



Determinación de la evapotranspiración de referencia diaria bajo invernadero con el empleo de métodos directos e indirectos, en el periodo agosto-octubre, Hcda. El Prado

Muñoz Jurado, Diego Marcelo

Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Agropecuario

Ing. Aguirre María Soledad, Mgtr.

10 de febrero del 2021



Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: "Determinación de la evapotranspiración de referencia diaria bajo invernadero con el empleo de métodos directos e indirectos, en el periodo agosto-octubre, Hcda. El Prado" fue realizado por el señor Muñoz Jurado, Diego Marcelo; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 8 de febrero del 2022.



MARIA
SOLEDAD

Ing. Aguirre María Soledad, Mgtr.

C.C: 1103460018



Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Muñoz Jurado, Diego Marcelo**, con cédula de ciudadanía N° 1718495375, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Determinación de la evapotranspiración de referencia diaria bajo invernadero con el empleo de métodos directos e indirectos, en el periodo agosto-octubre, Hcda. El Prado** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 8 de febrero del 2022

Muñoz Jurado, Diego Marcelo

C.C.:1718495375



Departamento de Ciencias de la Vida y de la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Autorización de Publicación

Yo **Muñoz Jurado, Diego Marcelo**, con cédula de ciudadanía N°1718495375, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Determinación de la evapotranspiración de referencia diaria bajo invernadero con el empleo de métodos directos e indirectos, en el periodo agosto-octubre, Hcda. El Prado** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 8 de febrero del 2022

Muñoz Jurado, Diego Marcelo

C.C: 1718495375

Hoja de resultados de la herramienta para análisis y / o verificación de similitud de contenidos



Muñoz Jurado Diego Marcelo Formato Perfil Tesis 3.docx
Scanned on: 2:29 February 7, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	882
Words with Minor Changes	162
Paraphrased Words	218
Omitted Words	0



MARIA
SOLEDAD

Ing. Aguirre María Soledad, Mgtr.

C.C: 1103460028



Website | Education | Businesses

Dedicatoria

A Dios por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente, a quién le doy gracias por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el proceso que llevó a cumplir con esta meta.

A mis queridos Padres Patricio y Angela quienes son mi pilar y fortaleza, quienes me han enseñado lo valioso que es ser útil y servir a los demás, les doy las gracias por llenarme de su sabiduría y amor. Gracias por permitirme seguir esta hermosa carrera la cual amo y que gracias a ustedes me siento el ser más afortunado.

A mis hermanos Bryan y María quienes siempre han sido mi guía y apoyo a lo largo de toda mi carrera de estudios, gracias por cada momento compartido.

A mis abuelitos por su amor incondicional.

A mis tíos, tías y mi cuñada Evelyn quienes considero como mi segunda familia y que siempre me han apoyado y brindado sus ánimos.

A mí querida sobrina y ahijada Daisha quien a pesar de ser muy pequeña me llena de aliento en todos mis días.

A mi tío Santiago quién es una de las personas que más admiró y de quién nunca dejó de aprender.

Agradecimientos

A la Universidad de las fuerzas Armadas ESPE y a la Carrera de Ingeniería Agropecuarias IASA I por los conocimientos aportados en mi formación profesional, a mis formadores, personas de gran sabiduría quienes se han esforzado por ayudarme a llegar al punto en el que me encuentro por sus consejos y tiempo invertido.

A mi Tutora Ing. María Soledad Aguirre, sencillo no ha sido el proceso, pero gracias a las ganas de transmitirme sus conocimientos y dedicación que los ha regido, he logrado importantes objetivos como culminar el desarrollo de mi proyecto de titulación con éxito y obtener una afable titulación profesional, gracias por su paciencia, consejos y apoyo incondicional brindado.

A mi Padre Patricio y tío Santiago por su apoyo y conocimientos brindados que fueron importantes para el cumplimiento de este proyecto de titulación.

A mis amigos Diego Loor, Andrea Sarango, Milena Martínez, Erick Rivera, Tito Rhea y Carlos Jumbo, quienes me han brindado su afecto y apoyo incondicional durante toda la carrera.

Índice de Contenidos

Carátula	1
Certificación	2
Responsabilidad de Auditoria	3
Autorización de Publicación.....	4
Hoja de resultados de la herramienta para análisis y / o verificación de similitud de contenidos	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimientos	7
Índice de tablas	13
Índice de figuras.....	15
Índice de ecuaciones.....	18
Resumen	19
Abstract.....	20
Capítulo I	21
Introducción.....	21
Antecedentes	21
Justificación.....	23
Objetivos	26
<i>Objetivo General</i>	26
<i>Objetivos Específicos</i>	26

Hipótesis	27
Capítulo II	28
Marco referencial.....	28
Evapotranspiración (<i>ET</i>).....	28
Evapotranspiración de referencia (<i>ET_o</i>)	28
Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (<i>ET_c</i>)	29
Evapotranspiración bajo invernadero	29
Métodos directos (<i>MD</i>) para determinar la <i>ET_o</i>	30
<i>Tanque evaporímetro Clase A (T_{evap. Clase A})</i>	30
<i>Lisímetros</i>	30
Métodos Indirectos (<i>MI</i>)	31
<i>Método de Blaney y Criddle (BC)</i>	31
<i>Método de Hargreaves y Samani (HS)</i>	32
<i>Método Penman Monteith FAO 56 (C)</i>	32
<i>Método Priestley-Taylor (PT)</i>	32
Requerimiento de riego de los cultivos bajo invernadero (<i>Nr</i>)	33
Cultivo de ray grass.....	37
Capítulo III.....	38
Metodología.....	38
Ubicación del lugar de investigación	38

	10
Preparación del terreno.....	39
Determinación de la velocidad de infiltración.....	40
Determinación de la curva tensión-humedad del suelo.....	41
Calidad de agua para riego.....	42
Siembra del cultivo de referencia.....	43
Fertilización del cultivo de referencia.....	43
Aplicación de la dosis neta de riego (L_n).....	44
Instrumentos y variables a medir.....	47
Recolección de datos meteorológicos.....	48
Radiación solar (RS).....	49
Velocidad del viento (V_v) y Humedad Relativa (HR).....	50
Métodos Directos para la estimación de ET_o bajo invernadero.....	50
<i>Lisímetro de drenaje (L_sD)</i>	50
<i>Tanque evaporímetro clase A (T_{evap}, Clase A)</i>	53
Modelos para evaluar la ET_o	55
<i>Método de Blaney y Criddle (BC)</i>	55
<i>Método de Hargreaves y Samani (HS)</i>	56
<i>Método Penman-Monteith FAO 56 (PM- FAO 56)</i>	56
<i>Método Priestley-Taylor (PT)</i>	57
Criterios de Evaluación.....	58

	11
<i>Coeficiente de determinación (R^2)</i>	58
<i>Raíz del error cuadrático medio (RMSE)</i>	58
<i>Error absoluto medio (MAE)</i>	59
Capitulo IV.....	60
Resultados y Discusión.....	60
Análisis físico de suelo	60
Velocidad de infiltración	60
Determinación de la curva tensión-humedad	63
Calidad de agua para riego	64
Aplicación de Riegos	66
Datos agrometeorológicos diarios medidos en la Hcda. El Prado	66
Serie de datos agrometeorológicos diarios bajo invernadero en el periodo agosto- octubre 2021.....	66
Serie de datos agrometeorológico diarios multianual (1998-2019) de la estación MA-56	71
<i>ETo</i> diaria estimada y medida con <i>MD</i> y <i>MI</i> bajo invernadero en el periodo agosto-octubre del 2021.....	76
<i>ETo</i> decadiaria estimada y medida con <i>MD</i> y <i>MI</i> bajo invernadero en el periodo agosto-octubre del 2021.....	81
Criterios de evaluación	85
Conclusiones y Recomendaciones.....	97

Conclusiones	97
Recomendaciones	98
Bibliografía	100

Índice de tablas

Tabla 1 Medición de variables climáticas para ser usadas en ecuaciones de MD y MI	57
Tabla 2 Velocidad de infiltración en tres puntos distintos del invernadero.....	61
Tabla 3 Serie de datos agrometeorológicos diarios bajo invernadero en el periodo agosto 2021	67
Tabla 4 Serie de datos agrometeorológicos diarios bajo invernadero en el periodo septiembre 2021	68
Tabla 5 Serie de datos agrometeorológicos diarios bajo invernadero en el periodo octubre 2021	70
Tabla 6 Variables climáticas tomadas al exterior del invernadero para el mes de agosto (1998-2019)	71
Tabla 7 Variables climáticas tomadas al exterior del invernadero para el mes de septiembre (1998-2019).....	73
Tabla 8 Variables climáticas tomadas al exterior del invernadero para el mes de octubre (1998-2019)	74
Tabla 9 ETo (mm/día) estimada y medida con MD y MI bajo invernadero en el periodo agosto del 2021	77
Tabla 10 ETo (mm/día) estimada y medida con MD y MI bajo invernadero en el periodo septiembre del 2021	78
Tabla 11 ETo (mm/día) estimada y medida con MD y MI bajo invernadero en el periodo octubre del 2021.....	79
Tabla 12 Resumen del promedio diario por mes de la ETo bajo invernadero determinada con MI y MD.....	81

Tabla 13 ETo (mm/década) estimada y medida con MD y MI bajo invernadero en el periodo agosto-octubre del 2021	81
Tabla 14 Criterios para análisis diario de ETo estimada y medida bajo invernadero con MI y MD.	90
Tabla 15 Criterios para análisis decenario de ETo bajo invernadero en el periodo agosto-octubre 2021	96

Índice de figuras

Figura 1 Principales tipos de lisímetros.....	31
Figura 2 Visión satelital del área de estudio	38
Figura 3 Preparación y limpieza de malezas del terreno	39
Figura 4 Método de cilindros infiltrómetros.....	40
Figura 5 Determinación de la curva tensión-humedad del suelo	42
Figura 6 Establecimiento del cultivo de referencia	43
Figura 7 Rizotron instalado al interior del invernadero.....	45
Figura 8 Instalación del sistema de riego por aspersión.....	46
Figura 9 Instrumentos para la toma de variables climáticas	47
Figura 10 Tanque evaporímetro Clase A (T_{evap} . Clase A)	48
Figura 11 Instalación tanque lisímetro de drenaje (L_sD).....	52
Figura 12 Penetrómetro	53
Figura 13 Dimensiones del Tanque evaporímetro Clase A	54
Figura 14 Velocidad de infiltración punto A cilindros de 60 y 30 cm de diámetro	62
Figura 15 Velocidad de infiltración punto B cilindros 60 y 30cm de diámetro	62
Figura 16 Velocidad de infiltración punto C cilindros 40 y 20cm de diámetro.....	63
Figura 17 Curva tensión-humedad del suelo.....	64
Figura 18 Análisis de calidad de agua del área en estudio	65
Figura 19 ETo diaria bajo invernadero estimada y medida con MD y MI durante periodo agosto- octubre 2021	83
Figura 20 ETo decadaria bajo invernadero estimada y medidas con MD y MI durante el periodo agosto- octubre 2021	84

Figura 21 Correlación de valores estimados y medidos de la ETo diaria bajo invernadero estimada con el MI de PM-FAO 56 y la ETo diaria bajo invernadero medida con el tanque T_{evap} . Clase A	86
Figura 22 Correlación de valores estimados y medidos de la ETo diaria bajo invernadero estimada con el MI de PT y la ETo diaria bajo invernadero medida con el tanque T_{evap} . Clase A	87
Figura 23 Correlación de valores estimados y medidos de la ETo diaria bajo invernadero estimada con el MI de HS y la ETo diaria bajo invernadero medida con el tanque T_{evap} . Clase A	88
Figura 24 Correlación de valores estimados y medidos de la ETo diaria bajo invernadero estimada con el MI de L _s D y la ETo diaria bajo invernadero medida con el tanque T_{evap} . Clase A	89
Figura 25 <i>Correlación de valores estimados y medidos de la ETo decadaria bajo invernadero estimada con el MI de PM-FAO 56 y la ETo decadaria bajo invernadero medida con el MD T_{evap}. Clase A.....</i>	91
Figura 26 Correlación de valores estimados y medidos de la ETo decadaria bajo invernadero estimada con el MI de PT y la ETo decadaria bajo invernadero medida con el MD T_{evap} . Clase A	92
Figura 27 Correlación de valores estimados y medidos de la ETo decadaria bajo invernadero estimada con el MI de HS y la ETo decadaria bajo invernadero medida con el MD T_{evap} . Clase A	93
Figura 28 Correlación de valores estimados y medidos de la ETo decadaria bajo invernadero estimada con el MI de BC y la ETo decadaria bajo invernadero medida con el MD T_{evap} . Clase A	94

Figura 29 Correlación de valores estimados y medidos de la ETo decadaria bajo invernadero
estimada con el MI de L_sD y la ETo decadaria bajo invernadero medida con el MD

T_{evap.} Clase A 95

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 Lámina neta de riego (L_n).....	33
Ecuación 2 Lámina bruta (L_b)	35
Ecuación 3 Frecuencia de riego (Fr).....	36
Ecuación 4 Tiempo de riego (Tr).....	36
Ecuación 5 Lámina de riego (L_r).....	37
Ecuación 6 Caudal aplicado (Q)	46
Ecuación 7 Estimación de datos de R_s modelo de Ángstrom	49
Ecuación 8 Duración teórica de las horas de sol diaria	49
Ecuación 9 ET_o Lisímetro de drenaje ($ET_o L_3D$)	51
Ecuación 10 Tanque evaporímetro Clase A	54
Ecuación 11 Blaney y Criddle	55
Ecuación 12 Hargreaves y Samani	56
Ecuación 13 Penman y Monteith.....	56
Ecuación 14 Priestley y Taylor	57
Ecuación 15 Coeficiente de determinación (R^2)	58
Ecuación 16 Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	59
Ecuación 17 Error absoluto medio (MAE)	59

Resumen

El objetivo de este estudio fue correlacionar métodos indirectos (*MI*) [Penman y Monteith FAO 56(*PM- FAO 56*), Hargreaves y Samani (*HS*), Priestley y Taylor (*PT*), Blaney y Criddle (*BC*)] y un método directo (*MD*) [lisímetro de drenaje (*L_sD*)] con el tanque evaporímetro Clase A (*T_{evap. Clase A}*) para estimar la *ETo* diaria bajo invernadero (*ETo_{diaria Inv}*), durante el periodo agosto-octubre 2021, en la Hcda. El Prado. Las variables climáticas de temperatura máxima (*T_{max}*, °C), temperatura mínima (*T_{min}*, °C), Humedad relativa (*Hr*, %) se obtuvieron cada 30 min de 6:00 a 18:00 mediante una estación agrometeorológica automática (WS-2317 Weather Pro Center) y la radiación solar *incidente* (*Rs*, *W/m²*) fue medida con un piranómetro (CPM3) cada minuto, estos equipos fueron instalados en el centro del invernadero junto con el *L_sD*. El cultivo de referencia usado en la determinación de *ETo_{diaria Inv}* corresponde al pasto ray grass var. Italiano; se usó riego por aspersión para satisfacer la demanda de agua del cultivo. Los resultados de *ETo_{diaria Inv}* estimados con cada *MD* y *MI*, fueron correlacionados con valores medidos de *ETo_{diaria Inv}* con el *T_{evap. Clase A}*, situado en el centro del invernadero; la evaporación del tanque (*Ep*) fue registrada de manera diaria a las 17:00 y se usó un coeficiente del tanque (*Kp*) de 0,65 para el cálculo *ETo_{diaria Inv}*. Los resultados obtenidos mostraron que el *MI* de *PM-FAO 56* fue el que presentó la mejor bondad de ajuste en relación a los valores medidos de *ETo_{diaria Inv}* con el *T_{evap. Clase A}*; se obtuvo un coeficiente de determinación (*R²*) de 0.02, error cuadrático medio (*RMSE*) de 0.78 y error absoluto medio (*MAE*) de 0.65; mientras que el *MD* de *L_sD* obtuvo *R²* de 0,0025, *RMS* de 1,47 y *MAE* de 1,19. La *ETo* promedio diaria estimada durante el periodo agosto–octubre 2021 fue de 1,64 mm. día⁻¹ para *PM-FAO56*, 1,41 mm. día⁻¹ para el *L_sD* y la *ETo_{diaria Inv}* con el *T_{evap}* fue de 2,34 mm. día⁻¹

Palabras Clave: Evapotranspiración referencia invernadero, Penman-Monteith FAO56, lisímetro drenaje.

Abstract

The purpose of the study was to correlate MI [Penman and Monteith FAO 56 (*PM-FAO 56*), Hargreaves and Samani (*HS*), Priestley and Taylor (*PT*), Blaney and Criddle (*BC*)] and a MD [drainage lysimeter (*L_sD*)] with the Class A evaporimeter tank (T_{evap} . *Class A*) to estimate the daily *ET_o* under greenhouse (*ET_odiaria Inv*), during the period August-October 2021, in the Hcda. El Prado. The climatic variables of maximum temperature (T_{max} , °C), minimum temperature (T_{min} , °C), relative humidity (*Hr*, %) were acquired every 30 min from 6:00 a.m. to 6:00 p.m. by means of an automatic agrometeorological station (WS- 2317 Weather Pro Center) and the incident solar radiation (*Rs*, W/m²) was measured with a pyranometer (CPM3) every minute, these devices were installed in the center of the greenhouse together with the *L_sD*. The reference crop used in the determination of *ET_odiaria Inv* corresponds to ray grass var. Italian; sprinkler irrigation was used to meet the crop's water demand. The results of *ET_odiaria Inv* estimated with each *MD* and *MI*, were correlated with measured values of *ET_odiaria Inv* with the *T_{evap}. Class A*, located in the center of the greenhouse; tank evaporation (*Ep*) was recorded daily at 17:00 and a tank coefficient (*Kp*) of 0.65 was used to calculate *ET_oday Inv*. The results obtained showed that the *MI* of *PM-FAO 56* was the one that presented the best goodness of fit in relation to the measured values of *ET_odiaria Inv* with *T_{evap}. A class*; a coefficient of determination (R^2) of 0.02, mean square error (*RMSE*) of 0.78 and mean absolute error (*MAE*) of 0.65 were obtained; while the *MD* of *L_sD* obtained R^2 of 0.0025, *RMS* of 1.47 and *MAE* of 1.19. The estimated daily average *ET_o* during the period August–October 2021 was 1.64 mm.day⁻¹ for *PM-FAO56*, 1.41 mm.day⁻¹ for *L_sD*, and the daily *Inv ET_o* with *T_{evap}. A class* was 2.34 mm.day⁻¹.

Keywords: Greenhouse reference evapotranspiration, Penman-Monteith FAO56, drainage lysimeter.

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

Se conoce como ET_o , a la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que ocurre sin restricciones de agua. La superficie de referencia corresponde a un cultivo hipotético de pasto con características específicas, esta se ve afectada únicamente por el clima y se puede estimar con datos meteorológicos (FAO 56, 1990).

Para calcular la evapotranspiración de un cultivo cualquiera que se pretenda regar, se valora la ET_o y después se comparan las necesidades de este cultivo de referencia con el cultivo que se pretende regar (Fuentes & Cruz, 1990). El cultivo de referencia representa una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado (FAO 56, 1990).

La determinación de la ET_o representa el primer paso y la columna vertebral para el diseño, programación y gestión del recurso hídrico. En la programación del calendario de riego la ET_o es primordial, tanto en lo que se refiere a la frecuencia de la aplicación, como la cantidad de agua a aplicar (García E. , 2016).

Para determinar la ET_o existen MD e MI , dentro de los MD podemos destacar T_{evap} . Clase A y el método de L_sD los cuales emplean métodos de balance de energía y balance agua para el cálculo de ET_o , los MI utilizan fórmulas empíricas que necesitan datos meteorológicos para estimar la ET_o (FAO 56, 1990).

Los MD para determinar ET_o realizan lecturas exactas de parámetros físicos o el balance de agua del suelo en lisímetros (FAO 56, 1990). El lisímetro, gracias a su principio de

funcionamiento puede registrar las salidas de agua en el suelo consiguiendo medir la cantidad que se pierde por evapotranspiración y drenaje, por tanto, también podemos conocer el volumen de agua que queda en el suelo (León, 2018).

Los *MI* usan fórmulas para determinar la *ET_o*, las cuales se han obtenido a base de experimentaciones en campo y estimaciones teóricas, sin embargo, muchas de estas ecuaciones solo responden a condiciones específicas de clima y no son válidas para escenarios distintos (Sangucho, 2018). Se puede utilizar datos horarios, diarios y mensuales. Existen modelos de FAO 56 (*PM-FAO 56*), *PT*, *HS*, que permiten estimar de manera diaria la *ET_o* ecuaciones mencionadas por Jara J. (2005) que cita a Allen *et al.* (1998), Jensen *et al.* (1990), Mercado *et al.* (2006) y Samani *et al.* (2000). El modelo *PM-FAO 56* es el más utilizado para determinar la *ET_o* a campo abierto, sin embargo, este método no es muy usado bajo condiciones de invernadero (de Souza, 2016); El método *PT* ha sido adaptada para zonas húmedas como el estado de Victoria en Australia (Ortiz & Chile, 2020). Por otra parte, el modelo de *PT*, desarrollado en 1972, simplifica el uso de *PM-FAO 56*, aprovechando la fuerte correlación que existe entre el déficit de presión de vapor y la radiación neta esto lo menciona (Jara J. , 2005) que cita a Allen *et al.* (1998), Jensen *et al.* (1990), Mercado *et al.* (2006), Samani *et al.* (2000), el modelo de *BC* relaciona datos climáticos fáciles de obtener (Fuentes & Cruz, 1990).

En este contexto las necesidades hídricas de un cultivo a cielo abierto difieren de los cultivados en invernaderos por las condiciones de microclimas que se crean (Casanova *et al.*, 2004). Bajo invernadero se reducen los volúmenes de agua aplicados y se elevan los rendimientos siendo clave la determinación de la *ET_o*. Por lo que se tendrá menor costo y una mayor eficiencia aplicación de agua para riego (López *et al.*, 2009).

