

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Comparación de modelos alternativos para la estimación de
evapotranspiración de referencia en la estación meteorológica
de INIA - Ayacucho - 2022

Tesis para optar el título profesional de:
Ingeniero Agrícola

Presentado por:
Bach. Yonatan Ayala Prado

Asesor:
Ing.. Efraín Chuchón Prado

Ayacucho - Perú
2024

DEDICATORIA

Con todo mi genuino amor, al que forjó mi camino, a mi padre celestial, al que nunca se aparta de mi lado y me levanta del suelo cuando caigo, y al que hizo a mis padres y a todas las personas que

Muchos de mis logros se los debo a mi madre Saturnina Prado Gómez y a mis hermanos por ayudarme en convertirme en la persona que soy hoy. Me dieron cierta libertad y ciertos límites, pero, al fin y al cabo, nunca dejaron de inspirarme para alcanzar mis metas.

Al regalo más grande que Dios me supo entregar, Ian Thiago Abdiel Ayala Gutiérrez, la persona más importante de mi vida la que me dio más fuerza y motivos para luchar y salir adelante.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, en particular a la escuela de Ingeniería Agrícola que me introdujo en este ámbito, le estoy profundamente agradecido por las oportunidades sin igual que me ha ofrecido y por permitirme formar parte de sus clases magistrales.

A los profesores en general de la destacada Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, que me guiaron y compartieron sus saberes y valores, durante mi proceso de aprendizaje profesional.

Gracias a mi familia, ustedes son lo más maravilloso y sagrado que los he tenido en mi vida, por ser siempre los principales motivadores y formadores de lo que ahora soy como persona, sin ustedes no hubiera logrado las metas que me propuse, gracias Mamá, hermanos, hermanas, los amo bastante.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
LISTA DE ACRÓNIMOS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS	xv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xvii
RESUMEN.....	18
INTRODUCCIÓN	19
CAPÍTULO I.....	25
MARCO TEÓRICO.....	25
1.1. Antecedentes.....	25
1.1.1 Antecedente a nivel mundial.....	25
1.1.2 Antecedente a nivel nacional, regional y local.....	26
1.2 Evaporación (E)	29
1.3 Transpiración (T)	30
1.4 Evapotranspiración (ET)	30
1.5 Factores que afecta la evapotranspiración.....	32
1.5.1 Variables climáticas	32
1.5.2 Factores de cultivo	32
1.5.3 Manejo y condiciones ambientales	33
1.6 Definición de evapotranspiración	33
1.6.1 Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o)	33
1.6.2 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET _c).....	35
1.6.3 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET _{c aj})	35

1.7 Factores meteorológicos que determinan la evapotranspiración	36
1.7.1 Radiación solar.....	36
1.7.2 Temperatura del aire	37
1.7.3 Humedad relativa	37
1.7.4 Velocidad del viento	37
1.8 Determinación de la evapotranspiración.....	38
1.8.1 Método directo del tanque evaporímetro	39
1.8.1.1 Tanque evaporímetro	39
1.8.1.2 Descripción del tanque clase A.....	39
1.8.1.3 Coeficiente del tanque evaporímetro (Kp).....	41
1.8.2 Métodos indirectos para determinar ETo.....	42
1.8.2.1 Ecuación de Penman-Monteith	43
1.8.2.2 Método FAO Penman-Monteith	43
1.8.2.3 Método Hargreaves en base a la radiación solar.....	45
1.8.2.4 Método Hargreaves en base a la temperatura	45
1.8.2.5 Obtención de la radiación solar incidente (Rs)	46
1.8.2.6 Método Jensen – Haise.....	46
1.8.2.7 Método Makkink.....	47
1.8.2.8 Método de Turc.....	47
1.9 Métodos estadísticos para comparación de resultados.....	50
CAPÍTULO II	51
METODOLOGÍA	51
2.1 Ubicación y características generales de la zona	51
2.1.1 Ubicación política	51
2.1.2 Ubicación geográfica	51
2.1.3 Descripción climática del ámbito del estudio	51
2.2 Materiales, equipos y herramientas.....	53
2.2.1 Materiales.....	53
2.2.1.1 Información meteorológica.....	53
2.2.2 Equipos y programas de cómputo.....	53

