C., Watts Thorp, C. J., Saiz Rodríguez, J. A., Ochoa Granillo, A., Saiz Hernández, J. A., Saiz Rodríguez, R., Aguirre López, G. L., Rodríguez, J. C., Watts Thorp, C. J., Saiz Rodríguez, J. A., Ochoa Granillo, A., & Saiz Hernández, J. A. (2017). Estimación de evapotranspiración con imágenes de PROBA-V de un cultivo de sandía en la costa de Hermosillo, Sonora, México. *Terra Latinoamericana*, 35(4), 301–308.
- Salazar Badillo, F. G. (2020). *Diseño, instalación y calibración de bloque de siete lisímetros de drenaje para ajuste de coeficiente de cultivos (Kc)*. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/items/dfb9d7a9-28a1-465e-8c27-28530d0ae743>
- Salazar Dominguez, R. J. (2024). *Niveles de nitrógeno en el cultivo de pepino (Cucumis sativus) en El Cantón El Carmen*. <https://repositorio.uleam.edu.ec/handle/123456789/7218>
- Salinas, J. M. (2023). *Medida y simulación de la evapotranspiración de un ciclo de cultivo de otoño de pepino en un invernadero mediterráneo en el litoral de Almería*. <https://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/19894/MARTINEZ%20SALINAS%2C%20JENIFER.pdf?sequence=1>

- Sánchez Martínez, M., & Carvacho Bart, L. (2011). Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, (50), 171–186. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022011000300010>
- Shahrajabian, M. H., & Sun, W. (2024). *A Review of Lysimeter Studies and Experiments by Considering Agricultural Production*. <https://cyberleninka.ru/article/n/a-review-of-lysimeter-studies-and-experiments-by-considering-agricultural-production/viewer>
- Taheri, M., Bigdeli, M., Imanian, H., & Mohammadian, A. (2025). An Overview of Evapotranspiration Estimation Models Utilizing Artificial Intelligence. *Water*, 17(9), 1384. <https://doi.org/10.3390/w17091384>
- Tamimi, M. A., Green, S., Hammami, Z., Ammar, K., Ketbi, M. A., Al-Shrouf, A. M., Dawoud, M., Kennedy, L., & Clothier, B. (2022). Evapotranspiration and crop coefficients using lysimeter measurements for food crops in the hyper-arid United Arab Emirates. *Agricultural Water Management*, 272, 107826. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107826>
- Usta, S. (2024). Estimation of reference evapotranspiration using some class-A pan evaporimeter pan coefficient estimation models in Mediterranean–Southeastern Anatolian transitional zone conditions of Turkey. *PeerJ*, 12, e17685. <https://doi.org/10.7717/peerj.17685>
- Villafañe, G., Basso, C., & Villafañe, R. (2016). Evapotranspiración y coeficientes de cultivo (Kc) de stevia [*Stevia rebaudiana* (Bertoni) Bertoni] bajo condiciones parcialmente protegidas. *Bioagro*, 28(2), 131–136.
- Wang, J., Shi, X., Li, Z., Zhang, Y., Liu, Y., & Peng, Y. (2021). Responses of runoff and soil erosion to planting pattern, row direction, and straw mulching on sloped

- farmland in the corn belt of northeast China. *Agricultural Water Management*, 253, 106935. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106935>
- Wu, H. (2024). *Estudio de algunos aspectos de la fisiología de las plantas micropropagadas durante su aclimatación a condiciones ex vitro*. <http://hdl.handle.net/10045/144110>
- Yan, H., Deng, S., Zhang, C., Wang, G., Zhao, S., Li, M., Liang, S., Jiang, J., & Zhou, Y. (2023). Determination of energy partition of a cucumber grown Venlo-type greenhouse in southeast China. *Agricultural Water Management*, 276, 108047. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108047>
- Yang, X., Shi, X., Zhang, Y., Tian, F., & Ortega Farías, S. (2023). *Response of Evapotranspiration (ET) to Climate Factors and Crop Planting Structures in the Shiyang River Basin, Northwestern China*. <https://repositorio.usal.es/repositorio/items/4ca7668c-3ced-4c3b-be7e-96856eeba039>
- Zhang, M., Ma, M., Lang, H., & Jiang, M. (2025). Research Advances and Perspectives on Early Flowering Traits in Cucumber. *Plants*, 14(8), 1158. <https://doi.org/10.3390/plants14081158>

CAPÍTULO VII
ANEXOS

7.1. Anexos

Anexo A. Preparación de suelo.



Anexo B. Preparación de lisímetros.



Anexo C. Instalación de lisímetros.



Anexo D. Instalación del sistema de riego.



Anexo E. Manejo del cultivo.



Anexo F. Toma de datos.