Una adecuada aplicación de riego es fundamental en la respuesta de la planta ante enfermedades y desórdenes fisiológicos (Flores *et al.*, 2007). La cantidad de agua debe estar en los niveles que los cultivos puedan absorberla con facilidad, de acuerdo a sus requerimientos, asegurando su penetración, lavado de sales y almacenamiento en la zona radicular (Arévalo *et al.*, 2013).

La entrega oportuna del agua de riego se hace mediante sistemas de riego tradicionales y tecnificados. En la presente investigación se usará un sistema de riego por aspersión para satisfacer las necesidades de riego del cultivo de referencia (pasto) que se usará para la determinación de la *ETo* diaria bajo invernadero.

Justificación

La *ETo* nos permite estudiar la demanda de evapotranspiración de la atmósfera indistintamente del cultivo, estado de desarrollo, labor cultural o suelo, viéndose afectado únicamente por el clima, permitiéndonos manifestar la capacidad de evaporación de una atmósfera en un sitio y época específica. Se lo realiza midiendo la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia, que para el caso es un pasto hipotético con características específicas y que ocurre sin restricciones de agua (Allen *et al.*, 2006).

En la planificación de proyectos de riego es esencial el conocimiento de los valores de la *ETo* de las diferentes regiones. Esto va a permitir determinar las exigencias en agua de cada cultivo y, por lo tanto, sus posibilidades de adaptación en cada región, según los recursos de agua de que se disponga. Tomando en cuenta que el recurso agua es un factor limitante de la producción agrícola, se hace necesario la realización de estudios orientados en la obtención de métodos satisfactorios para determinar las necesidades de riego que permitan una mejor utilización de dicho recurso (Khan *et al.*, 1998).

El impacto generado por los constantes cambios climáticos está obligando a los productores a buscar una mayor seguridad en los sistemas de producción para garantizar la calidad y el volumen de sus productos para hacerle frente a los fenómenos como la escasez de agua y la pérdida de evaporación de la humedad del suelo. Los beneficios que proporciona el uso de invernaderos en la producción de cultivos han quedado demostrados en muchos lugares donde se cultivan hortalizas. Con el uso de esta tecnología los agricultores han logrado muy buenos resultados (Treviño, 2004).

A pesar de la variabilidad temporal y espacial del clima, se han implementado diferentes metodologías para determinar la ET_o , las cuales se han desarrollado empíricamente a través de experimentos de campo y con base en aproximaciones teóricas algunas de estas metodologías son el T_{evap} , Clase A y fórmulas indirectas (Ortiz & Chile, 2020). Para el productor elegir un método apropiado que sea fácil de aplicar y eficaz resulta clave a la hora de ser rentable en sus cosechas (Treviño, 2004).

La producción de cultivos se realiza tanto a cielo abierto como en condiciones controladas, que se obtienen principalmente bajo invernadero. Algunos cultivos al poseer un sistema radicular poco profundo, se ubican constantemente en una situación vulnerable ante los déficit hídricos, siendo esto mayor en condiciones de invernadero, donde los aportes de humedad dependen únicamente del suministro de riego adecuado (Defilipis et al., 2006), esto lleva a los productores a realizar riegos constantes y muchas veces superando los requerimientos del cultivo, ocasionando pérdidas económicas, problemas fitosanitarios y mala calidad, es por esto que es importante conocer la $ET_{o\text{diaria Inv}}$ (Ortiz & Chile, 2020).

Actualmente se puede acceder a información agroclimática a través de la red y nos permite referenciar las principales zonas para regadío, pero existe muy poca información

procedente del interior de los invernaderos, por otro lado, es lógico pensar que la información será distinta en cada invernadero y en cada zona (Baeza et al., 2010).

El cálculo de la ET_o puede beneficiar en invernaderos el funcionamiento de los sistemas de producción intensiva agrícola, pero variables meteorológicas dentro de los invernaderos rara vez están disponibles. Algunos autores han correlacionado variables climáticas externas con las internas de un invernadero y calculado la ET_o utilizando ecuaciones de referencia como la de *PM-FAO 56*, sin embargo, en los países en desarrollo no todos los datos meteorológicos están completos, lo que puede restringir el uso de la ecuación (Hadi & Farah, 2019).

El clima en la Hcda. El Prado presenta constantemente variaciones de temperatura, lluvias intensas y fuertes vientos a lo largo del año; muchas de estas variaciones generan afectaciones en cultivos que se encuentran a cielo abierto, como son daños por granizo y por vientos. Es por esto que surge la necesidad de proteger los cultivos con cubiertas y determinar la ET_o a lo largo del año.

En la Hcda. El Prado se ha realizado el cálculo de la ET_o a partir de información agro meteorológica de la estación *MA-56*. Esta investigación fue desarrollada por Sangucho (2018) y tuvo como objetivo identificar una ecuación que permita determinar la ET_o a campo abierto con la mayor precisión, donde las ecuaciones que se utilizaron fueron el método *PM-FAO 56*, método de Christiansen y Yépez, *BC*, método de Thornthwaite, método de Papadakis y método de Holdridge los cuales fueron comparados con el método del $T_{evap. Clase A}$ y se seleccionó el método cuya curva muestre su misma tendencia. Como resultado de este estudio se eligió la ecuación *PM-FAO 56* como el mejor método para estimar ET_o mensual a campo abierto. Este estudio fue considerado como preliminar y posterior a este no se han realizado otros estudios relacionados con este tema para la Hcda. El Prado.

En los predios de la Hcda. El Prado se dispone de cinco invernaderos donde se produce principalmente frutales, hortalizas y rosas. Actualmente no se cuenta con estudios de $ET_{o\text{diaria}} Inv$ y buscando completar este vacío se plantea esta investigación que procura llegar a elegir el MD e MI que permitan la mejor determinación de $ET_{o\text{diaria}} Inv$ en la Hcda. El Prado. El cálculo de ET_{o} constituye la base y que junto con el coeficiente de cultivo (K_c) nos permitirá estimar la evapotranspiración del cultivo, las necesidades y programación de riego de los cultivos, dando así la apertura a futuros proyectos de investigación enfocados a un eficiente manejo del recurso agua aplicado con el riego bajo invernadero.

La ET_{o} a lo largo del año se ve afectada por la variabilidad del clima, es por esto que debe ser determinada en todo el año. Este primer trabajo de titulación contempla la determinación de la $ET_{o\text{diaria}} Inv$ en el periodo agosto-octubre y, para alcanzar el objetivo de determinar la $ET_{o\text{diaria}} Inv$ en todo el año se continuará con esta investigación en los periodos de noviembre-enero, febrero-abril y mayo-julio; con lo cual se dará la oportunidad a estudiantes de la carrera de Ingeniería Agropecuaria para que realicen sus temas de titulación.

Objetivos

Objetivo General

- Correlacionar métodos indirectos (MI) y un método directo (MD) con el tanque evaporímetro Clase A, para estimar la ET_{o} diaria bajo invernadero ($ET_{o\text{diaria}} Inv$) en el periodo agosto-octubre, en la Hcda. El Prado.

Objetivos Específicos.

- Estimar la $ET_{o\text{diaria}} Inv$, en el periodo agosto-octubre con el empleo de MD y MI .

- Correlacionar los datos medidos y estimados en el cálculo de la $ETo_{diaria} Inv$ mediante prueba de bondad de ajuste, utilizando métodos no paramétricos.
- Encontrar la $ETo_{diaria} Inv$ en el periodo agosto-octubre, en la Hcda. El Prado, aplicando el modelo que presente la mejor bondad de ajuste, respecto a los valores de ETo medidos con el Tanque evaporímetro Clase A.

Hipótesis

La ETo calculada con el modelo directo de lisímetro de drenaje es similar a la medida con tanque evaporímetro clase A, bajo condiciones de invernadero.

La ETo calculada con al menos un modelo indirecto es similar a la medida con el tanque evaporímetro clase A, bajo condiciones de invernadero.

Capítulo II

Marco referencial

Evapotranspiración (*ET*)

Se conoce como evapotranspiración (*ET*) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo, estos procesos ocurren simultáneamente y no hay manera sencilla de distinguirlos, y se ven afectados por el clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo (Allen et al., 2006).

Evapotranspiración de referencia (*ET_o*)

Los valores de evapotranspiración de los diferentes cultivos se relacionan con la evapotranspiración de la superficie de referencia (*ET_o*) por medio de los coeficientes de cultivo (*K_c*). El pasto, así como la alfalfa, es un cultivo muy bien estudiado con respecto a sus características aerodinámicas y superficiales y es aceptado ampliamente como superficie de referencia. Debido a que la resistencia a la difusión del vapor depende fuertemente de la altura del dosel del cultivo, de la cobertura de suelo, del índice de área foliar y de las condiciones de humedad del suelo, las características del cultivo de referencia deben ser bien definidas y fijadas, es por esto que la FAO presentó la siguiente definición inequívoca para la superficie de referencia: “Un cultivo hipotético de referencia con una altura asumida de 0,12 m, una resistencia superficial fija de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0,23.” El requisito de que la superficie de pasto debe ser extensa y uniforme, resulta de asumir que todos los flujos de aire son ascendentes (FAO 56, 1990).

Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (*ETc*)

Se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas (Santana, 2008).

La *ETc* se calcula multiplicando *ETo* por el coeficiente de cultivo (*Kc*). Este coeficiente expresa la diferencia entre la evapotranspiración de la superficie cultivada y la superficie del pasto de referencia, normalmente la unidad de medida de la *ETc* es mm por una unidad de tiempo (mm/día, mm/mes, mm/año) (Allen et al., 2006).

Evapotranspiración bajo invernadero

Diversos trabajos han mostrado que la evapotranspiración en invernadero se reduce un 70 % respecto a la del aire libre, y la eficiencia en el uso del agua aumenta un 50 % (Antón et al., 2002). Los invernaderos modernos reducen la entrada de luz en al menos un 30%. Lo que debería causar simultáneamente una considerable reducción de la ET (Casanova et al., 2009).

Además gracias a la cubierta plástica en cada invernadero el balance de radiación interna es diferente a la externa en campo abierto, afectando directamente a la absorción y reflexión de la radiación solar, y como consecuencia afecta a la *ETo*, otra variable que se ve afectada es la humedad relativa siendo superior al interior del invernadero y en el interior de un invernadero hay menos velocidad del viento por lo que ocurre menos intercambio de vapor de agua del dosel a la atmósfera dentro de la cubierta (Casanova et al., 2009).

Métodos directos (MD) para determinar la ETo

Existen diversos métodos para el cálculo de evapotranspiración desde directos como el uso de lisímetros o balances de agua a indirectos con fórmulas empíricas que utilizan datos climatológicos para su estimación (Antón et al., 2002).

Tanque evaporímetro Clase A ($T_{evap. Clase A}$)

La tasa evaporativa de los tanques de evaporación llenos de agua puede ser fácilmente obtenida. En ausencia de lluvia, la cantidad de agua evaporada durante un período (*mm. día⁻¹*) corresponde a la disminución de la altura de agua en el tanque en ese período. Los tanques proporcionan una medida del efecto integrado de la radiación, viento, temperatura y humedad sobre el proceso evaporativo de una superficie abierta de agua. Aunque el tanque evaporímetro responde de una manera similar a los mismos factores climáticos que afectan la transpiración del cultivo, varios factores producen diferencias significativas en la pérdida de agua de una superficie libre evaporante y de una superficie cultivada. La reflexión de la radiación solar del agua en el tanque puede ser diferente del 23% asumido para el cultivo de referencia. El almacenaje de calor dentro del tanque puede ser apreciable y puede causar una significativa evaporación durante la noche mientras que la mayoría de los cultivos transpiran solamente durante el día. También se distinguen diferencias en la turbulencia, temperatura y humedad del aire que se encuentran inmediatamente sobre estas dos superficies. La transferencia de calor a través de las paredes del tanque también afecta el balance energético (FAO 56, 1990).

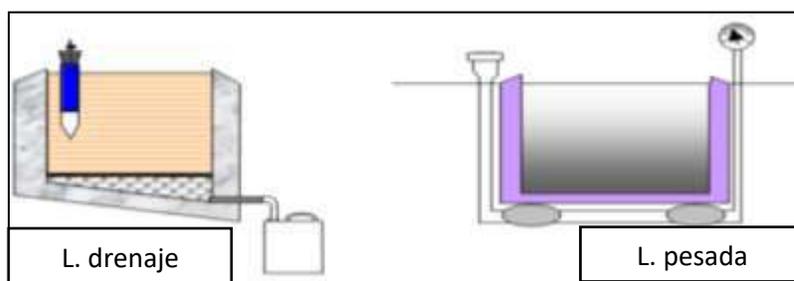
Lisímetros

Los lisímetros permiten medir con mayor exactitud ciertos procesos que no son fáciles de cuantificar, gracias a la estructura de los lisímetros que son tanques con suelo disturbado o no disturbado donde se coloca el cultivo. Existen dos tipos lisímetros: los de pesaje y los de

drenaje. Los lisímetros de drenaje censan los milímetros de agua recogida por el drenaje y la restan de la cantidad de agua aportada, obteniendo la pérdida de agua por ET . Un requisito de los lisímetros es que la vegetación dentro y fuera del lisímetro sea la misma (Hernández, 2009).

Figura 1

Principales tipos de lisímetros



Nota. Adaptado de Determinación del coeficiente de cultivo (K_C), para fréjol, bajo invernadero en la granja Santa Inés la tesis, (p. 17), por Cabello, 2015

Métodos Indirectos (MI)

Las fórmulas empíricas están consideradas como MI y consisten en fórmulas o ecuaciones deducidas por diversos investigadores. Están basadas en la aplicación de variables meteorológicas como factores que afectan la tasa de la evapotranspiración potencial. Además, han sido desarrolladas para zonas con características propias (León, 2018). A continuación, se presentan MI que permitirán una estimación diaria ET_o .

Método de Blaney y Criddle (BC)

El Método de Harry F. Blaney y Wayne D. Criddle, estableció una fórmula aplicada en las condiciones del oeste de los Estados Unidos de América, en la cual se emplean la temperatura

media mensual, el fotoperiodo diario y un factor de cultivo, con lo cual se puede estimar la *ET_o* (Sánchez, 1999).

Método de Hargreaves y Samani (HS)

El método Hargreaves y Samani fue diseñado para condiciones ambientales de California, es un método que utiliza información de temperatura máxima y mínima (Trezza R. , 2008).

Método Penman Monteith FAO 56 (C)

Método desarrollado con la definición del cultivo de referencia que es un cultivo hipotético de altura de 0.12 m, con una resistencia superficial de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0.23 y que representa la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado. Emplea datos de radiación solar diaria, temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa máxima, humedad relativa mínima y velocidad de viento, para estimar la *ET_o* (Santiago et al., 2012).

Método Priestley-Taylor (PT)

Por otra parte, el modelo de *PT*, desarrollado en 1972 propuso que la *ET_o* de diferentes tipos de vegetaciones, a una escala regional, que simplifica el uso de *PM- FAO 56* aprovechando la fuerte correlación que existe entre el déficit de presión de vapor y la radiación solar neta de *PT*. El valor del factor α depende del tipo de cubierta vegetal y se podría relacionar con el flujo de calor sensible de la cubierta, así como, con el déficit de presión de vapor. Considerando que la ecuación de *PT* predice la tasa de evapotranspiración potencial (*ET_o*) (Valdés et al., 2009).

Requerimiento de riego de los cultivos bajo invernadero (*Nr*)

El *Nr* en los cultivos es el consumo de agua que necesita compensar el cultivo debido a pérdidas por evaporación y transpiración, expresada en términos de volumen o lámina de agua (Yanangómez, 2018).

El *Nr* de los cultivos y la falta de agua en el momento oportuno fluctúan por varios factores como son: la temperatura, el clima, intensidad de la luz, viento, humedad relativa y el consumo de agua que la planta utiliza en sus procesos fisiológicos. A estos factores se suman la calidad del suelo y el cultivo (Álvarez, 2019).

El *Nr* de los cultivos se suministra mediante dosis de riego, que es la cantidad de agua que se aplica en cada riego por unidad de superficie. Se puede expresar como lámina o altura de agua que hay que aplicar, generalmente en mm de agua o como volumen en $m^3 \cdot ha^{-1}$ y $l \cdot m^{-2}$ (Álvarez, 2019).

La dosis neta de riego (*Ln*) es la cantidad de agua que tiene que aplicarse al suelo durante el riego, para reponer el agua que ha sido extraída por la planta. Esta reposición generalmente se hace hasta alcanzar el nivel de capacidad de campo. Para su estimación se utiliza la ecuación Ec.1 (Lazo, 2006).

Ecuación 1

Lámina neta de riego (Ln)

$$Ln = f \times [(CC - PMP)/100] \times (Da/\delta_{agua}) \times Pr$$

Dónde: *Ln* corresponde a la lámina neta, en mm; *CC* es Capacidad de Campo, en % Qm; *PMP* Punto de Marchitez Permanente, en % Qm; *Da* es la densidad aparente del suelo, gr/cm³;

δ_{agua} es densidad del agua, en gr/cm^3 ; Pr es profundidad radicular, en mm y f es factor o fracción de agotamiento de los cultivos, en %.

Un suelo se encuentra a CC , luego de haberse saturado y por acción de la gravedad drenado hasta que el contenido de agua en el suelo deja de perderse por infiltración y logra mantenerse luego de 24 o 72 horas (García et al., 2017).

El PMP , se refiere a la fuerza de retención que no puede ser superada por las plantas y al seguir transpirando pierde turgencia y provoca la caída de las hojas, el valor del PMP depende de las condiciones climáticas del suelo y de la conductividad hidráulica (Mariño, 2006). Densidad aparente (Da) es la relación entre la masa del suelo seco y el volumen total incluyendo el espacio poroso, varía según su textura, para un suelo franco su valor es de $1.2 g. cc^{-1}$, arcilloso $1 g. cc^{-1}$, y arenoso de $1.6 g. cc^{-1}$. f indica cuando reponer el agua una vez que se haya consumido una fracción de la CC . f toma valores entre 0.2 y 0.8 dependiendo de la sensibilidad al déficit hídrico de cada cultivo (Calvache, 2002).

Por otro lado, la necesidad real de riego o requerimiento bruto (Lb), es la cantidad de agua que debe suministrarse en cada riego tomando en cuenta que el agua aplicada no se aprovecha en su totalidad, ya que una parte más o menos importante escurre a la superficie hacia los desagües, otra penetra en la profundidad fuera del alcance de las raíces o se pierde en los canales de distribución de manera de asegurar una cantidad determinada de agua en las zona de las raíces, que permita satisfacer las necesidades de riego. Lb se determina a partir de la siguiente ecuación (Fuentes & Cruz, 1990).

Ecuación 2

Lámina bruta (Lb)

$$Lb = Ln / Ea$$

Dónde: *Ln* es la lámina neta y, *Ea* corresponde a la eficiencia de aplicación del agua a través del sistema de riego usado para satisfacer las necesidades de riego del cultivo. *Ea* da la idea del aprovechamiento del agua de riego (Fuentes & Cruz, 1990). Para aspersión permanente *Ea* está alrededor del 75 al 85 %, para goteo 80 al 95% y, para surcos alrededor del 30 al 60% (Durán, 2013).

Bajo invernadero es necesario contar con un sistema de riego para satisfacer las necesidades de riego de los cultivos. En la presente investigación las necesidades de riego del cultivo de pasto serán aportadas a través de un sistema de riego por aspersión. El riego por aspersión, por su parte, está esencialmente inspirado en el fenómeno de las lluvias, cuando éstas son lo suficientemente abundantes como para llenar las reservas del suelo, pero no llegan a ser tan copiosas que producen escorrentías ni erosionan los suelos cultivables. El considerable desarrollo que ha tenido el número de sistemas de riego por aspersión se debe, fundamentalmente, al intento de resolver problemas concretos (ahorro de mano de obra, cultivos de porte alto o bajo, anuales o perennes, etc.), en las condiciones locales más diversas (tipos de suelo y de parcelas, volumen y calidad de las aguas utilizables, clases de energía y costos, etc.) (Calvache, 2013).

Las *Nr* de los cultivos deben ser aplicadas tomando en cuenta la frecuencia de riego (*Fr*), que se define como el intervalo de tiempo entre dos riegos consecutivos. *Fr* depende de las condiciones climáticas, del estado fenológico del cultivo, del tipo de suelo, de la lámina de riego y la capacidad de respuesta del sistema de riego (Ortiz, 2008). La *Fr* viene dada por la siguiente ecuación

Ecuación 3*Frecuencia de riego (Fr)*

$$Fr = Ln / ETc$$

Dónde: Ln es lámina de agua aprovechable, en mm; ETc es la evapotranspiración del cultivo, en mm/día. Cuando se desconoce el valor de ETc , la Fr quedará definida en función de la Ln , para lo cual se recomienda los siguientes valores de factor de agotamiento (f) (Durán, 2013).

Un valor $f = 50\%$, como un valor general; un valor $f = 30\%$, para cultivos sensibles de un déficit de agua; y un valor de $f = 60\%$, para cultivos que soportan de mejor manera un estrés hídrico. El agua aplicada con el riego tiene que ser suministrada de tal forma que el suelo pueda absorberla en su totalidad, se debe compaginar el periodo de aplicación del agua (duración del riego) con la velocidad de infiltración del agua en el suelo. La velocidad de infiltración se puede determinar con el método de los cilindros infiltrómetros y con el método de los surcos. Con los datos de las pruebas de campo se determinan las curvas de lámina infiltrada y de velocidad de infiltración (Calvache, 2013). Bajo este contexto la tasa de aplicación de la lámina de riego requerida no deberá exceder la capacidad de infiltración del suelo de tal forma que la cantidad de agua y escurrimiento no sea significativa (Durán, 2013). La duración del riego (Tr) en horas quedará definida con base en la siguiente ecuación (Fernández & Junta de Andalucía, 2010).

Ecuación 4*Tiempo de riego (Tr)*

$$Tr = Lr / Lb$$

Dónde: Lr es lámina de riego, en $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$; Lb corresponde a lámina bruta.

Para el sistema de riego por aspersión, Lr definida en $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ se determinará partir de la siguiente ecuación (Fernández & Junta de Andalucía, 2010).

Ecuación 5

Lámina de riego (Lr)

$$Lr = (Qe / (Se \times Sl)) * 3600$$

Dónde: Qe es el caudal del aspersor en $l.s^{-1}$, Se corresponde a la separación entre aspersores en metros y Sl corresponde a la separación entre laterales en metros.