2.2.2.1 Materiales de escritorio	53
2.3 Problema específico	54
2.3.1 Técnicas e instrumentos de recojo de datos	54
2.3.2 Técnicas de procesamiento y análisis de la información	57
2.3.3 Metodología de estimación de la evapotranspiración tanque evaporímetro	57
2.3.4 Metodología de estimación de la evapotranspiración por FAO Penman Monteith	58
2.3.5 Metodología de estimación de la evapotranspiración por Hargreaves en base a la radiación solar	61
2.3.6 Metodología de estimación de la evapotranspiración por Hargreaves en base a la temperatura.....	61
2.3.7 Metodología de estimación de la evapotranspiración por Jensen – Haise	63
2.3.8 Metodología de estimación de la evapotranspiración por Makkink	64
2.3.9 Metodología de estimación de la evapotranspiración por Turc	65
2.3.10 Métodos estadísticos de comparación de resultados	67
CAPÍTULO III	70
RESULTADOS Y DISCUSIONES	70
3.1 Estimación de evapotranspiración de referencia por método directo	70
3.1.1 Estimación de evapotranspiración por el método de tanque evaporímetro clase A	70
3.2 Estimación de evapotranspiración de referencia por modelos indirectos seleccionados	72
3.2.1 Estimación de evapotranspiración de referencia de los modelos con el software PETP V2.0.0	72
3.2.1.1 Estimación de evapotranspiración referencial método FAO Penman Monteith	72
3.2.1.2 Estimación de evapotranspiración referencial método Hargreaves en base a la radiación solar	73

3.2.1.3 Estimación de evapotranspiración referencial método Hargreaves en base a la temperatura.....	75
3.2.1.4 Estimación de evapotranspiración referencial método Jensen – Haise.....	76
3.2.1.5 Estimación de evapotranspiración referencial método Makkink.....	77
3.2.1.6 Estimación de evapotranspiración referencial método Turc.....	78
3.3 Comparación de modelos del año 2013 a 2021	80
3.4 Análisis estadística de evapotranspiración de referencia del método tanque evaporímetro clase A con métodos empíricos	88
CONCLUSIONES	95
RECOMENDACIONES	96
REFERENCIA - BIBLIOGRÁFICA.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 ETo promedio para diversas regiones agroclimáticas se expresa en milímetros por día mm día^{-1}	34
Tabla 2 Valores referenciales de zona alto andina del Perú	35
Tabla 3 Parámetros requeridos para calcular evapotranspiración de referencia.....	48
Tabla 4 Fórmulas y unidad de medida de evapotranspiración de referencia de diferentes métodos	49
Tabla 5 Parámetros estadísticos empleados para contrastar los métodos de ETo ..	50
Tabla 6 Se emplearon indicadores estadísticos para contrastar y evaluar los distintos métodos.....	68
Tabla 7 Valores de interpretación de índice de confiabilidad	69
Tabla 8 Evapotranspiración de referencia mensual con el método de taque evaporímetro 2013	71
Tabla 9 Evapotranspiración de referencia del año 2013-2014 de tanque evaporímetro	71
Tabla 10 Evapotranspiración de referencia mensual método FAO Penman Monteith-2013	72
Tabla 11 Evapotranspiración de referencia FAO Penman Monteith del año 2013-2021	73
Tabla 12 Evapotranspiración de referencia mensual método Hargreaves en base a la radiación solar-2013	74
Tabla 13 Evapotranspiración de referencia Hargreaves en base a la radiación solar del año 2013-2021	74
Tabla 14 Evapotranspiración de referencia mensual método Hargreaves en base a la temperatura -2013	75
Tabla 15 Evapotranspiración de referencia Hargreaves en base a temperatura del año 2013-2021	75
Tabla 16 Evapotranspiración de referencia mensual método Jensen – Haise -2013	76
Tabla 17 Evapotranspiración de referencia Jensen-Haise del año 2013-2021	77
Tabla 18 Evapotranspiración de referencia mensual método Makink -2013	77
Tabla 19 Evapotranspiración de referencia Makink del año 2013-2021	78