Cultivo de ray grass

Este pasto está considerado en el clima templado y en la sierra del Ecuador, como el pasto de mejor valor nutritivo, por tener la mejor arquitectura y por ser el de mayor consumo de los rumiantes. Pertenece al reino Plantae, división Magnoliophyta, clase Liliopsida, orden Poales, familia Poaceae, género Lolium, especie Lolium, nombre científico Lolium perenne (Cevallos, 2015).

Requiere un suelo con pH entre 5,8 y 6,7 (óptimo), con buena fertilidad, adaptándose a suelos tanto francos como francos arcillosos. Baja tolerancia a salinidad, sequía. La siembra se realiza al voleo o con maquinaria de 100-150 lb.ha⁻¹ en un suelo bien preparado con un arado de disco de 25 a 30 cm de profundidad y 2 rastra hasta dejar el suelo bien mullido (Cevallos, 2015).

La variedad ray grass italiano se desarrolla en altitudes de 2000 a 3200 m.s.n.m., usado en combinación con gramíneas y leguminosas, este forraje llega a tener rendimientos de 300 a 400 Tn. ha⁻¹ de MV al año, permitiendo aumentar la Carga animal (Licto, 2017).

Capítulo III

Metodología

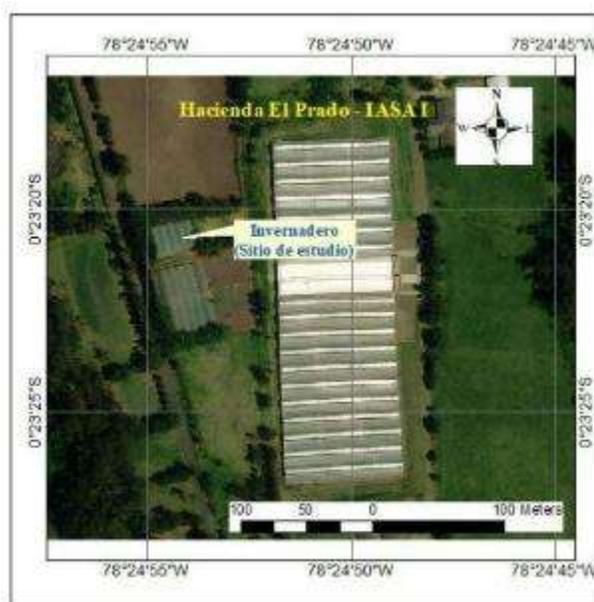
Ubicación del lugar de investigación

Esta investigación se llevó a cabo en un invernadero multitúnel de dimensiones 22.40 m x 35.90 m, de área bruta 804.16 m² y área neta de 672 m² aprox.; situado en la Carrera de Ingeniería Agropecuaria, Hcda. El Prado, Parroquia San Fernando, Cantón Rumiñahui, Provincia Pichincha. Geográficamente se ubica a 78°24'44" E, 0°23'20" S y 2 748 m.s.n.m de altitud.

El área de estudio corresponde al piso altitudinal montano bajo, región altitudinal templada zona de vida: bosque húmedo montano bajo, clasificación bioclimática: húmedo temperado y piso zoogeográfico: temperado – alto andino, la temperatura media anual es 13,96 °C, y la precipitación anual de 1332 mm (Arce & Pozo, 2015)

Figura 2

Visión satelital del área de estudio



Nota. La figura representa la ubicación del experimento. (Google Earth, 2021).

Preparación del terreno

La preparación y limpieza de malezas del terreno se realizó mediante el paso de dos arados con la ayuda de un motocultor Husqvarna modelo TF 338 tipo de cultivador frente a ti, anchura de trabajo 95 cm, profundidad de trabajo 30 cm, diámetro de púa 360 mm y número de púas 8, dejando el suelo bien aireado y mullido para la siembra del cultivo de referencia.

Previo a la instalación del sistema de riego se tomó una muestra de suelo donde se determinó la cantidad de materia orgánica, conductividad eléctrica, textura, humedad equivalente a capacidad de campo, punto de marchitez y agua aprovechable, para lo cual se tomó una muestra de suelo en 10 puntos diferentes en zigzag a 2 profundidades, de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm con la ayuda de un barreno, las cuales fueron colocadas dentro de un balde y se homogenizaron, luego se tomó un kilo de suelo que se envió al laboratorio de la Agencia de Regulación y Control Fito y Zoonitario-AGROCALIDAD *Anexo 1 y 2*.

Figura 3

Preparación y limpieza de malezas del terreno



Nota. Motocultor Husqvarna modelo TF 338 tipo de cultivador frente a ti.

Determinación de la velocidad de infiltración

Luego de la preparación del terreno dejando del suelo bien aireado y mullido la velocidad de infiltración del suelo se determinó mediante el método de cilindros infiltrómetros, donde se colocaron 2 juegos de cilindros infiltrómetros conformados cada uno por un diámetro exterior de 60 cm y 40 cm y un cilindro interior de 30cm y 20 cm de diámetro respectivamente, que se introdujeron suavemente en el suelo y se sometieron a una carga de agua y se midió el descenso de altura en milímetros durante un periodo de tiempo en tres puntos diferentes al interior del invernadero, donde se determinó el volumen que agua drenada por unidad de tiempo (Blanco, 1999). Además, la información obtenida en campo se comparó con la velocidad de infiltración obtenida con la ecuación de Rawls y Saxton (2006) mediante el programa Soil Water Characteristics. Esta información fue esencial para la selección del emisor de riego que entregara el agua al cultivo.

Figura 4

Método de cilindros infiltrómetros



Nota. Instalación de cilindros infiltrómetros, estos fueron enterrados 10 cm y nivelados.

Determinación de la curva tensión-humedad del suelo

La curva de tensión-humedad del suelo se determinó mediante la medición simultánea del valor de la humedad y el potencial matricial del suelo. Para medir el potencial matricial se colocó un tensiómetro de capa porosa y se utilizó el método gravimétrico para determinar el contenido de humedad del suelo, basado en cuantificar las pérdidas de agua en una muestra de suelo después de secarla en una estufa a 105°C durante 24 horas (García, 2011).

Para la instalación del tensiómetro se realizó un marco de madera de $1m^2$ que se ubicó en el área de siembra del cultivo en suelo descubierto. Se utilizó un tensiómetro marca Irrometer de 30 cm, el cual se colocó a 20 cm de profundidad del suelo, luego se humedeció el suelo hasta saturar, una vez el agua haya drenado y que el tensiómetro marcará 0 centibares se tomó una muestra de suelo cerca del tensiómetro.

Para la toma de muestra de suelo se utilizaron dos anillos de $80,5\text{ cm}^3$ y $83,3\text{ cm}^3$ los cuales se introdujeron a 20 cm de profundidad con la ayuda de un barreno, todas las muestras se tomaron a las 10:00 am una vez que el tensiómetro marcara diferente tensión hasta indicar 40 centibares.

Los datos de humedad y potencial matricial fueron trabajados en una tabla de Excel donde se utilizó el Logaritmo de la tensión en centibares y la humedad volumétrica en porcentaje, estableciendo una curva de regresión donde los valores en “y” responden a los datos de humedad del suelo y los valores en “x” el logaritmo de la tensión en centibares.

Además, se determinó la densidad aparente del suelo utilizando el promedio de cada muestra de suelo seco y el volumen de los anillos.

Figura 5

Determinación de la curva tensión-humedad del suelo



Nota. En la figura a) toma de muestra de suelo a determinada tensión, b) peso de la muestra en húmedo y c) secado de la muestra en estufa a 105°C durante 24 horas

Calidad de agua para riego

La calidad del agua es uno de los principales factores a la hora de estudiar los planes de manejo de riego; para analizar la calidad de agua es necesario conocer sus características físicas como son sólidos en suspensión, características químicas como pH, conductividad eléctrica, dureza, cationes, aniones (Durán, 2013). Para realizar la calificación de la calidad de agua para riego, se tomó dos muestras aproximadamente de 100 ml, de una toma de agua instalada dentro del invernadero, estas muestras de agua fueron enviadas para la determinación de los parámetros físicos y químicos al laboratorio de Acuicultura de la Carrera de Ingeniería Agropecuaria IASA I, luego de la entrega de los resultados se procedió a realizar el análisis de la calidad de agua con fines de riego (García, 2012). Los parámetros básicos a analizar para evaluar la calidad de agua con fines de riego se muestran en el *Anexo 3*.

Siembra del cultivo de referencia

Para la siembra del cultivo de referencia se utilizó el pasto anual ray grass variedad Italiano, luego de la preparación del terreno se procedió a realizar la siembra al voleo. Se utilizó 20 libras de semillas estableciendo una densidad de siembra de 150 lb. ha^{-1} para luego realizar el paso del rastrillo para cubrir las semillas y regar diariamente hasta Capacidad de Campo. El pasto se mantuvo a 12 cm de altura para su uso en el método del T_{evap} . Clase A y el método de PM- FAO 56 según las consideraciones descritas en la FAO 56 (1990).

Figura 6

Establecimiento del cultivo de referencia



Nota. Método de siembra al voleo

Fertilización del cultivo de referencia

Previo al establecimiento del cultivo de referencia se realizó un análisis de suelo, en donde se evaluaron pH, % de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, cobre, zinc, boro, azufre y conductividad eléctrica en el laboratorio de suelos, foliares y aguas de Agrocalidad (*Anexo 8*).

Con base en el análisis de suelo, el análisis de calidad de agua y una vez que el cultivo pasto anual ray-grass alcanzó una altura de 30 cm y presentó 3 hojas bien conformadas, se procedió a realizar el primer corte con la ayuda de una motoguadaña a una altura de 12 cm sobre el nivel del suelo y luego de cuatro días se realizó una corrección del elemento nitrógeno donde se colocó 20 lb de urea al voleo.

Aplicación de la dosis neta de riego (L_n).

Para observar el crecimiento radicular del pasto y determinar su máximo desarrollo se instalaron dos rizotrones cuyas dimensiones de largo ancho y profundidad fueron 40cm x 80cm x 40cm respectivamente. La L_n fue calculada a partir de la $Ec.1$ y se suministró al cultivo mediante riego por aspersión. La L_n aplicada se realizó cuando el descenso de humedad en el suelo fue del 25 %. Este descenso de humedad en el suelo se censó con el uso de 3 tensiómetros de capa porosa, 2 de los cuales se instalaron al interior del L_sD a 15 y 25 cm de profundidad respectivamente y un tensiómetro al exterior del L_sD a 30 cm de profundidad; la tensión matricial medida en el tensiómetro fue cotejada mediante la curva tensión-humedad del suelo determinada previamente y de esta manera se mantuvo la humedad en el suelo. El sistema de riego por aspersión que se utilizó en el presente estudio para satisfacer la demanda de riego neta del cultivo estuvo conformado por aspersores Mini Wobbler boquilla dorada de caudal 250 l/h, presión de funcionamiento del emisor 1.38 bares, con un diámetro de cobertura de 12.8 m, instalando 3 aspersores por cada lateral; la separación entre aspersores de 6 m y la separación entre laterales de 6.40 m. El invernadero cuenta con 5 laterales de riego. Cada lateral de riego tiene 1 válvula manual de $\frac{3}{4}$ " para el control de caudal. Para mantener el caudal de salida constante en cada aspersor, se instaló un regulador de presión de 2.0 bares a la salida de cada aspersor, así mismo se instalaron 2 medidores de presión para censar la presión del sistema antes y después del filtrado y para contabilizar el caudal que ingresa al sistema de riego se

instaló un medidor de volumen de agua. El caudal (Q) que se aportó en cada riego se definió en función de la *Ecuación. 6*. La distribución de los aspersores dentro del invernadero se muestra en (*el Anexo 4*).

Figura 7

Rizotron instalado al interior del invernadero



Nota. Método empleado para observar el crecimiento radicular en campo

Figura 8*Instalación del sistema de riego por aspersión*

Nota. Instalación de tubería principal, laterales, válvulas y aspersores.

Ecuación 6

Caudal aplicado (Q)

$$Q= V/T$$

Dónde: Q es el caudal que se aportó en cada riego en l/s, V es volumen de agua aportado en cada riego y T es el tiempo transcurrido para la aplicación de V . El caudal aportado al cultivo de pasto hasta que se haya recuperado la humedad en el suelo hasta Capacidad de Campo (CC).

Para la aplicación del volumen de agua también se tomó en cuenta el tiempo de riego el mismo que se determinó con la *Ecuación 4*.

Sin embargo, el tiempo de riego y la frecuencia de riego al interior del invernadero no fueron constante, debido a que no se cuenta con un suministro de agua independiente y

durante el periodo de estudio hubo pérdidas de presión y caudal lo que impidió el suministro oportuno de agua al cultivo de referencia.

Instrumentos y variables a medir

Las variables climáticas de temperatura máxima (T_{max} , °C), temperatura mínima (T_{min} , °C), Humedad relativa (Hr , %) se obtuvieron cada 30 min de 6:00 a 18:00 mediante una estación agrometeorológica automática (WS-2317 Weather Pro Center) y la radiación solar incidente (R_s , W/m^2) fue medida con un piranómetro (CPM3) cada minuto, estos equipos fueron instalados en el centro del invernadero junto con el L_5D .

Figura 9

Instrumentos para la toma de variables climáticas



Nota. Estación agro meteorológica automática modelo WS-2317 Weather Pro Center a la izquierda, piranómetro CPM3 a la derecha

Figura 10

Tanque evaporímetro Clase A (T_{evap} . Clase A)



Nota. Tanque de acero galvanizado, las dimensiones del tanque se tomaron de las recomendaciones propuestas por la FAO

Recolección de datos meteorológicos

Con la estación agro meteorológica automática que se instaló al interior del invernadero (ver Anexo 4) se tomaron datos correspondientes a temperatura máxima y mínima ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%), velocidad del viento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), Estas variables se registraron diariamente cada media hora en el horario de 6:00 a 18:00 durante un periodo de tres meses comprendido entre agosto-octubre. Estas variables climáticas fueron reemplazadas en las fórmulas empíricas que corresponden a los métodos indirectos para la determinación de ET_o y que se describen más adelante

Radiación solar (RS)

La radiación solar incidente diaria ($W.m^2.día^{-1}$) fue medida con el piranómetro CPM3 para el mes de agosto, sin embargo, la radiación solar para los meses de septiembre y octubre fueron estimados mediante el modelo de Ångström, la cual relaciona la radiación global con el brillo solar (Guzmán, Baldión, Simbaqueva, Zapata, & Chacón, 2013). El modelo de Ångström se define como.

Ecuación 7

Estimación de datos de Rs modelo de Ångström

$$Rs = RA \left(a + b \frac{n}{N} \right)$$

Donde Rs representa la radiación incidente diaria ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$), RA es la radiación solar al tope de la atmósfera ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$), n Heliofanía real diaria (horas de sol día⁻¹), N heliofanía teórica diaria (horas de sol día⁻¹), a y b son coeficientes empíricos. FAO recomienda valores de 0.25 y 0.5 para a y b , respectivamente (Jara J., 2016)

Ecuación 8

Duración teórica de las horas de sol diaria

$$N = \frac{24}{\pi} * hs$$

Donde hs es el parámetro asociado a la longitud del día (radian) y π 3.1416 (Jara J., 2016)

Una vez determinada la radiación solar mediante la ecuación de Ångström se comparó con la radiación solar incidente diaria obtenida con el piranómetro al interior del invernadero y se obtuvo el porcentaje de diferencia entre radiación externa e interna del invernadero, dicho porcentaje se utilizó para el cálculo de radiación bajo invernadero para el periodo de septiembre

y los 10 primeros días de octubre. Los datos de radiación solar posteriores al 10 de octubre se obtuvieron de la estación Ambient Weather 2000, instalada al interior del invernadero a partir de dicha fecha.

Velocidad del viento (V_v) y Humedad Relativa (HR)

La V_v y HR , fueron censadas a una altura de 2 metros de altura sobre el nivel del suelo respectivamente, dado que es la altura a la que son generalmente afectadas por el obstáculo que representa la vegetación circundante (Acuña, 2020). Sin embargo, no se registraron datos de velocidad del viento al interior del invernadero debido a que las velocidades de las corrientes de aire fueron menores la que la estación agro meteorológica automática modelo WS-2317 Weather Pro Center podía censar. El valor de V_v asumido para términos de cálculos fue de $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dicho valor es aceptado para la ecuación de ET_o ya que es el valor mínimo que explica los efectos de inestabilidad y flotabilidad del aire mejorando la exactitud de las estimaciones (FAO 56, 1990).

Métodos Directos para la estimación de ET_o bajo invernadero

Lisímetro de drenaje (L_sD)

Para la medición de la ET_o en los predios del invernadero se instaló un L_sD , para lo cual una vez ubicado el centro del invernadero se procedió a medir el nivel de compactación del suelo a dos diferentes profundidades de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm con la ayuda de un penetrómetro manual. Luego con una pala de desfonde se retiró el suelo a dichas profundidades teniendo cuidado de no mezclar la sección de suelo a 20 cm con la sección a 40 cm de profundidad.

El L_sD está compuesto de un tanque de 45 cm de altura y 60 cm de diámetro enterrado en el suelo, con un adaptador ubicado en el parte inferior conectado a tubería de PVC-drenaje

con una pendiente del 1% que conduce el agua hasta un recipiente en donde se recolecta el agua de drenaje.

Para cubrir las asperezas del interior del tanque lisímetro se recubrió con material pétreo el cual consistía en 3 partes de brea 3 partes de manteca vegetal y 1 parte de parafina los cuales fueron calentados para ser trabajados y colocados capa por capa y procurando mantener un desnivel hacia el adaptador ubicado en la parte inferior permitiendo recolectar el agua de infiltración al interior del lisímetro dicha capa para cubrió los primeros 10 cm del tanque, luego para evitar taponamientos en la tubería se colocó una malla metálica sobre el adaptador colocado al interior del tanque lisímetro, posteriormente se agregó una capa de grava de 10 cm de altura para facilitar la filtración del agua de drenaje, finalmente el lisímetro en su interior se rellenó con el mismo suelo que fue evacuado sin alterar sus características físicas-químicas. El protocolo de instalación del lisímetro se muestra en el *Anexo 5* (J León, comunicación personal, miércoles 28 de abril del 2021). Dentro y fuera del lisímetro se estableció el pasto ray grass variedad italiano (Sáez, 2016).

La ET_o medida durante el período de estudio mediante el L_sD , se obtuvo restando la cantidad de agua de drenaje, recogida en el fondo del lisímetro, de la cantidad total de agua ingresada. La ET_o como término residual de este balance hídrico se obtiene mediante la ecuación CER (2019) citado por (León, 2018).

Ecuación 9

ETo Lisímetro de drenaje (ETo L_sD)

$$ET_o/ET_c = \frac{R - D}{ND}$$

Dónde: ET_o/ET_c es la Evapotranspiración (mm.día-1); R es el agua agregada por riego o precipitaciones (mm); D es el agua drenada durante el período de análisis (mm); ND es el número de días que hay de un riego a otro.

Figura 11

Instalación tanque lisímetro de drenaje (L_sD)



Nota. Primero se ubicó el centro del invernadero y luego se midió el nivel de compactación en el sitio donde se colocaría el tanque, posteriormente se retiró el suelo y se instaló, procurando mantener el mismo nivel de compactación con el que fue sacado el suelo al interior del tanque.

Figura 12

Penetrómetro



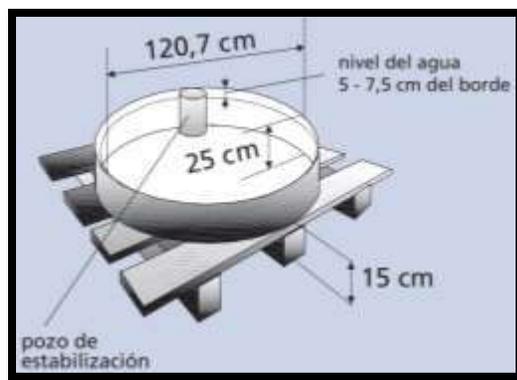
Nota. Instrumento utilizado para medir el nivel de compactación del suelo.

Tanque evaporímetro clase A (T_{evap} . Clase A)

Para la medición de la ET_o , también se instaló un T_{evap} . Clase A, el cual se fabricó de forma circular, con un diámetro de 120,7 cm y una profundidad de 25 cm, de material hierro galvanizado. El T_{evap} . Clase A se ubicó en el centro del invernadero junto al L_sD sobre una plataforma de madera y a 15 cm sobre el nivel el suelo (*ver Anexo 4*). El nivel del agua del tanque se recuperaba cuando este alcanzaba los 180mm del borde y su descenso fue medido cada día y la misma hora con el uso de un escalímetro que fue colocado dentro del tanque. Este descenso corresponde a la evapotranspiración del tanque (E_p), a su alrededor el pasto se mantuvo a una altura de 12 cm (Jaramillo, 2006).

Figura 13

Dimensiones del Tanque evaporímetro Clase A



Nota. Adaptado de Evapotranspiración del cultivo, (p. 84), por FAO, 1990

La ET_o medida con el $T_{evap. Clase A}$ fue definida con la siguiente fórmula (Fuentes & Cruz, 1990):

Ecuación 10

Tanque evaporímetro Clase A

$$ET_o = K_p \times E_p$$

Dónde: ET_o es la evapotranspiración del cultivo de referencia, en mm por día; K_p es el coeficiente de la cubeta; E_p es la evaporación de la cubeta, expresada en mm. día⁻¹ y fue registrada todos los días a las 17:00. En el *Anexo 6* se muestra el coeficiente del tanque evaporímetro (K_p) para el $T_{evap. Clase A}$ para diversas localizaciones y ambientes de los tanques y varios valores de velocidad media de viento y de humedad relativa (Serie FAO Riego y drenaje No. 24, citado en FAO 56, 1990).

La selección del K_p se la definió mediante tabla (ver *Anexo 6*), considerando una velocidad del viento baja <2 (m.s⁻¹), HR media del 40-70%, ubicación del Tanque en una superficie cultivada y distancia del cultivo a barlovento (m) de 1. Dando como resultado un K_p de 0,65.

Modelos para evaluar la *ETo*.

La evapotranspiración diaria de referencia se evaluó con *MD* y *MI* que emplean variables climáticas, donde cada método fue comparado mediante un análisis de bondad de ajuste eligiendo el método que mayor similitud presente con respecto a la evapotranspiración del T_{evap} . *Clase A*. Las mediciones de la *ETo* mediante los *MD* de L_sD y T_{evap} . *Clase A*, fueron definidas con las *Ec.7* y *Ec.8* respectivamente.

Los *MI* o fórmulas empíricas que se usaron en la determinación de la *ETo*, se describen a continuación. Las variables climáticas de T_{max} y T_{min} , *HR*, *Vv* y *Rs* se remplazaron en cada *MI* dicha las variables fueron censadas por la estación meteorológica automática WS-2317 Weather Pro Center, el piranómetro CMP3.

Método de Blaney y Criddle (BC)

Para estimar la evapotranspiración se empleó la siguiente ecuación que utiliza la temperatura media mensual el fotoperiodo y un factor de cultivo para su cálculo. Esta ecuación se recomienda para periodos no menores a 30 días. La evapotranspiración calculada con este método fue comparada con datos decenarios (Sánchez, 1999).

Ecuación 11

Blaney y Criddle

$$ETo_{B-C} = f_{B-C} * (45,72 * Tm + 812,8)$$

Dónde ETo_{B-C} es la evapotranspiración de referencia (mm), Tm es la temperatura media (°C) y f_{B-C} = factor (-) correspondiente a el producto entre el número de días del mes y el máximo número de horas de sol durante el día (N); dividido para el número de horas del mes (Doorenbos & Pruitt, 1977).

Método de Hargreaves y Samani (HS)

La ecuación de Hargreaves y Samani emplea la radiación a nivel del suelo y el promedio de la temperatura del aire (Vega & Jara, 2009).

Ecuación 12

Hargreaves y Samani

$$ET_o = \beta R_s(T_p + 17.8)$$

Dónde ET_o se expresa en $mm. día^{-1}$, R_s es la radiación solar al tope del cultivo expresada en $mm. día^{-1}$ de evaporación y T_p es la temperatura promedio del día ($^{\circ}C$); el valor de β es 0,0135 (Rivano & Jara, 2005).

Método Penman-Monteith FAO 56 (PM- FAO 56)

Ecuación 13

Penman y Monteith

$$ET_{o_{P-M}} = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

Dónde $ET_{o_{P-M}}$ es la evapotranspiración de referencia según Penman-Monteith, Rn la radiación neta en la superficie del cultivo ($MJ. m^2. día^{-1}$), G flujo de calor de suelo ($MJ. m^2. día^{-1}$), T temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}C$), u_2 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 ($kPa. ^{\circ} C^{-1}$), γ constante psicométrica ($kPa. ^{\circ} C^{-1}$) (González et al., 2012). Para el cálculo de los diferentes términos de la ecuación revisar anexo 7.

Método Priestley-Taylor (PT)

Por otra parte, el modelo de Priestley-Taylor, desarrollado en 1972, simplifica el uso de Penman-Monteith aprovechando la fuerte correlación que existe entre el déficit de presión de vapor y la radiación solar neta de este modo el término aerodinámico queda reemplazado de la siguiente forma

Ecuación 14

Priestley y Taylor

$$\lambda E = ET_r = \frac{0.408\Delta(RN - G)}{\gamma + \Delta} \alpha$$

Dónde α se estima de la siguiente forma (Jara J. , 2005).

$$\alpha = 1 + 0.26 DPV$$

Donde DPV y es el déficit de vapor promedio.

Tabla 1

Medición de variables climáticas para ser usadas en ecuaciones de MD y MI

<i>Ecuación</i>	<i>Ep</i> (<i>mm. día⁻¹</i>)	<i>T(°C)</i>	<i>%HR</i>	<i>Rs</i> (<i>MJ.m². día⁻¹</i>)	<i>Vv (m. s⁻¹)</i>
<i>T_{evap.} Clase A</i>	X	-	-	-	-
<i>BC</i>	-	X	-	-	-
<i>HS</i>	-	X	-	X	-
<i>PM-FAO 56</i>	-	X	X	X	X
<i>L_sD</i>	X	-	-	-	-

Nota. Las marcas con X indican el requerimiento de la variable en la ecuación.

Criterios de Evaluación

Una vez estimado la ET_o con cada método propuesto en esta investigación, se realizó un análisis de bondad de ajuste entre valores medidos y valores estimados, utilizando métodos no paramétricos. Los valores de ET_o determinados con la metodología del T_{evap} . Clase A corresponden a los valores medidos y los valores estimados de ET_o fueron calculados con el método directo L_3D y métodos indirectos (BC , HS , PM - $FAO 56$, PT).

El análisis de bondad se realizó basado en los siguientes índices inferenciales, donde E_i es el valor proyectado, E_m el promedio de los valores proyectado, X el promedio de los valores observados, O_i es el valor observado y n el número de valores en estudio.

Coficiente de determinación (R^2)

Calculado a través de regresiones simples, es un índice estadístico utilizado para medir la relación lineal entre dos variables cuantitativas; el valor óptimo debe ser igual a uno y cuando este valor tiende a cero, la correlación entre dos variables es baja; cuando el valor es positivo, la relación es directa y cuando el valor es negativo, la relación es inversa (Ortiz & Chile, 2020).

Ecuación 15

Coficiente de determinación (R^2)

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - X)(E_i - E_m)]^2}{(\sum_{i=1}^n O_i^2 - nX^2) \times (\sum_{i=1}^n E_i^2 - nEm^2)}$$

Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

Permite cuantificar la magnitud de la desviación de los valores simulados respecto a los observados (Cabrera, 2017).

Ecuación 16

Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{n}}$$

Error absoluto medio (MAE)

Utilizado para establecer la diferencia que existe entre una variable medida con relación a una estimada, es el promedio de todos los errores absolutos; cuando este valor tiende a cero, el error es menor entre la variable medida y la estimada, el valor óptimo es igual a cero (Ortiz & Chile, 2020).

Ecuación 17

Error absoluto medio (MAE)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - E_i|}{n}$$

Capítulo IV

Resultados y Discusión

Análisis físico de suelo

La textura del suelo donde se estableció el cultivo de referencia fue determinada mediante análisis de laboratorio, presentando una clase textural franco, con *PMP* 12,78% *Qm* y *CC* de 23,52% *Qm*, con 48% de arena (*Ar*), un 10% de arcilla (*Ac*), 2,59% de materia orgánica (*MO*) y conductividad eléctrica de $0,130 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, en los primeros 20 cm de suelo.

A una profundidad de 20 -40 cm los resultados del análisis presentaron una clase textural franco, punto de *PMP* 13,72% método gravimétrico y *CC* 25,24% método gravimétrico, (*Ar*) 46%, arcilla 12%, (*MO*) 3,06% y conductividad eléctrica $0,154 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, esta información fue esencial para el diseño del sistema de riego implementado en el invernadero.

Velocidad de infiltración

En el siguiente Tabla se presenta la velocidad de infiltración obtenidos en campo en 3 diferentes puntos al interior del invernadero Punto A y C (representan puntos extremos del invernadero) y el Punto B (representa el centro del invernadero). Además, se incluye la velocidad de infiltración obtenida con el programa Soil Water Characteristics que emplea la ecuación de Rawls y Saxton (2006).

Tabla 2*Velocidad de infiltración en tres puntos distintos del invernadero*

Velocidad Infiltración ($mm. h^{-1}$) Punto A	Velocidad Infiltración ($mm. h^{-1}$) Punto B	Velocidad Infiltración ($mm. h^{-1}$) Punto C	Velocidad Infiltración ($mm. h^{-1}$) Rawls y Saxton (2006)
39,1	19,6	31,0	38,73

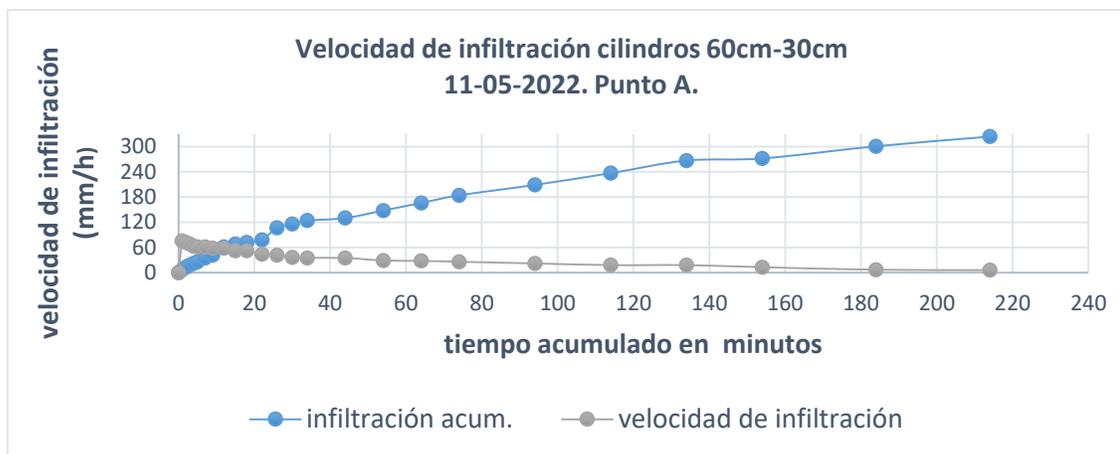
Nota. El invernadero en estudio se dividió en 3 secciones y se realizó 3 distintas mediciones de velocidad de infiltración

La velocidad de infiltración es completamente diferente para los tres distintos puntos, para el punto A y C se determinó una velocidad de infiltración de 39,1 y 31,0 $mm. h^{-1}$ respectivamente, mientras que para el punto B se determinó una velocidad de infiltración de 19,6 $mm. h^{-1}$. Esto puede deberse al distinto nivel de compactación del suelo y la presencia o ausencia de cangahua facilitando o no la infiltración del agua en cada punto. Esta información coincide con lo analizado por Mejía Granda (2014) que obtuvo resultados de velocidad de infiltración completamente dispares debido a la presencia o ausencia de cangahua (*Anexo 4*).

Para la selección del emisor se eligió la velocidad de infiltración del punto A ya que es la que más se acerca a la calculada con la ecuación de Rawls y Saxton (2006) obtenida con el programa Soil Water Characteristics.

Figura 14

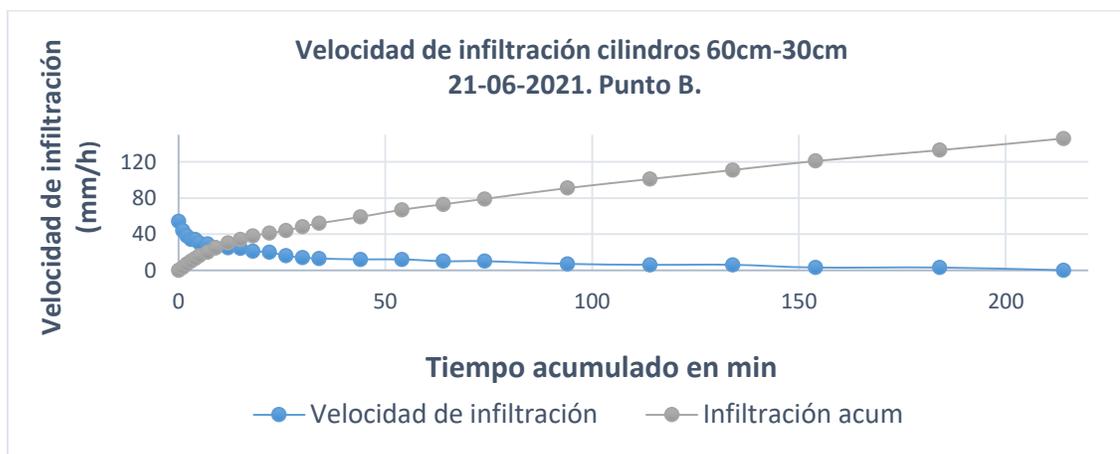
Velocidad de infiltración punto A cilindros de 60 y 30 cm de diámetro



Nota. La línea en azul representa la infiltración acumulada en el tiempo y la línea gris la velocidad de infiltración del suelo.

Figura 15

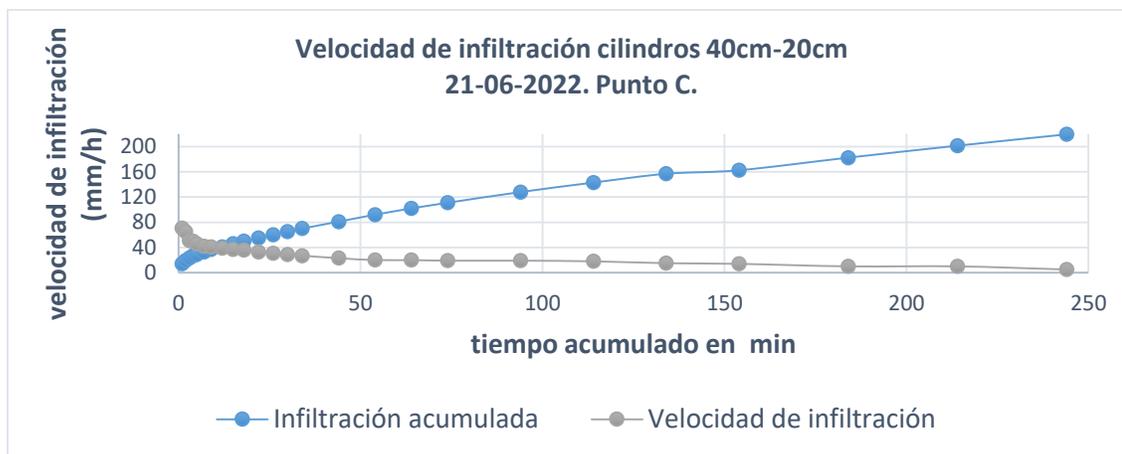
Velocidad de infiltración punto B cilindros 60 y 30cm de diámetro



Nota. La línea en azul representa la infiltración acumulada en el tiempo y la línea gris la velocidad de infiltración del suelo.

Figura 16

Velocidad de infiltración punto C cilindros 40 y 20cm de diámetro



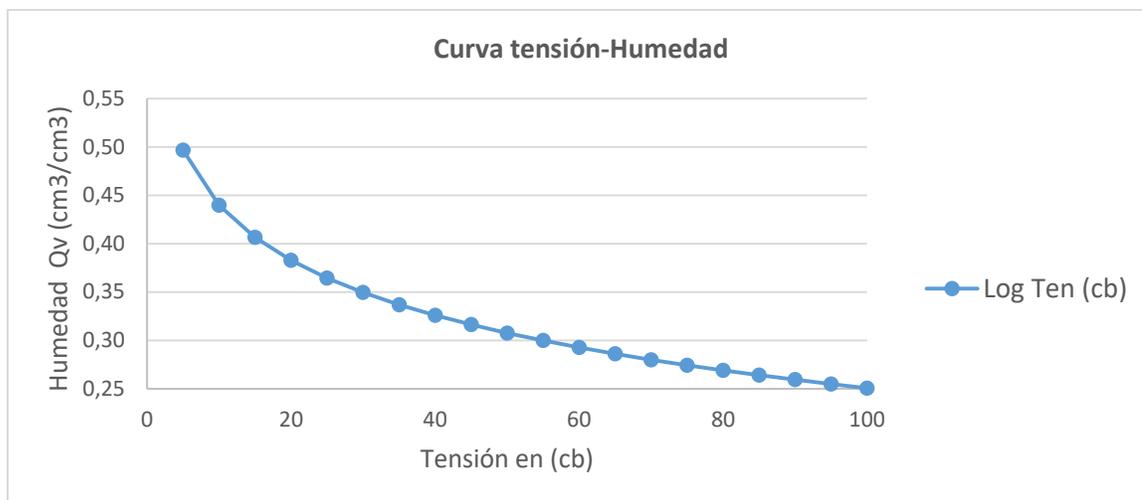
Nota. La línea en azul representa la infiltración acumulada en el tiempo y la línea gris la velocidad de infiltración del suelo.

Determinación de la curva tensión-humedad

De acuerdo a los resultados del análisis de laboratorio del INIAP En la *Figura 4* se reportan los siguientes valores en términos de masa para una profundidad de 0-20 cm CC 27,7%, PMP 15,8% D_a $1,3 \text{ g. cm}^{-3}$, además se determinó la D_a del suelo del invernadero mediante el método gravimétrico y cuyo resultado fue $1,254 \text{ g. cm}^{-3}$ este resultado fue bastante similar al determinado en laboratorio *Anexo 9*

Figura 17

Curva tensión-humedad del suelo



Nota. Los valores en Y indican la cantidad de humedad presente en el suelo y la lectura en el tensiómetro en ese momento.

Calidad de agua para riego

A continuación, se presenta el análisis físico, microbiológico y químico de calidad de agua para el invernadero del presente estudio. La calidad de agua para riego se encuentra ligeramente elevado en pH con 8,53, no presenta restricción por sales ya que la conductividad eléctrica es de $0,23 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ y Total de Sólidos disueltos (TDS) $167 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. La cantidad de nitratos se encuentra dentro del rango usual permitido con $0,44 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$, al igual que el contenido de carbonatos De acuerdo a los criterios modernos para evaluar calidad de agua para riego según (Álvaro García, 2012).

Figura 18

Análisis de calidad de agua del área en estudio

	PARÁMETROS	UNI.	M1
FÍSICOS	Temperatura	°C	17.5
	Potencial hidrogeno	0-14	8.53
	Conductividad	µS/cm	230
	TDS	mg/l	167
MICROBIOLÓGICO	Enterobacterias lactosa (+)		
	<i>Enterobacter sp.</i>	UFC/100ml	0
	<i>E. coli</i>		
	Enterobacterias lactosa (-)		
	<i>Proteus sp.</i>	UFC/100ml	<5
	Aerobios totales (<i>Bacillus sp.</i>)	UFC/100ml	<18
	<i>Pseudomonas sp.</i>	UFC/100ml	0
	Hongos	UFC/100ml	0
levaduras	UFC/100ml	0	
QUÍMICOS	Nitritos NO2	mg/l	0.014
	Nitratos NO3	mg/l	0.44
	Fosfatos PO4	mg/l	0.95
	CaCO3	mg/l	22
	Magnesio	mg/l	0
	Amonio NH3	mg/l	0.085

Nota. Se muestran los parámetros físicos, microbiológicos y químicos del análisis calidad de agua realizada por el Laboratorio de Acuicultura de la Carrera de Ingeniería Agropecuaria IASA 1 (2021).

Aplicación de Riegos

Para el suministro de agua del cultivo de referencia se instaló un sistema de riego por aspersión, velocidad de diseño de $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, que consta de un filtro de grava de 20 pulgadas y un filtro de anilla de 2 pulgadas, tubería principal para aguas crudas de 40 mm y 5 laterales de riego con tubería de 25 mm, 5 válvulas manuales de $3 \frac{1}{4}$ de pulgada caudal de $4,8 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ para la apertura y cierre del caudal, cada lateral riego consta de 3 aspersores mini Wobbler boquilla dorada, presión de funcionamiento de 1.38 bares, caudal de $250 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$, diámetro de cobertura a una altura de 0.91m de 12.8m, el tiempo de riego diario fue de 3 horas, la frecuencia de riego fue diferente para cada postura debido a que los riego se aplicaron en función de la tensión observada en el tensiómetro manteniendo el cultivo en capacidad de campo, sin embargo se tuvo problemas con el suministro agua debidas a pérdidas de presión en el sistema, esto ya que no se cuenta con una toma de agua independiente para el invernadero

Datos agrometeorológicos diarios medidos en la Hcda. El Prado

Serie de datos agrometeorológicos diarios bajo invernadero en el periodo agosto-octubre

2021

A continuación, se presenta la información de variables climáticas recolectadas durante el periodo agosto-octubre 2021 con la estación agrometeorológica automática WS-2317 Weather Pro Center y el piranómetro CMP3 instalados al interior del invernadero y el promedio de las variables climáticas recolectadas con la estación MAE-56 desde 1998-2019 al exterior del invernadero. Los valores de E_p corresponden a la evaporación del tanque evaporímetro Clase A

Tabla 3*Serie de datos agrometeorológicos diarios bajo invernadero en el periodo agosto 2021*

Fecha	T_{Min}	T_{Max.}	T_{Med}	PDV	Ep	Rs	HR
	°C	°C	°C	Hpa	mm	MJ/m²/día	%
1	10,20	30,60	20,40	730,16	0,00	5,90	58,80
2	10,20	23,30	16,75	729,61	3,00	3,13	62,56
3	11,90	27,40	19,65	730,10	1,00	11,11	57,60
4	12,00	33,30	22,65	730,58	6,00	11,26	49,00
5	10,70	22,40	16,55	729,76	3,00	3,13	63,24
6	10,80	32,70	21,75	731,06	3,00	6,58	59,72
7	10,80	25,70	18,25	730,25	2,00	5,45	63,32
8	8,40	32,80	20,60	729,71	1,00	8,23	58,92
9	10,40	27,30	18,85	729,44	1,00	5,51	59,68
10	10,20	27,40	18,80	730,45	1,00	5,31	59,00
11	6,80	33,50	20,15	730,20	1,00	10,53	53,32
12	7,40	28,40	17,90	729,47	1,00	5,32	57,52
13	9,20	33,30	21,25	729,88	2,00	12,93	58,36
14	8,40	30,60	19,50	730,83	1,00	11,02	61,04
15	10,80	32,70	21,75	731,07	1,00	8,13	60,72
16	10,00	25,90	17,95	729,97	2,00	6,32	62,36
17	8,90	32,40	20,65	730,19	2,00	8,13	59,24
18	9,20	23,80	16,50	729,63	2,00	10,07	60,72
19	10,40	29,10	19,75	730,27	2,00	5,94	56,84
20	7,40	33,50	20,45	730,38	2,00	7,55	57,08
21	7,40	29,10	18,25	729,36	2,00	12,55	57,76
22	9,20	31,70	20,45	729,33	2,00	6,75	56,48
23	5,40	31,80	18,60	729,54	1,00	6,80	56,36
24	5,40	30,10	17,75	729,80	1,00	9,82	55,76

Fecha	<i>T</i>.Min	<i>T</i>.Max.	<i>T</i>.Med	PDV	Ep	Rs	HR
	°C	°C	°C	Hpa	mm	MJ/m²/día	%
25	10,60	29,40	20,00	729,32	1,00	4,01	63,32
26	9,20	34,50	21,85	729,89	1,00	11,06	58,56
27	8,30	30,10	19,20	730,27	1,00	9,21	58,00
28	8,40	30,60	19,50	729,94	1,00	9,03	58,12
29	8,30	29,10	18,70	729,62	2,00	6,23	59,40
30	8,90	28,40	18,65	729,88	1,00	3,77	62,40
31	9,20	31,70	20,45	729,82	1,00	8,05	58,56
Prom.	9,17	29,76	19,47	729,99	1,65	7,70	58,83
Máx.	12,00	34,50	22,65	731,07	6,00	12,93	63,32
Mín.	5,40	22,40	16,50	729,32	0,00	3,13	49,00

Nota. Los datos muestran el promedio diario de T_{Max} , T_{Min} , T_{Med} , PDV y %HR tomadas cada 30 minutos con la estación agrometeorológica automática WS-2317 Weather Pro Center, la Ep observada diariamente a las 17:00 y la Rs medida cada minuto con el piranómetro CMP3.

Tabla 4

Serie de datos agrometeorológicos diarios bajo invernadero en el periodo septiembre 2021

Fecha	<i>T</i>.Min	<i>T</i>.Max.	<i>T</i>.Med	PDV	Ep	Rs	HR
	°C	°C	°C	Hpa	mm	MJ/m²/día	%
1	9,10	34,40	21,75	730,34	1,00	7,40	52,88
2	9,20	30,60	19,90	730,11	3,00	7,17	54,36
3	9,10	32,90	21,00	730,46	2,00	7,43	53,92
4	8,30	31,70	20,00	729,40	2,00	7,17	53,84
5	9,30	25,90	17,60	729,26	1,00	7,51	57,44
6	8,50	19,70	14,10	729,34	1,00	7,51	72,72
7	8,50	32,80	20,65	730,48	1,00	7,61	58,84
8	8,50	30,60	19,55	730,75	1,00	7,57	62,88
9	8,10	32,80	20,45	730,23	2,00	7,38	56,32

Fecha	T.Min	T.Max.	T.Med	PDV	Ep	Rs	HR
	°C	°C	°C	Hpa	mm	MJ/m²/día	%
10	9,20	31,10	20,15	730,40	1,00	7,56	55,52
11	10,20	25,60	17,90	730,39	1,00	7,23	68,48
12	9,20	22,10	15,65	730,10	1,00	7,03	72,48
13	8,50	31,10	19,80	730,32	2,00	7,51	56,52
14	5,40	34,60	20,00	730,01	2,00	7,34	55,00
15	5,40	32,80	19,10	729,76	2,00	7,05	56,68
16	8,40	30,10	19,25	730,00	2,00	7,44	56,20
17	8,40	34,50	21,45	730,51	2,00	7,07	51,44
18	10,20	28,40	19,30	729,69	2,00	7,22	60,92
19	8,30	31,10	19,70	729,84	3,00	7,63	54,88
20	5,40	30,10	17,75	729,83	1,00	7,68	54,96
21	10,20	26,60	18,40	730,22	1,00	7,29	62,48
22	11,10	25,70	18,40	729,73	1,00	6,93	65,00
23	9,20	26,40	17,80	729,82	2,00	7,32	63,72
24	8,90	30,60	19,75	730,45	2,00	7,51	54,32
25	12,00	30,10	21,05	729,86	3,00	7,60	54,24
26	10,80	30,10	20,45	730,14	4,00	7,39	56,80
27	8,40	34,50	21,45	730,71	1,00	7,36	54,68
28	7,40	32,80	20,10	729,53	1,00	7,26	52,72
29	11,10	26,50	18,80	729,35	1,00	7,26	57,68
30	10,80	32,80	21,80	730,14	2,00	7,28	63,08
Prom	8,90	29,97	19,44	730,04	1,63	7,36	58,37
Max	12,00	34,60	21,80	730,75	4,00	7,68	72,72
Min	5,40	19,70	14,10	729,26	1,00	6,93	51,44

Nota. Los datos muestran el promedio diario de T_{Max} , T_{Min} , T_{Med} , PDV y $\%HR$ tomadas cada 30 minutos con la estación agrometeorológica automática WS-2317 Weather Pro Center, la Ep observada diariamente a las 17:00 y la Rs estimada mediante el modelo de Ångström.

Tabla 5

Serie de datos agrometeorológicos diarios bajo invernadero en el periodo octubre 2021

Fecha	T_{Min}	T_{Max}	T_{Med}	PDV	Ep	Rs	HR
	°C	°C	°C	Hpa	mm	MJ/m²/día	%
1	8,50	34,00	21,25	730,54	3,00	7,01	55,52
2	9,30	32,00	20,65	730,86	2,00	7,06	60,56
3	8,30	34,50	21,40	730,61	2,00	6,68	55,84
4	8,80	29,10	18,95	730,43	2,00	6,95	60,68
5	8,80	33,30	21,05	730,77	2,00	7,09	61,92
6	8,40	33,30	20,85	730,37	2,00	6,89	61,28
7	8,50	34,50	21,50	731,12	2,00	6,67	56,16
8	8,40	32,40	20,40	730,12	1,00	6,70	58,16
9	8,40	32,90	20,65	730,67	2,00	7,06	57,68
10	10,20	19,60	14,90	729,26	2,00	7,14	72,12
11	9,30	33,00	21,15	730,20	1,00	9,24	55,24
12	9,20	33,60	21,40	730,28	2,00	8,83	55,84
13	10,20	35,90	23,05	731,10	2,00	7,80	54,56
14	8,40	35,00	21,70	730,16	1,00	6,11	59,84
15	8,40	33,50	20,95	730,74	1,00	8,47	61,80
16	9,30	29,10	19,20	730,44	1,00	4,91	64,32
17	9,20	29,30	19,25	730,12	3,00	5,62	64,36
18	8,30	33,30	20,80	730,13	2,00	7,34	57,52
19	8,30	34,50	21,40	729,90	1,00	7,36	54,92
20	8,90	33,30	21,10	730,80	2,00	8,43	54,56
21	11,10	29,60	20,35	730,78	1,00	5,38	64,71
22	8,50	35,80	22,15	729,54	2,00	6,25	60,28
23	10,80	30,60	20,70	729,50	1,00	5,12	62,64
24	8,40	35,90	22,15	730,29	2,00	8,02	57,00

<i>Fecha</i>	<i>T.Min</i> °C	<i>T.Max.</i> °C	<i>T.Med</i> °C	<i>PDV</i> <i>Hpa</i>	<i>Ep</i> <i>mm</i>	<i>Rs</i> <i>MJ/m²/día</i>	<i>HR</i> <i>%</i>
25	10,20	32,70	21,45	730,90	2,00	5,65	59,52
26	10,60	30,90	20,75	730,34	2,00	5,30	61,72
27	8,40	36,90	22,65	730,30	2,00	7,52	54,76
28	9,20	35,80	22,50	730,55	1,00	8,24	52,48
29	9,20	33,50	21,35	729,48	1,00	5,78	56,12
30	8,30	33,50	20,90	730,96	2,00	8,19	55,84
31	10,80	27,80	19,30	730,40	1,00	4,12	63,64
Prom	9,12	32,55	20,83	730,38	1,71	6,87	59,08
Max	11,10	36,90	23,05	731,12	3,00	9,24	72,12
Mín	8,30	19,60	14,90	729,26	1,00	4,12	52,48

Nota. Los datos muestran el promedio diario de T_{Max} , T_{Min} , T_{Med} , PDV y $\%HR$ tomadas cada 30 minutos con la estación agrometeorológica automática WS-2317 Weather Pro Center, la Ep observada diariamente a las 17:00 y la Rs estimada mediante el modelo de Ångström hasta el 10 de octubre y los días posteriores se midió cada 30 minutos con la estación Ambient weather 2000.

Serie de datos agrometeorológico diarios multianual (1998-2019) de la estación MA-56

A continuación, se presenta la información agrometeorológica promedio diaria multianual (1998-2019) de la Hcda. El Prado para el periodo agosto-octubre.

Tabla 6

Variables climáticas tomadas al exterior del invernadero para el mes de agosto (1998-2019)

<i>Fecha</i>	<i>T.min</i> °C	<i>T.max</i> °C	<i>T. Med</i> °C	<i>Precipitación</i> <i>mm</i>	<i>Ep</i> <i>mm.día⁻¹</i>	<i>Heliofania horas</i> <i>luz/día</i>	<i>HR %</i>
1	6,58	21,21	13,90	0,26	2,95	4,37	63,32
2	6,76	21,28	14,02	0,63	3,02	4,54	62,77

<i>Fecha</i>	<i>T.min</i> °C	<i>T.max</i> °C	<i>T. Med</i> °C	<i>Precipitación</i> mm	<i>Ep</i> mm.dia ⁻¹	<i>Heliofania horas</i> luz/día	<i>HR %</i>
3	6,90	21,42	14,16	0,29	3,71	4,97	62,73
4	7,41	21,41	14,41	0,75	3,09	4,58	63,32
5	7,65	21,39	14,52	1,57	3,18	4,28	64,50
6	7,09	21,40	14,24	0,65	3,28	4,83	62,77
7	7,07	21,03	14,05	0,93	4,11	4,64	62,64
8	7,12	21,07	14,10	1,86	4,01	4,80	63,00
9	6,97	21,09	13,87	1,15	3,74	4,66	63,76
10	6,62	21,28	13,80	0,37	3,99	5,07	62,91
11	7,09	21,31	14,04	0,68	3,82	4,91	62,82
12	7,24	21,40	14,33	0,89	4,01	4,82	62,59
13	6,78	21,54	14,16	1,85	4,05	5,22	63,18
14	6,82	21,78	14,30	0,09	3,93	4,84	62,00
15	7,02	21,23	14,10	0,70	3,28	4,25	63,36
16	7,45	21,29	14,37	0,05	3,61	4,51	62,95
17	7,02	21,35	14,19	0,44	4,05	4,63	63,03
18	7,07	21,40	14,23	0,40	3,65	4,28	63,64
19	7,07	21,40	14,23	0,40	3,65	4,28	63,64
20	7,17	21,86	14,52	2,79	3,67	4,65	63,68
21	6,94	21,41	14,17	1,36	3,64	5,05	62,77
22	7,15	21,42	14,28	1,29	4,18	4,38	61,77
23	7,10	21,41	14,25	1,86	3,50	4,65	63,50
24	6,91	21,70	14,30	2,18	2,91	4,96	63,82
25	7,00	21,58	14,29	0,88	3,46	4,42	63,95
26	6,71	21,73	14,22	1,04	3,82	4,72	62,59
27	7,27	21,50	14,39	1,00	3,70	4,46	61,82
28	7,19	21,39	14,29	1,12	3,50	4,94	62,55
29	7,53	21,26	14,40	1,52	3,57	4,60	63,23
30	7,01	21,67	14,34	1,19	3,83	4,57	62,50

<i>Fecha</i>	<i>T.min</i> °C	<i>T.max</i> °C	<i>T. Med</i> °C	<i>Precipitación</i> mm	<i>Ep</i> mm.dia ⁻¹	<i>Heliofania horas</i> luz/día	<i>HR %</i>
31	7,01	21,72	14,37	1,71	3,86	4,68	62,64
Prom	7,05	21,43	14,22	1,08	3,63	4,66	63,04
Max	7,65	21,86	14,52	2,79	4,18	5,22	64,50
Min	6,58	21,03	13,80	0,05	2,91	4,08	61,77

Nota. Los datos se tomaron del registro de lecturas diarias en la estación MAE-56 durante el mes de agosto desde (1998-2019)

Tabla 7

Variables climáticas tomadas al exterior del invernadero para el mes de septiembre (1998-2019)

<i>Fecha</i>	<i>T.min</i> ° C	<i>T.max</i> ° C	<i>T. Med</i> °C	<i>Precipitación</i> mm	<i>Ep</i> mm.dia ⁻¹	<i>Heliofania</i> horas luz/día	<i>HR %</i>
1	7,72	20,20	13,96	0,77	2,89	3,96	64,41
2	7,95	20,71	14,33	1,22	3,01	3,63	64,60
3	8,05	20,15	14,10	0,56	3,48	3,96	65,85
4	8,00	20,29	14,15	2,01	3,20	3,61	66,30
5	7,69	20,60	14,15	1,57	3,55	4,06	65,96
6	8,01	20,73	14,37	0,97	3,62	4,05	64,66
7	7,79	20,23	14,01	0,15	3,32	4,18	66,29
8	8,20	20,38	14,29	0,58	3,87	4,11	66,00
9	7,45	20,44	13,95	0,37	3,67	3,86	65,78
10	7,44	20,75	14,09	0,50	4,33	4,08	65,64
11	7,66	20,99	14,32	1,93	2,97	3,64	66,55
12	7,85	20,86	14,35	1,04	2,90	3,36	66,60
13	7,65	20,75	14,20	1,40	3,12	4,00	65,91
14	8,38	20,44	14,41	2,41	2,63	3,77	63,60
15	7,45	20,46	13,95	1,78	2,30	3,38	65,10

<i>Fecha</i>	<i>T_{min}</i> °	<i>T_{max}</i> °	<i>T_{Med}</i>	<i>Precipitación</i>	<i>Ep</i>	<i>Heliofania</i>	
	<i>C</i>	<i>C</i>	<i>°C</i>	<i>mm</i>	<i>mm.dia⁻¹</i>	<i>horas</i>	<i>HR %</i>
						<i>luz/día</i>	
17	7,17	20,99	14,08	1,33	2,83	3,41	66,19
18	7,50	20,40	13,95	1,46	2,40	3,60	66,73
19	7,61	20,73	14,17	1,93	2,59	4,14	68,14
20	7,39	21,28	14,33	2,77	2,80	4,21	66,89
21	7,63	20,89	14,26	3,63	2,61	3,69	66,83
22	7,31	20,50	13,91	2,13	2,31	3,20	69,05
23	7,51	20,89	14,20	1,05	3,18	3,71	65,78
24	7,87	20,88	14,37	1,89	2,29	3,97	66,25
25	7,22	21,03	14,12	2,06	2,25	4,09	65,78
26	7,48	20,83	14,15	2,58	2,65	3,81	67,50
27	7,75	20,49	14,12	2,87	2,93	3,77	66,19
28	7,45	21,36	14,41	1,80	2,97	3,64	66,19
29	7,74	20,86	14,30	1,82	2,09	3,64	66,87
30	7,64	20,71	14,17	2,86	1,95	3,67	66,81
Pom	7,66	20,69	14,18	1,65	2,92	3,80	66,13
Max	8,38	21,36	14,41	3,63	4,33	4,21	69,05
Min	7,17	20,15	13,91	0,15	1,95	3,20	63,60

Nota. Los datos se tomaron del registro de lecturas diarias en la estación MAE-56 durante el mes de septiembre desde (1998-2019)

Tabla 8

Variables climáticas tomadas al exterior del invernadero para el mes de octubre (1998-2019)

<i>Fecha</i>	<i>T_{min}</i>	<i>T_{max}</i>	<i>T_{Med}</i>	<i>Precipitación</i>	<i>Ep</i>	<i>Heliofania horas</i>	<i>HR %</i>
	<i>°C</i>	<i>°C</i>	<i>°C</i>	<i>mm</i>	<i>mm.dia⁻¹</i>	<i>luz/día</i>	
1	7,86	20,81	14,34	4,31	1,32	3,32	68,26
2	7,51	21,14	14,33	3,18	1,77	3,38	67,55

Fecha	T_{min} °C	T_{max} °C	T_{Med} °C	Precipitación mm	Ep mm.dia ⁻¹	Heliofania horas luz/día	HR %
3	8,29	20,77	14,53	2,44	2,11	2,88	68,86
4	8,42	20,64	14,53	6,23	0,99	3,24	68,22
5	8,30	20,44	14,37	2,56	1,80	3,43	70,13
6	7,14	21,14	14,14	4,46	1,62	3,17	69,22
7	7,70	21,27	14,49	7,46	1,26	2,88	68,77
8	7,74	21,05	14,39	4,39	1,68	2,92	69,14
9	7,89	20,81	14,35	2,98	1,52	3,41	68,95
10	7,50	21,18	14,34	4,20	1,04	3,53	66,36
11	7,12	20,84	13,98	5,99	0,88	3,30	69,52
12	7,45	20,97	14,21	7,17	0,63	3,06	68,32
13	8,15	20,75	14,45	5,63	0,79	2,80	69,66
15	7,15	21,52	14,34	3,06	1,44	3,20	68,34
16	7,96	20,89	14,42	3,93	1,69	3,17	68,80
17	7,97	20,30	14,13	1,91	2,00	2,91	69,32
18	7,93	20,41	14,17	5,20	1,23	2,80	68,70
19	7,63	21,25	14,44	4,52	1,44	3,24	68,55
20	7,90	20,70	14,30	3,01	2,39	3,43	67,84
21	8,30	20,87	14,58	3,56	1,95	3,63	68,81
22	8,39	20,29	14,34	5,20	0,87	2,64	69,04
23	7,76	20,50	14,13	4,14	1,51	2,52	69,70
24	7,52	21,17	14,35	5,88	1,32	2,91	69,23
25	7,99	21,27	14,63	4,59	1,46	3,16	69,14
26	7,63	20,81	14,22	4,82	1,72	3,05	68,77
27	7,73	20,36	14,05	6,64	1,75	3,39	69,16
28	7,45	21,36	14,41	1,80	2,97	3,64	66,19
29	7,83	21,15	14,49	6,73	1,07	3,24	70,20
30	7,60	20,76	14,18	6,88	1,29	3,31	68,30
31	7,60	20,50	14,05	7,44	1,62	3,44	69,61

<i>Fecha</i>	<i>T_{min}</i> °C	<i>T_{max}</i> °C	<i>T_{Med}</i> °C	<i>Precipitación</i> mm	<i>Ep</i> mm.dia ⁻¹	<i>Heliofania horas</i> luz/día	<i>HR %</i>
Prom	7,76	20,88	14,32	4,61	1,50	3,16	68,68
Max	8,42	21,52	14,63	7,46	2,97	3,64	70,20
Min	7,12	20,29	13,98	1,80	0,63	2,52	66,19

Nota. Los datos se tomaron de lecturas del registro diarias en la estación MAE-56 durante el mes de octubre desde (1998-2019)

Los datos de T_{med} observados al interior del invernadero presentaron una diferencia de 6,94°C en relación con las T_{med} observadas a campo abierto, para el periodo agosto-octubre desde el año 1998 al 2019 obtenidos con la estación MAE-56, lo que indica que la T_{med} al interior del invernadero fue un 48,73% superior a la T_{med} registrada campo abierto. Estos resultados indican una mayor ganancia energética debida a las características de ambiente interno que produce el invernadero. La R_s al interior del invernadero presentó valores 71,02% más bajos en relación a los medidos a campo abierto siendo una diferencia numérica de 17,91 $Mj \cdot m^{-2} \cdot T_{evap}$. Clase A presentó una diferencia del 38,34% entre las medidas a campo abierto y bajo invernadero, representando numéricamente un valor de 1,01 mm. Estos valores coinciden con los reportados por (Butrón, 2017) donde menciona que la temperatura bajo invernadero fue superior en un 41,4% a la temperatura a cielo abierto y la radiación solar al interior del invernadero fue un 37,6% más baja que a campo abierto.

ETo diaria estimada y medida con MD y MI bajo invernadero en el periodo agosto-octubre del 2021

Con las variables climáticas medidas, se procedió a realizar el cálculo de la ETo diaria bajo invernadero con cada MI

Tabla 9*ETo (mm/día) estimada y medida con MD y MI bajo invernadero en el periodo agosto del 2021*

<i>fecha</i>	<i>T_{evap.} Clase A</i>	<i>PM- FAO 56</i>	<i>PT</i>	<i>HS</i>	<i>L_{sD}</i>
3	3,00	0,73	1,09	1,46	0,28
4	1,00	2,15	5,51	5,62	0,28
5	3,00	0,72	1,09	1,45	0,28
6	3,00	1,44	3,24	3,51	0,28
7	2,00	1,12	2,31	2,65	0,28
8	1,00	1,69	4,05	4,27	0,28
9	1,00	1,18	2,42	2,72	2,54
10	1,00	1,16	2,32	2,62	1,50
11	1,00	2,12	5,39	5,39	1,50
12	1,00	1,15	2,28	2,56	1,50
13	2,00	2,53	6,78	6,82	1,50
14	1,00	2,10	5,35	5,55	1,05
15	1,00	1,69	4,09	4,34	1,05
16	2,00	1,26	2,73	3,05	1,05
17	2,00	1,68	4,00	4,22	1,05
18	2,00	1,82	4,45	4,66	1,05
19	2,00	1,31	2,75	3,01	1,05
20	2,00	1,59	3,69	3,90	1,05
21	2,00	2,32	6,02	6,11	1,05
22	2,00	1,47	3,26	3,48	1,05
23	1,00	1,42	3,11	3,34	1,05
24	1,00	1,88	4,59	4,71	1,05
25	1,00	0,92	1,67	2,05	1,05
26	1,00	2,23	5,82	5,92	1,05
27	1,00	1,82	4,42	4,60	0,99
28	1,00	1,80	4,36	4,55	0,99

<i>fecha</i>	<i>T_{evap.} Clase A</i>	<i>PM- FAO 56</i>	<i>PT</i>	<i>HS</i>	<i>L_sD</i>
29	2,00	1,30	2,78	3,07	4,04
30	1,00	0,87	1,49	1,85	4,04
31	1,00	1,66	3,94	4,15	4,04
Prom	1,55	1,56	3,62	3,85	1,31
Máx	3,00	2,53	6,78	6,82	4,04
Mín	1,00	0,72	1,09	1,45	0,28

Nota. Los valores que se muestran son el promedio diario de la *ETo* estimada y medida bajo

invernadero con los *MD* y *MI* para el mes de agosto 2021

Tabla 10

ETo (mm/día) estimada y medida con MD y MI bajo invernadero en el periodo septiembre del 2021

<i>fecha</i>	<i>T_{evap.} Clase A</i>	<i>PM- FAO 56</i>	<i>PT</i>	<i>HS</i>	<i>L_sD</i>
1	1,00	1,55	3,47	3,95	4,04
2	3,00	1,44	3,13	3,65	1,99
3	2,00	1,52	3,38	3,89	1,99
4	2,00	1,45	3,15	3,66	1,99
5	1,00	1,39	3,04	3,59	1,99
6	1,00	1,14	2,58	3,23	1,99
7	1,00	1,48	3,36	3,95	1,99
8	1,00	1,40	3,17	3,81	1,99
9	2,00	1,47	3,26	3,81	1,99
10	1,00	1,49	3,33	3,87	1,99
11	1,00	1,24	2,79	3,48	2,99
12	1,00	1,11	2,50	3,17	2,99
13	2,00	1,46	3,26	3,81	2,99
14	2,00	1,46	3,22	3,74	2,99
15	2,00	1,37	2,97	3,51	2,99
16	2,00	1,44	3,18	3,72	2,99

<i>fecha</i>	<i>T_{evap.} Clase A</i>	<i>PM- FAO 56</i>	<i>PT</i>	<i>HS</i>	<i>L_{sD}</i>
17	2,00	1,50	3,28	3,75	3,59
18	2,00	1,36	3,01	3,62	3,59
19	3,00	1,50	3,34	3,86	3,59
20	1,00	1,44	3,17	3,69	3,59
21	1,00	1,33	2,94	3,56	3,59
22	1,00	1,25	2,74	3,39	4,16
23	2,00	1,30	2,89	3,52	4,16
24	2,00	1,49	3,29	3,81	4,16
25	3,00	1,54	3,47	3,99	4,16
26	2,00	1,46	3,26	3,81	3,59
27	2,00	1,51	3,38	3,90	3,59
28	1,00	1,48	3,22	3,71	3,59
29	1,00	1,39	3,03	3,59	3,59
30	2,00	1,41	3,23	3,89	3,59
Prom	1,67	1,41	3,13	3,70	3,08
Máx	3,00	1,55	3,47	3,99	4,16
Mín	1,00	1,11	2,50	3,17	1,99

Nota. Los valores que se muestran son el promedio diario de la *ETo* estimada y medida bajo

invernadero con los *MD* y *MI* , para el mes de septiembre 2021

Tabla 11

ETo (mm/día) estimada y medida con MD y MI bajo invernadero en el periodo octubre del 2021

<i>fecha</i>	<i>T_{evap.} Clase A</i>	<i>PM- FAO 56</i>	<i>PT</i>	<i>HS</i>	<i>L_{sD}</i>
1	3,00	1,29	3,16	3,70	2,80
2	2,00	1,25	3,05	3,66	2,80
3	2,00	1,29	3,00	3,53	2,80
4	2,00	1,22	2,85	3,45	2,80
5	2,00	1,25	3,08	3,72	2,80
6	2,00	1,25	2,98	3,60	2,80

<i>fecha</i>	<i>T_{evap.} Clase A</i>	<i>PM- FAO 56</i>	<i>PT</i>	<i>HS</i>	<i>L_{sD}</i>
7	2,00	1,29	3,00	3,54	2,80
8	1,00	1,26	2,89	3,45	1,75
9	2,00	1,27	3,10	3,66	1,75
10	2,00	1,12	2,50	3,15	1,75
11	1,00	1,29	4,32	4,86	1,75
12	2,00	1,29	4,12	4,67	1,75
13	2,00	1,33	3,79	4,30	1,75
14	1,00	1,27	2,67	3,26	1,75
15	1,00	1,25	3,77	4,43	1,75
16	1,00	1,21	1,87	2,45	1,75
17	3,00	1,21	2,20	2,81	3,59
18	2,00	1,27	3,26	3,82	3,59
19	1,00	1,30	3,37	3,89	3,59
20	2,00	1,30	3,90	4,43	3,59
21	1,00	1,22	2,15	2,77	3,59
22	2,00	1,28	2,77	3,37	3,59
23	1,00	1,24	2,07	2,66	3,59
24	2,00	1,30	3,76	4,33	3,59
25	2,00	1,27	2,42	2,99	3,59
26	2,00	1,24	2,17	2,76	2,56
27	2,00	1,32	3,59	4,10	2,56
28	1,00	1,34	4,01	4,49	2,56
29	1,00	1,29	2,52	3,06	2,56
30	2,00	1,28	3,73	4,28	2,56
31	1,00	1,21	1,50	2,06	2,56
Prom	1,71	1,26	3,02	3,59	2,68
Máx	3,00	1,34	4,32	4,86	3,59
Mín	1,00	1,12	1,50	2,06	1,75

Nota. Los valores que se muestran son el promedio diario de la *ETo* estimada y medida bajo

invernadero con los *MD* y *MI*, para el mes de octubre 2021

Tabla 12

Resumen del promedio diario por mes de la ETo bajo invernadero determinada con MI y MD

Mes	$T_{evap.}$ Clase A	L_sD	PM-FAO 56	Hs	PT
Agosto	1,60	1,27	1,57	3,88	3,64
Septiembre	1,63	3,08	1,41	3,7	3,12
Octubre	1,71	2,68	1,37	3,58	3,00
Promedio	1,65	2,34	1,45	3,72	3,25

Nota. Los valores que se muestran son el promedio mensual de *ETo* diaria bajo invernadero estimada y medida con *MD* y *MI* durante el periodo agosto-octubre 2021.

***ETo* decadiaria estimada y medida con *MD* y *MI* bajo invernadero en el periodo agosto-octubre del 2021**

Tabla 13

ETo (mm/década) estimada y medida con MD y MI bajo invernadero en el periodo agosto-octubre del 2021

fecha	$T_{evap.}$ Clase A	PM- FAO 56	PT	HS	BC	L_sD
1	2,10	1,38	3,02	3,30	3,86	0,72
2	1,60	1,72	4,13	4,34	3,90	1,18
3	1,27	1,61	3,76	3,98	3,85	1,85
4	1,50	1,43	3,17	3,74	3,88	2,20
5	1,80	1,39	3,06	3,64	3,75	3,23
6	1,60	1,42	3,14	3,72	3,95	3,82
7	2,00	1,25	2,95	3,55	4,04	2,49
8	1,60	1,27	3,30	3,88	4,25	2,42
9	1,55	1,27	2,76	3,34	4,33	3,03
Prom	1,67	1,41	3,25	3,72	3,98	2,33
Max	2,10	1,72	4,13	4,34	4,33	3,82

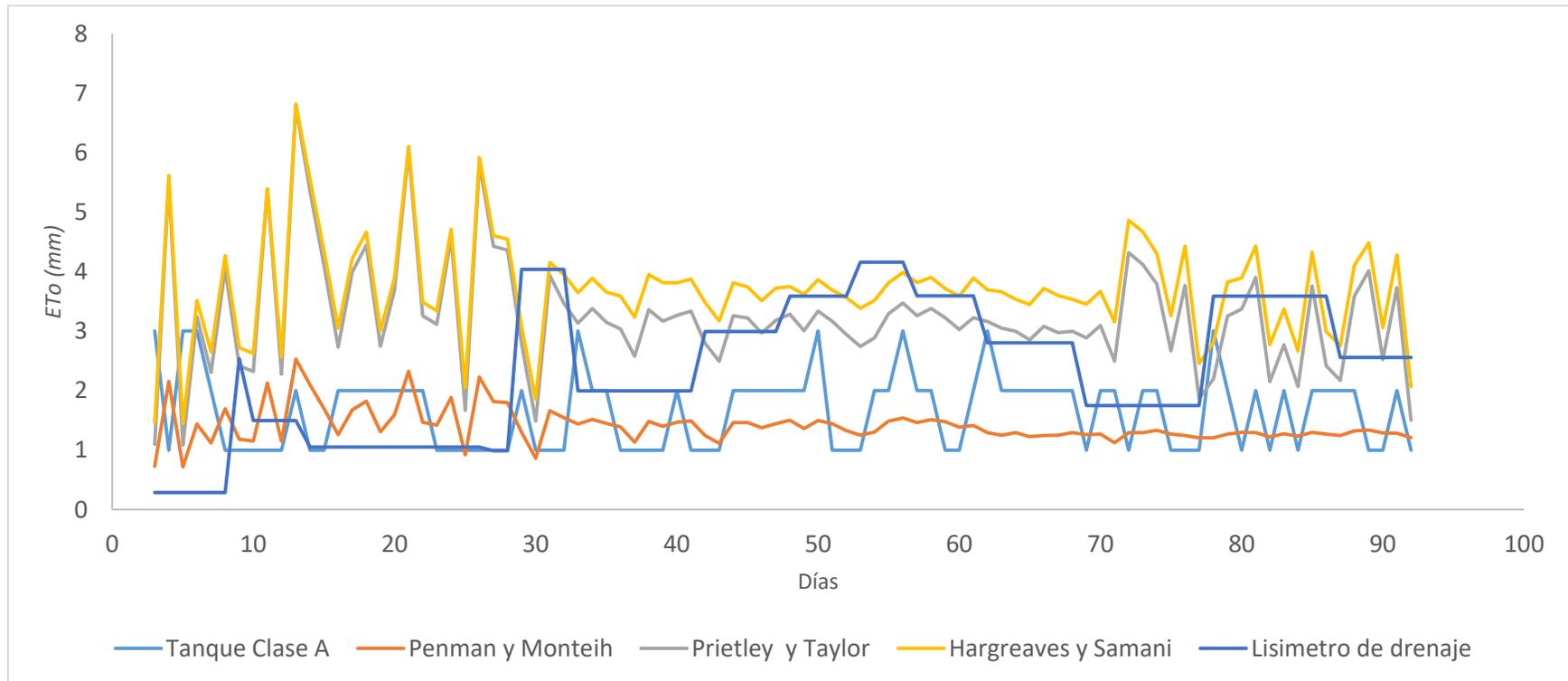
<i>fecha</i>	<i>T_{evap.}</i>	<i>Clase A</i>	<i>PM- FAO 56</i>	<i>PT</i>	<i>HS</i>	<i>BC</i>	<i>L_sD</i>
Mín		1,27	1,25	2,76	3,30	3,75	0,72

Nota. Los valores que se muestran son el promedio decenario de la *ETo* diaria con *MD* y *MI* durante el periodo agosto-octubre 2021.

La *ETo* promedio diaria bajo invernadero medida con el *MD* del *L_sD* para todo el periodo de evaluación fue de $2,34 \text{ mm. día}^{-1}$, estos datos se muestran similares a los reportados en el estudio realizado por (Villafañe, Basso, & Villafañe, 2016) donde la *ETo* diaria observada con el método de *L_sD* durante 20 de agosto hasta el 17 de octubre en 2014 fue de $2,57 \text{ mm. día}^{-1}$. Para el *MI* de *PM-FAO 56* fue de $1,45 \text{ mm. día}^{-1}$, valor similar al reportados por (Butrón, 2017) cuyo promedio diario para el periodo de febrero a junio fue de $1,65 \text{ mm. día}^{-1}$. Para el método de *HS* el promedio de *ETo* diario fue $3,72 \text{ mm. día}^{-1}$ y para *PT* el promedio *ETo* diario fue $3,25 \text{ mm. día}^{-1}$. En las Figura 19 y Figura 20, se muestra el comportamiento de la *ETo* diaria bajo invernadero estimada y medida con *MD* y *MI* para periodos diarios y decenarios, durante los meses de agosto-octubre 2021.

Figura 19

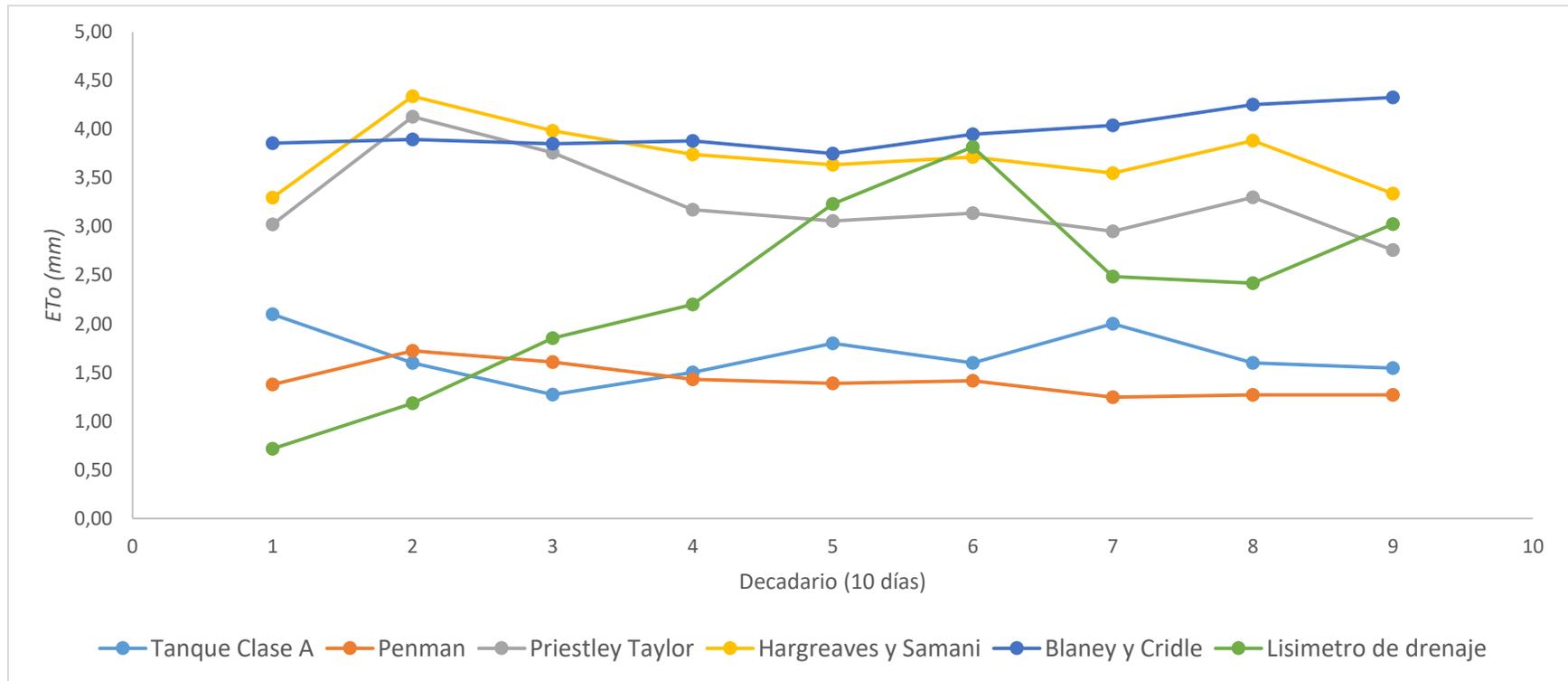
ETo diaria bajo invernadero estimada y medida con MD y MI durante periodo agosto- octubre 2021



Nota. La gráfica muestra los datos diarios de *ETo* bajo invernadero estimada y medida con *MD* y *MI*

Figura 20

ETo decadaria bajo invernadero estimada y medidas con MD y MI durante el periodo agosto- octubre 2021



Nota. La gráfica muestra los datos decadarios de *ETo* bajo invernadero estimados y medidos con *MD* y *MI*

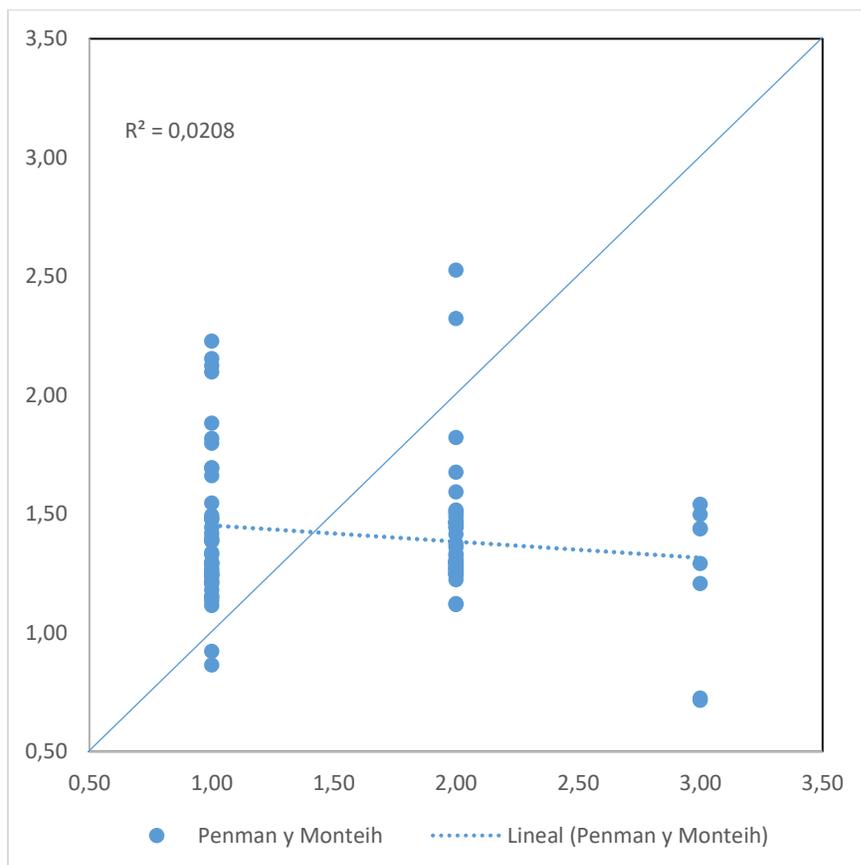
En las Figuras 19 y 20 se puede observar que los datos de ET_o diaria y decadal estimadas bajo invernadero con el método de *PM-FAO 56* obtuvo valores muy cercanos a los de valores ET_o diaria y decadal bajo invernadero obtenidos con el uso del $T_{evap. Clase A}$, mientras que los métodos de *PT*, *HS* y *BC* obtuvieron valores ET_o diaria y decadal bajo invernadero que sobre estiman a los valores ET_o diaria y decadal bajo invernadero obtenidos con el uso del $T_{evap. Clase A}$, que coincide con los resultados publicados por (Trezza R. , 2008), (Sangucho, 2018) (Vega & Jara, 2009). Los valores de ET_o diarios y decadales medidos bajo invernadero por el L_sD a pesar de ser cercanos a los valores de ET_o diarios y decadales obtenidos con el $T_{evap. Clase A}$, gráficamente no simulan la curva del $T_{evap. Clase A}$, esto puede deberse a la ausencia de drenaje obtenido en esos periodos.

Criterios de evaluación

A continuación, se presentan las gráficas de correlación y el resultado de los criterios de evaluación para los datos de ET_o diaria bajo invernadero durante el periodo agosto-octubre 2021.

Figura 21

Correlación de valores estimados y medidos de la ETo diaria bajo invernadero estimada con el MI de PM-FAO 56 y la ETo diaria bajo invernadero medida con el tanque T_{evap} . Clase A

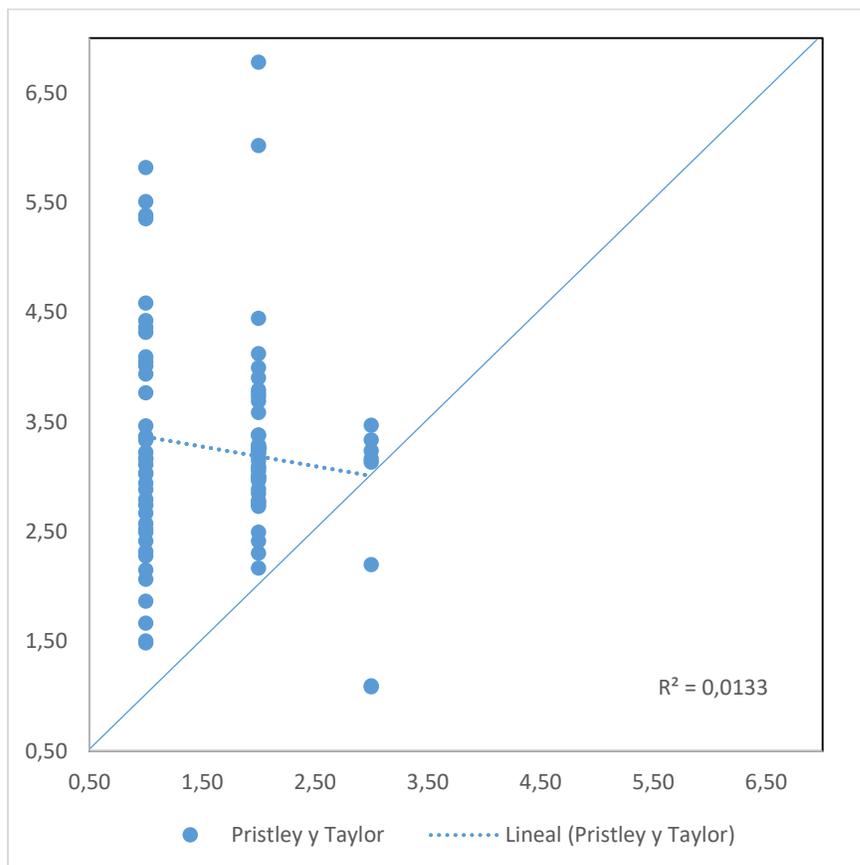


Nota. Valores en el eje X corresponden a ETo diaria bajo invernadero medidos con del T_{evap} .

Clase A y los valores en el eje Y corresponden a valores ETo diaria bajo invernadero estimados con MI de PM-FAO 56.

Figura 22

Correlación de valores estimados y medidos de la ETo diaria bajo invernadero estimada con el MI de PT y la ETo diaria bajo invernadero medida con el tanque T_{evap} . Clase A



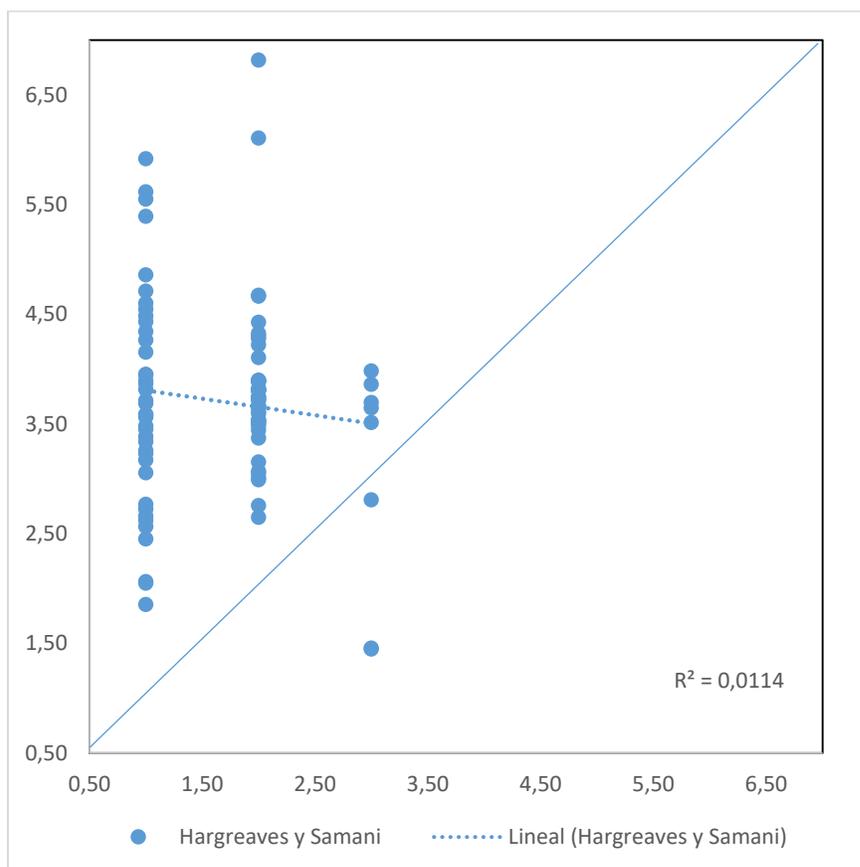
Nota. Valores en el eje X corresponden a ETo diaria bajo invernadero medidos con del T_{evap} .

Clase A y los valores en el eje Y corresponden a valores ETo diaria bajo invernadero estimados

con MI de PT

Figura 23

Correlación de valores estimados y medidos de la ETo diaria bajo invernadero estimada con el MI de HS y la ETo diaria bajo invernadero medida con el tanque T_{evap} . Clase A

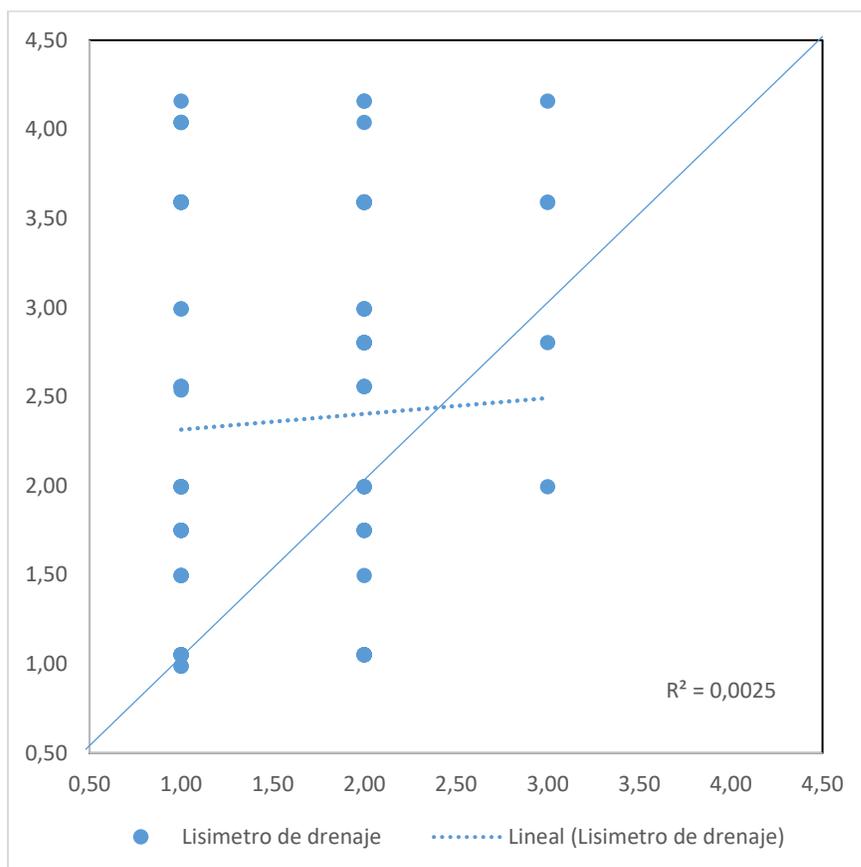


Nota. Valores en el eje X corresponden a ETo diaria bajo invernadero medidos con del T_{evap} .

Clase A y los valores en el eje Y corresponden a valores ETo diaria bajo invernadero estimados con MI de HS

Figura 24

Correlación de valores estimados y medidos de la ET_o diaria bajo invernadero estimada con el MI de L_sD y la ET_o diaria bajo invernadero medida con el tanque T_{evap} . Clase A



Nota. Valores en el eje X corresponden a ET_o diaria bajo invernadero medidos con del T_{evap} .

Clase A y los valores en el eje Y corresponden a valores ET_o diaria bajo invernadero estimados con MI de L_sD

De acuerdo a las Figuras 21, 22, 23 y 24 los resultados de las estimaciones de cada modelo indican que el modelo con mayor precisión en la estimación de la ET_o diaria bajo invernadero es el MI de *PM-FAO 56*, seguido por el tanque L_sD . Los datos de los MI Priestley y Taylor y *HS* sobre estiman los valores de ET_o

Tabla 14

Criterios para análisis diario de ETo estimada y medida bajo invernadero con MI y MD.

MÉTODO	CRITERIO DIARIO		
	MAE	RMSE	R^2
PM- FAO 56	0,65	0,78	0,02
HS	2,14	2,37	0,01
PT	1,71	2,03	0,01
L_sD	1,19	1,47	0,0025

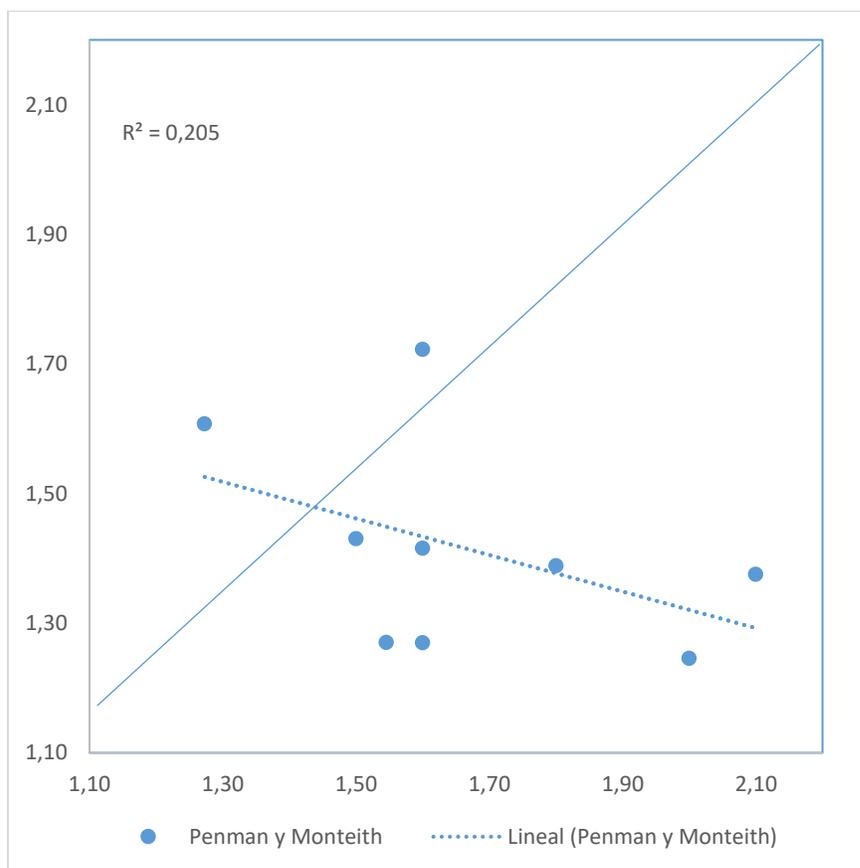
Nota. Estadísticos obtenidos de la validación de valores estimados y medidos de *ETo* diaria bajo invernadero frente a las mediciones de *ETo* diaria bajo invernadero obtenidas con T_{evap} . Clase A

De acuerdo a los criterios de MAE, RMSE y R^2 , se observa que el modelo que mejor simula la *ETo* diaria bajo invernadero es el método de *PM-FAO 56*. Luego de *PM-FAO 56* el modelo con mayor precisión en la estimación de la *ETo* diaria bajo invernadero es el método de L_sD , sin embargo bajo el criterio de R^2 , el *MD* de L_sD no se ajusta a los datos obtenidos con el T_{evap} . Clase A; el tercer modelo con mejor ajuste fue el *MI PT* y por último el *MI* de *HS*.

A continuación, se presentan las gráficas de correlación y el resultado de los criterios de evaluación para los datos de *ETo* diarios obtenidos de un promedio decadal bajo invernadero durante el periodo agosto-octubre 2021

Figura 25

Correlación de valores estimados y medidos de la ET_o decadaria bajo invernadero estimada con el MI de PM-FAO 56 y la ET_o decadaria bajo invernadero medida con el MD T_{evap} . Clase A

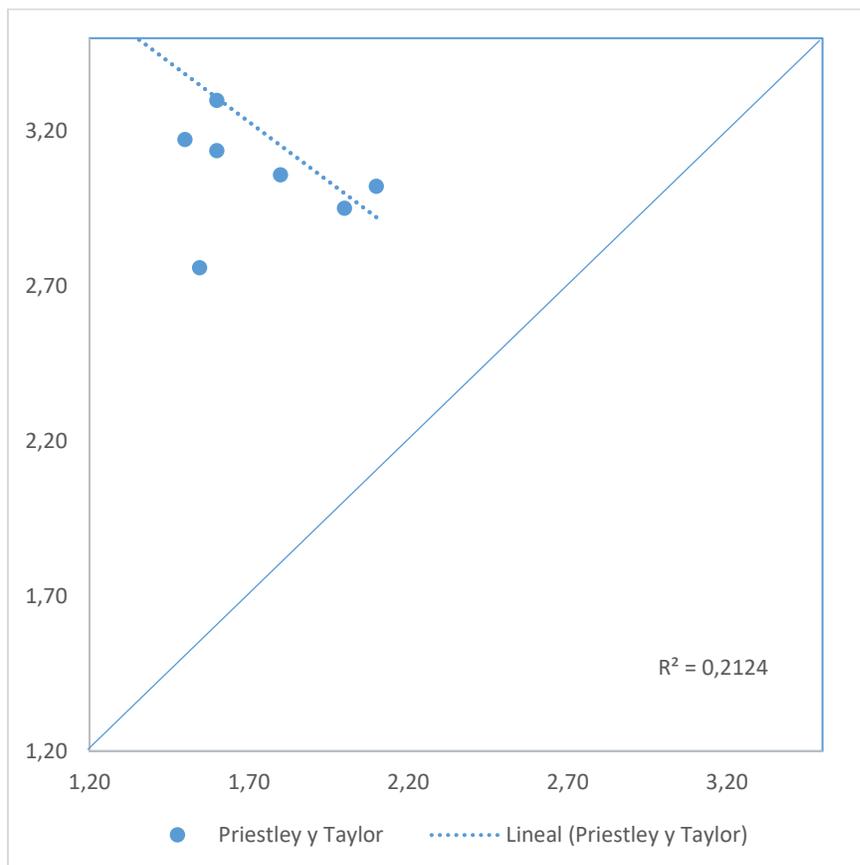


Nota. Valores en el eje X corresponden a ET_o decadaria bajo invernadero medidos con del T_{evap} .

Clase A y los valores en el eje Y corresponden a valores ET_o decadaria bajo invernadero estimados con MI de PM-FAO 56

Figura 26

Correlación de valores estimados y medidos de la ETo decadaria bajo invernadero estimada con el MI de PT y la ETo decadaria bajo invernadero medida con el MD T_{evap} . Clase A

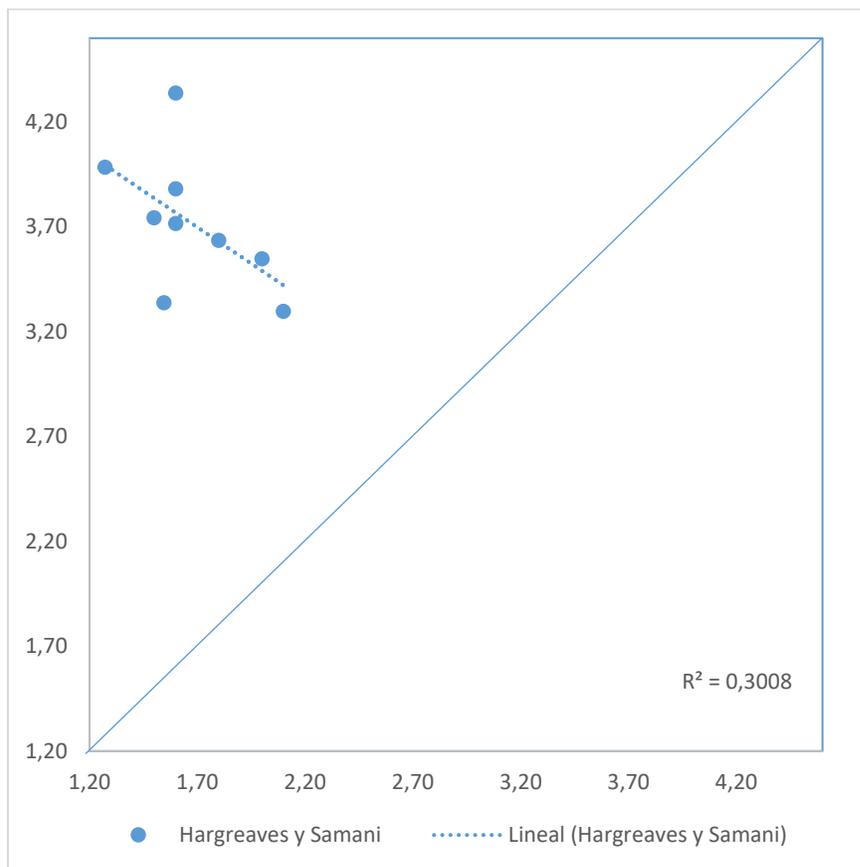


Nota. Valores en el eje X corresponden a ETo decadaria bajo invernadero medidos con del T_{evap} .

Clase A y los valores en el eje Y corresponden a valores ETo decadaria bajo invernadero estimados con MI de PT

Figura 27

Correlación de valores estimados y medidos de la ETo decadaria bajo invernadero estimada con el MI de HS y la ETo decadaria bajo invernadero medida con el MD T_{evap} . Clase A



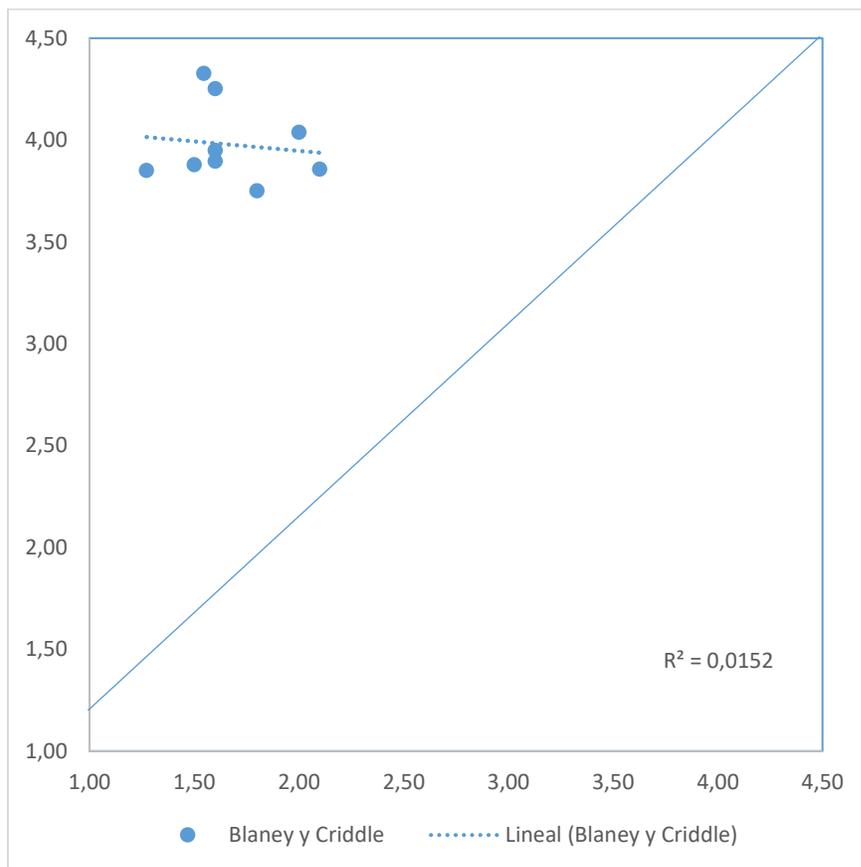
Nota. Valores en el eje X corresponden a ETo decadaria bajo invernadero medidos con del T_{evap} .

Clase A y los valores en el eje Y corresponden a valores ETo decadaria bajo invernadero

estimados con MI de HS

Figura 28

Correlación de valores estimados y medidos de la ETo decadaria bajo invernadero estimada con el MI de BC y la ETo decadaria bajo invernadero medida con el MD T_{evap} . Clase A

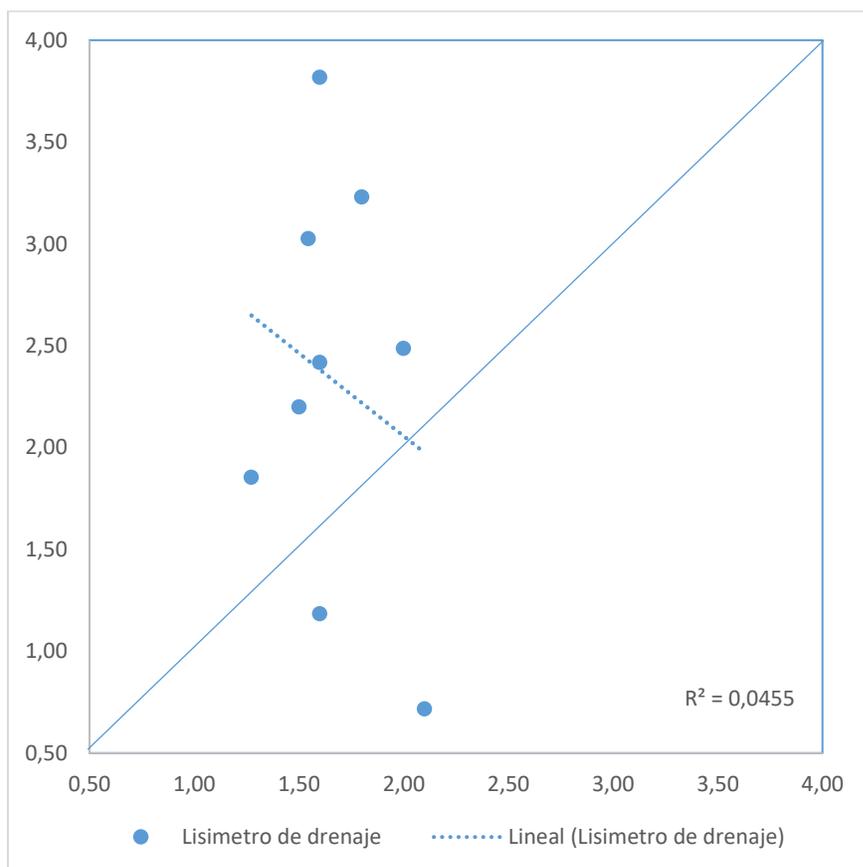


Nota. Valores en el eje X corresponden a ETo decadaria bajo invernadero medidos con del T_{evap} .

Clase A y los valores en el eje Y corresponden a valores ETo decadaria bajo invernadero estimados con MI de BC

Figura 29

Correlación de valores estimados y medidos de la ETo decadaria bajo invernadero estimada con el MI de L_sD y la ETo decadaria bajo invernadero medida con el MD T_{evap}. Clase A



Nota. Valores en el eje X corresponden a ETo decadaria bajo invernadero medidos con del T_{evap}.

Clase A y los valores en el eje Y corresponden a valores ETo decadaria bajo invernadero estimados con MI de L_sD

De acuerdo a las Figuras 25, 26, 27, 28 y 29 los resultados de las estimaciones de cada MD y MI indican que el modelo con mayor precisión en la estimación de la ETo decadaria bajo invernadero es el modelo de PM-FAO 56, seguido por el tanque L_sD. Los datos de los MI PT, HS y BC sobre estiman los valores de ETo

Tabla 15

Criterios para análisis decenario de ETo bajo invernadero en el periodo agosto-octubre 2021

MÉTODO	CRITERIO DECENARIO		
	MAE	RMSE	R^2
PM- FAO 56	0,36	0,42	0,21
HS	2,05	2,11	0,30
PT	1,59	1,68	0,21
L_sD	1,06	1,20	0,0455
BC	2,31	2,33	0,02

Nota. Nota. Estadísticos obtenidos de la validación de valores estimados y medidos de ETo

decenario bajo invernadero frente a las mediciones de ETo decaria bajo invernadero obtenidas

con T_{evap} . Clase A

En el análisis decenario bajo los criterios de MAE y RMSE el modelo mejor simula ETo decaria bajo invernadero es PM-FAO 56, sin embargo, bajo el criterio de R^2 el modelo con mayor precisión en la estimación de ETo bajo invernadero es HS seguido por PM-FAO 56 y PT

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

La ET_o promedio diaria obtenida bajo invernadero con el T_{evap} . Clase A durante el periodo agosto-octubre fue de $1,65\text{mm. día}^{-1}$, mientras que con el MD de L_sD se determinó una ET_o promedio diaria bajo invernadero de $2,34\text{mm. día}^{-1}$. Para los MI la ET_o promedio diaria bajo invernadero se estimó en los siguientes valores de $1,45\text{mm. día}^{-1}$ (PM-FAO 56), $3,45\text{mm. día}^{-1}$ (HS) $3,25\text{mm. día}^{-1}$ (PT) y $3,98\text{mm. día}^{-1}$ (BC).

Una vez obtenidos valores de ET_o diaria bajo invernadero conseguida con MD y MI para el periodo agosto-octubre del 2021, estos valores se compararon mediante los criterios de MAE, RMSE y R^2 siendo el MI de PM-FAO 56 el modelo que mejor simula la evapotranspiración del T_{evap} . Clase A ($MAE=0,65$, $RMSE= 0,78$, $R^2 = 0,02$), luego le sigue el MD de L_sD ($MAE=1,19$, $RMSE= 1,47$, $R^2 = 0,0025$), seguido por MI PT ($MAE=1,71$, $RMSE= 2,03$, $R^2 = 0,01$) y por último el MI HS ($MAE=2,14$, $RMSE= 2,37$, $R^2 = 0,01$).

En función de las correlaciones entre valores estimados y medidos de $ET_{o\text{diaria Inv}}$ se concluye que el MI PM-FAO 56 sobre estima y sub estima los valores de $ET_{o\text{diaria Inv}}$ medidas con el MD T_{evap} . Clase A, al igual que el MD L_sD ; mientras que los MI PT y HS sobre estiman los valores de $ET_{o\text{diaria Inv}}$ medidas con el MD T_{evap} . Clase A

Una vez obtenida la ET_o decadal con MD y MI para el periodo agosto-octubre del 2021 se compararon mediante los criterios de MAE, RMSE y R^2 siendo el MI de PM-FAO 56 el modelo que mejor simula la evapotranspiración del T_{evap} . Clase A ($MAE=0,36$, $RMSE= 0,42$, $R^2 = 0,21$), seguido por el MD de L_sD ($MAE=1,06$, $RMSE= 1,20$, $R^2 = 0,0455$), seguido por MI PT

($MAE=1,59$, $RMSE= 1,68$, $R^2 = 0,21$), luego le sigue el *MI HS* ($MAE=2,05$, $RMSE= 2,11$, $R^2 = 0,30$) siendo el modelo que presentó mejor ajuste en función del criterio R^2 y, finalmente el *MI BC* presentó los siguientes valores ($MAE=2,31$), ($RMSE= 2,33$), ($R^2 = 0,02$).

En función de las correlaciones entre valores estimados y medidos de *ETo* decadaria bajo invernadero se concluye que el *MI PM-FAO 56* y sobre estima y sub estima los valores de *ETo* decadaria bajo invernadero medidas con el *MD T_{evap} . Clase A*, al igual que el *MD L_sD* , mientras que los *MI PT*, *HS* y *BC* sobre estiman los valores de *ETo* decadaria bajo invernadero medidas con el *MD T_{evap} . Clase A*

El *MI* seleccionado para la determinación de *ETo_{diaria Inv}* en la Hcda el Prado corresponde al *MI PM-FAO 56* con un valor promedio de *ETo* diaria de $1,45 \text{ mm. día}^{-1}$ este método es el que mejor aproxima la *ETo_{diaria Inv}* en relación a la *ETo_{diaria Inv}* medida con el *T_{evap} . Clase A* cuyo valor corresponde a $1,65 \text{ mm. día}^{-1}$

En el caso que no se disponga de mediciones climáticas el *MD L_sD* , para estimar promete ser una buena opción a la hora de determinar la *ETo_{diaria Inv}*.

Recomendaciones

En el presente estudio el coeficiente *Kp* del *T_{evap} . Clase A* utilizado para el cálculo de *ETo_{diaria Inv}* se la obtuvo teóricamente con base en recomendaciones propuestas por la FAO, bajo este criterio se recomienda determinar el coeficiente *Kp* del *T_{evap} . Clase A* para las condiciones climáticas y ubicación del *T_{evap} . Clase* dentro del invernadero; así como también se debe considerar características constructivas como espesor y tipo de recubrimiento del *T_{evap} . Clase A*.

Durante la etapa de riego en este estudio se verificó pérdidas de presión y cortes de agua, por lo cual las frecuencias de riego se vieron alteradas, bajo esta consideración se recomienda tener una dotación de agua continua dentro del invernadero que permita satisfacer de manera oportuna los requerimientos de riego del cultivo. Para el sitio en estudio debido a las altas precipitaciones, se recomienda el almacenamiento del agua lluvia a través tanques o reservorios.

Debido a la extensa cantidad de variables climáticas requeridas para el modelo de *PM-FAO 56*, este involucra la adquisición de varios equipos para la recolección de información climática y varios de estos muy costosos, bajo estas consideraciones se recomienda el uso del método de *L_sD*.

Debido a que la recolección de las variables climáticas al interior del invernadero involucra una actividad diaria y continua de vital importancia, se recomienda la adquisición de una estación agrometeorológica automatizada que permita disponer de la información del clima al interior del invernadero en tiempo real y que evite la pérdida de datos.

Se recomienda determinar la curva de descarga del aspersor mini Wobbler boquilla dorada instalada al interior del invernadero, y de esta manera llegar a obtener la pluviometría real en campo entregada por el aspersor en el rango de presiones de funcionamiento recomendadas por el fabricante. La pluviometría del aspersor es un dato muy importante al momento de determinar la *ET_o* diaria bajo invernadero mediante el uso del tanque *L_sD*

Bibliografía

- Acuña, M. (2020). *Calibración de las fórmulas empíricas de evapotranspiración de referencia, respecto a la evaporación del tanque A, en la estación de Purhuay-Huari, periodo 2014-2018*. [Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo],
http://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/4225/T033_70298128_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO Riego y drenaje 56,
<https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>.
- Álvarez, P. (2019). *Determinación del coeficiente de cultivo (Kc) del pimiento (Capsicum annum L.) en función a la evapotranspiración real en comparación con el Kc teórico*. [Universidad Técnica Estatal de Quevedo],
<https://repositorio.uteq.edu.ec/bitstream/43000/3679/1/T-UTEQ-0170.pdf>.
- Álvaro García, O. (2012). *Criterios modernos para evaluación de la calidad*. IAH 7
<https://es.scribd.com/document/356302460/Criterios-Modernos-Para-Evaluacion-de-La-Calidad-El-Agua-Para-Riego>.
- Antón, A., Montero, J., & Muñoz, P. (2002). Necesidades de agua del cultivo de tomate en invernadero. Comparación con el cultivo al aire libre. *Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaria IRTA*, 369-374. Obtenido de http://aeclim.org/wp-content/uploads/2016/02/0038_PU-SA-III-2002-A_ANTON.pdf
- Arce, M., & Pozo, w. (2015). Variabilidad de la producción lechera del agrosistema IASA, según las categorías de intensidad de lluvias de Trojer. *Boletín Técnico IASA*, 12, 10. ,
<https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revista-serie-zoologica/article/view/1462>.

- Arévalo, J., Vélez, J., & Camacho, J. (2013). Uso eficiente del agua para el cultivo de rosa cv. Freedom bajo invernadero. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(8), 811-817. doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000800002>
- Baeza, R., Alonso, F., & Contreras, J. (2010). Cálculo de la evapotranspiración en cultivo de tomate en invernadero. Utilización de series climáticas históricas vs. a tiempo real. *Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica IFAPA*, 1-4. Obtenido de <http://sech.info/ACTAS/Acta%20nº%2071.%20XIV%20Congreso%20Nacional%20de%20Ciencias%20Hortícolas/Horticultura%20I/Cálculo%20de%20la%20evapotraspiración%20en%20cultivo%20de%20tomate%20en%20invernadero.%20Utilización%20de%20series%20climáticas%20históric>
- Blanco, R. (1999). El infiltrómetro de cilindro simple como método de cálculo de la conductividad hidráulica de los suelos. Experiencias de campo en ámbitos de montaña mediterránea. *Baetica Estudios de Arte, Geografía e Historia*, 21(1), 9-33. Obtenido de <https://www.revistas.uma.es/index.php/baetica/article/view/480/428>
- Butrón, C. (2017). *Calibración de la ecuación FAO Penman-Monteith para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o) en condiciones de invernadero en el centro experimental de cota cota*. La Paz- Bolivia: <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/15245>.
- Cabello, J. (2015). *Determinación del coeficiente de cultivo kc para frejol phaseolus vulgaris bajo invernadero en la granja Santa Inés*. [Universidad Técnica de Machala]., <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/3022/2/2.pdf>.

- Cabrera, J. (2017). Calibración de Modelos Hidrológicos. *IMEFEN*, 1-7. Obtenido de http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf
- Calvache, M. (2002). Manejo del agua: principios fundamentales. *Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*, 1-28. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/303691521_MANEJO_DEL_AGUA_PRINCIPIOS_FUNDAMENTALES
- Calvache, M. (2013). *Riego Andino Tecnificado*. Quito, Ecuador: Editorial Universitaria Universidad Central del Ecuador. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Angel-Calvache-Ulloa/publication/337484474_RIEGO_ANDINO_TECNIFICADO_PARA_FERTIRRIEGO/links/5ddb307d92851c1fedaf59e9/RIEGO-ANDINO-TECNIFICADO-PARA-FERTIRRIEGO.pdf
- Casanova, M., Castillo, H., & Cañete, A. (2004). Uso de evaporímetros Andersson en invernadero : Chile Central. *Revista de Recursos Naturales de Chile*, 5. Obtenido de <http://bibliotecadigital.ciren.cl//handle/123456789/29121>
- Casanova, M., Messing, I., Joel, A., & Cañete, A. (2009). Methods to estimate lettuce evapotranspiration in greenhouse conditions in the central zone of Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 69(1), 60-70. Obtenido de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/chiljar/v69n1/at08.pdf>
- Cevallos, V. (2015). *Rendimiento de biomasa de dos variedades de rye grass a tres fuentes defósforo en la zona Cayambe, provincia de Pichincha*. [Universidad Técnica de Babahoyo]., <http://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/1064/T-UTB-FACIAG-AGR%02000216.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

- de Santa, F., & Valero, J. (1993). *Agronomía del riego*. Ediciones Mundi-Prensa. Obtenido de https://books.google.com.ec/books/about/Agronomía_del_riego.html?id=_cWTAAACAAJ&redir_esc=y
- de Souza, S. (2016). *Estimación de la evapotranspiración de referencia en invernaderos mediterráneos*. [Universidad de Almería], http://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/6091/11286_TFM_de%20Souza.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Defilipis, C., Pariani, S., Jimenez, A., & Bouzo, C. (2006). Respuesta al riego de lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivada en invernadero. *Researchgate*, 1-7. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/228910447_Respuesta_al_riego_de_lechuga_Lactuca_sativa_L_cultivada_en_invernadero
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements*. FAO irrigation and drainage paper 24, <https://www.fao.org/3/f2430e/f2430e.pdf>.
- Durán, F. (2013). *Sistemas de riego* (Vol. 1). Grupo Latino Editores. Obtenido de https://www.profitecnicas.com/libro/sistemas-de-riego_68018
- FAO 56. (1990). *Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO Riego y drenaje paper 56, <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>. Obtenido de <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>.
- Fernández, R., & Junta de Andalucía. (2010). *Manual de riego para agricultores. Modulo 3. Riego por aspersión*. Sevilla: Consejería de Agricultura y Pesca. Obtenido de

https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/1337160240Riego_por_aspersi.pdf

Flores, J., Ojeda, W., López, I., Rojano, A., & Salazar, I. (2007). Requerimientos de riego para tomate de invernadero. *Terra Latinoamericana*, 25(2), 127-134. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/573/57325204.pdf>

Fuentes, J., & Cruz, J. (1990). *Curso elemental de riego*. España: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

García, A. (2012). *International Plant Nutrition Institute IPNI*. Obtenido de Criterios modernos para la evaluación de la calidad de agua para riego.: [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/6E4999FFE5F6B8F005257A920059B3B6/\\$FILE/Art%205.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/6E4999FFE5F6B8F005257A920059B3B6/$FILE/Art%205.pdf)

García, E. (2016). *Relación de evapotranspiración de cultivo de referencia en el cultivo de tomate (Solanum lycopersicum) bajo condiciones de invernadero*. [Centro de Investigación en Química Aplicada], <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/105/1/Tesis%20MAP%20Eliud%20Abdiel%20Garcia%20Solis%20Mar%2008%202016.pdf>.

García, J. (2011). *Las curvas de retención de humedad y su estimación mediante funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de Artemisa y Mayabeque*. [Universidad Agraria de La Habana], http://repositorio.geotech.cu/jspui/bitstream/1234/3473/3/curvas%20de%20retención%20de%20humedad%20y%20su%20estimación%20mediante%20pedotransferencia_p.1-61.pdf.

- García, M., Puppo, L., Hayashi, R., & Morales, P. (2017). *Metodología para determinar los parámetros hídricos de un suelo a campo*. Obtenido de Fagro:
<http://www.fagro.edu.uy/~hidrologia/riego/Metodologia%20para%20determinar%20los%20parametros%20hidricos%20de%20un%20suelo%20a%20campo.pdf>
- González, G., Chávez, E., González, J., Dzul, A., Sánchez, I., & Potisek, M. (2012). Comparación de métodos para determinar la evapotranspiración y oportunidad de riego en nogal pecanero. *Terra Latinoamericana*, 30(1), 29-38. Obtenido de
<http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v30n1/2395-8030-tl-30-01-00029.pdf>
- Google Earth. (2021). *Mapa satelital Invernadero de IASA (Carrera Agropecuaria Universidad de las Fuerzas Armadas*. Quito: <https://earth.google.com/web/>.
- Guzmán, O., Baldión, J., Simbaqueva, F., Zapata, H., & Chacón, C. (2013). Coeficientes para estimar la radiación solar global a partir del brillo solar en la zona cafetera colombiana. *Cenicafé*, 64(1): 60-76 <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=radiacion+angstrom#>.
- Hadi, H., & Farah, A. (2019). Determining Reference Evapotranspiration in Greenhouses from External Climate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(9), 1-12.
doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001404](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001404)
- Hernández, R. (2009). *Estimación de la evapotranspiración de cultivo y requerimientos hídricos del tomate (Solamun lycopersicum Mill. Cv. El cid) en invernadero*. [Instituto Politécnico Nacional].,
<https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/8587/106.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

- Jara, J. (2005). . *Estimación diaria de la evapotranspiración estándar de referencia: Modelos de Penman Monteith, Priestley-Taylor y Hargreaves y Samani*. [Universidad de Concepción].
- Jara, J. (2016). *Estimación de la radiación solar incidente diaria*. Concepción: Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería Agrícola. Departamento de Recursos hídricos <http://repositorio.udec.cl/handle/11594/3724>.
- Jaramillo, A. (2006). Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. *Cenicafé*, 57(4), 288-298. Obtenido de <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc057%2804%29288-298.pdf>
- Khan, L., Gil, J., & Acosta, R. (1998). Diseño y funcionamiento de un lisímetro hidráulico para medición de la evapotranspiración potencial. *Bioagro*, 10(1), 11-17. Obtenido de [http://www.ucla.edu.ve/bioagro/REV10\(1\)/2.%20Diseño%20y%20funcionamiento.pdf](http://www.ucla.edu.ve/bioagro/REV10(1)/2.%20Diseño%20y%20funcionamiento.pdf)
- Lazo, C. (2006). *Tecnología para el riego*. Obtenido de Concytec.
- León, J. (2018). Determinación de requerimientos hídricos en el cultivo de lechuga (lactuca sativa) var: Winterhaven en base al tanque de evaporación tipo y fórmulas empíricas (FAO) en Macají, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo. [*Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*]. <https://1library.co/document/z1dlx5ez-determinacion-requerimientos-hidricos-winterhaven-evaporacion-formulas-empiricas-chimborazo.html>.
- Licto, S. (2017). *Estudio de la biofortificación foliar con diferentes fuentes de zinc en Rye grass perenne (Lolium perenne) variedad amazon*. [Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE], <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/14410/1/T-IASA%20I-005369.pdf>.

- López, R., Arteaga, R., Vázquez, M., López, I., & Sánchez, I. (2009). Producción de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) basado en láminas de riego y acolchado plástico. *Revista Chapingo*, 15(1), 83-89. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2009000100012
- Mariño, Y. (2006). *Evaluación del punto de marchitez permanente bajo condiciones de invernadero como variable para la asignación de clones de gmelina arborea (roxb) a sitios potenciales de plantación*. [Pontificia Universidad Javeriana], <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8947/tesis93.pdf?sequen>.
- Mejía Granda, D. A. (2014). *Efecto de la rehabilitación y manejo de suelos endurecidos con el uso de plantas germinadas, en la productividad y sobrevivencia de Gypsophila, (Gypsophila paniculata L.) variedad over time*. Santo Domingo- Ecuador: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/8030>.
- Ortiz, R. (2008). *Hidroponía en el suelo*. Cámara Ecuatoriana del Libro - Núcleo de Pichincha. Obtenido de <https://isbn.cloud/9789942018564/hidroponia-en-el-suelo/>
- Ortiz, R., & Chile, M. (2020). Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco. *Siembra*, 7(1), 70-79. doi:<https://doi.org/10.29166/siembra.v7i1.1450>
- Rivano, F., & Jara, J. (2005). Estimación de la Evapotranspiración de Referencia en la Localidad de Remehue-Osorno, X Región. *Agro Sur*, 33(2), 49-61. doi:<https://doi.org/10.4206/agrosur.2005.v33n2-05>

- Sáez, M. (2016). *Determinación de la evapotranspiración mediante imágenes aéreas en bandas del espectro visible e infrarrojo cercano para cultivos de papa solanum spp.* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]., <https://docplayer.es/79820486-Escuela-superior-politecnica-de-chimborazo.html>.
- Sánchez, J. (1999). Uso consuntivo del cultivo de aguacate: metodología Blaney y Criddle modificada relacionando fenología y precipitación. *Revista Chapingo serie horticultura*, 5(1), 201-207. Obtenido de https://www.avocadosource.com/WAC4/WAC4_p201.pdf
- Sangucho, J. (2018). Cálculo de la evapotranspiración a partir de información agrometeorológica de la estación MA-56. [Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/bitstream/21000/14305/1/T-IASA%20I-005439.pdf>.
- Santana, L. (2008). *Evapotranspiración penman-monteith*. Obtenido de Agro Cabildo: <https://www.agrocabildo.org/publica/analisisclimatico/evapotrans2008.pdf>
- Santiago, S., Arteaga, R., Sangerman, D., Cervantes, R., & Navarro, A. (2012). Evapotranspiración de referencia estimada con Fao-Penman-Monteith, Priestley-Taylor, Hargreaves y RNA*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(8), 1535-1549. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v3n8/v3n8a5.pdf>
- Treviño, E. (2004). *Estimación de la evapotranspiración real en cultivos horticolas bajo condiciones de invernadero*. [Centro de Investigación en Química Aplicada]., <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/366/1/Eduardo%20Alfonso%20Treviño%20Lopez.pdf>.

Trezza, R. (2008). Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela.

¿Cuál método utilizar? *Bioagro*,

http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612008000200002.

Trezza, R. (2008). Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela.

¿Cuál método utilizar? *Revista Bioagro*, 20(2), 89-95. Obtenido de

http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612008000200002

Valdés, H., Ortega, S., & Argote, M. (2009). Evaluación del consumo de agua de un cultivo de

tomate en invernadero usando el método de Priestley-Taylor. *Universidad de Talca*,

Facultad de Ciencias Agrarias, 1-20. Obtenido de

https://oes.chileanjar.cl/files/V69_I1_2009_ESP_HectorValdes-Gomez.pdf

Vega, E. C., & Jara, J. C. (2009). Estimación de la evapotranspiración de referencia para dos

zonas (costa y región andina) del Ecuador. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v.29, n.3, p.390-403,

jul./set. 2009. Obtenido a partir de

<https://www.scielo.br/j/eagri/a/hMRcCrDNV96RV6H8BtDvtyF/?lang=es>.

Vega, E., & Jara, J. (2009). Estimación de la evapotranspiración de referencia para dos zonas (

costa y región andina) del Ecuador. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, 29(3), 390-403. Obtenido de

<https://www.scielo.br/j/eagri/a/hMRcCrDNV96RV6H8BtDvtyF/?lang=es>

Villafañe, G., Basso, C., & Villafañe, R. (2016). Evapotranspiración y coeficiente de cultivo (Kc) de

estevia *stevia rebaudiana* (Bertoni) Bertoni bajo condiciones parcialmente protegidas.

Bioagro, 28(2): 131-136. 2016. Obtenido a partir de

[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi1zluW69X1AhVisDEKHfM6CZcQFnoECCsQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.redalyc.org%2Fpdf%2F857%2F85745749008.pdf&usg=AOvVaw2FFvYYLcaMf_)

[8&ved=2ahUKEwi1zluW69X1AhVisDEKHfM6CZcQFnoECCsQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.redalyc.org%2Fpdf%2F857%2F85745749008.pdf&usg=AOvVaw2FFvYYLcaMf_](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi1zluW69X1AhVisDEKHfM6CZcQFnoECCsQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.redalyc.org%2Fpdf%2F857%2F85745749008.pdf&usg=AOvVaw2FFvYYLcaMf_)

[www.redalyc.org%2Fpdf%2F857%2F85745749008.pdf&usg=AOvVaw2FFvYYLcaMf_](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi1zluW69X1AhVisDEKHfM6CZcQFnoECCsQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.redalyc.org%2Fpdf%2F857%2F85745749008.pdf&usg=AOvVaw2FFvYYLcaMf_)

Yanangómez, L. (2018). *Evaluación del requerimiento hídrico del cultivo de maíz morado (Zea mays l.) en la parroquia Malacatos sector "San José"*. [Universidad Nacional de Loja]., <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/21176/1/LUIS%20VICENTE%20YANANGOMEZ%20AN.pdf>

https://drive.google.com/drive/folders/1LGjPFS_fCUM1ia4k-1I5f09c4QBlqzw?usp=sharing