Tabla 20 Evapotranspiración de referencia mensual método Turc -2013	79
Tabla 21 Evapotranspiración de referencia Turc del año 2013-2021	79
Tabla 22 Indicadores estadísticos de ajuste.	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama gráfico de estoma.....	30
Figura 2 Durante el ciclo de desarrollo de un cultivo anual, se distribuye la pérdida de agua en evaporación y transpiración.....	32
Figura 3 Variables que influyen en la evapotranspiración de referencia.....	33
Figura 4 Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET _o), en situaciones normales (ET _c)y bajo condiciones no usuales(ET _c aj)	36
Figura 5 El impacto de la velocidad del viento en la evapotranspiración se contrasta entre atmósferas secas y calurosas, y atmósferas húmedas y templadas.	38
Figura 6 Representación gráfica de tanque clase A.....	41
Figura 7 Se presentan dos escenarios de ubicación del tanque evaporímetro y su entorno	42
Figura 8 Metodología para calcular evapotranspiración de referencia y realizar comparación.....	56
Figura 9 Diagrama de flujo evapotranspiración de referencia tanque evaporímetro	58
Figura 10 Diagrama de flujo evapotranspiración FAO Penman Monteith.....	60
Figura 11 Diagrama de flujo evapotranspiración Hargreaves en base a la radiación solar.....	61
Figura 12 Diagrama de flujo evapotranspiración Hargreaves en base a la temperatura	63
Figura 13 Diagrama de flujo evapotranspiración Jensen – Haise.....	64
Figura 14 Diagrama de flujo evapotranspiración Makkink.....	65
Figura 15 Diagrama de flujo evapotranspiración Turc.....	67
Figura 16 Comparación gráfica de ET _o con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Penman Monteith del año 2013-2021	81
Figura 17 Comparación gráfica de ET _o con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Hargreaves en función a radiación solar del año 2013-2021	81

Figura 18	Comparación gráfica de ETo con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Hargreaves en función a la temperatura del año 2013-2021	82
Figura 19	Comparación gráfica de ETo con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Jensen – Haise del año 2013-2021	82
Figura 20	Comparación gráfica de ETo con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Makkink del año 2013-2021	83
Figura 21	Comparación gráfica de ETo con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Turc del año 2013-2021	83
Figura 22	Comparación gráfica de ETo con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Penman Monteith del año 2013-2014,2016-2018.....	84
Figura 23	Comparación gráfica de ETo con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Hargreaves en función a radiación solar del año 2013-2014, 2016-2018	85
Figura 24	Comparación gráfica de ETo con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Hargreaves en función a temperatura del año 2013-2014,2016-2018	85
Figura 25	Comparación gráfica de ETo con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Jensen – Haise del año 2013-2014, 2016-2018.....	86
Figura 26	Comparación gráfica de ETo con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Makkink del año 2013-2014, 2016-2018	86
Figura 27	Comparación gráfica de ETo con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Turc del año 2013-2014, 2016-2018.....	87
Figura 28	Comparación gráfica de ETo con modelos empíricos Penman Monteith, Hargreaves en función a radiación solar, Hargreaves en función temperatura, Jensen – Haisen, Makkink y Turc con evapotranspiración de tanque evaporímetro clase A.....	87
Figura 29	Comparación de regresión lineal de Tanque evaporímetro clase A con Penman Monteith.....	88
Figura 30	Comparación de regresión lineal de Tanque evaporímetro clase A con Hargreaves en base a la radiación solar	89

Figura 31	Comparación de regresión lineal de Tanque evaporímetro clase A con Hargreaves en base a la temperatura.....	89
Figura 32	Comparación de regresión lineal de Tanque evaporímetro clase A con Jensen – Haise.....	90
Figura 33	Comparación de regresión lineal de Tanque evaporímetro clase A con Makink.....	90
Figura 34	Comparación de regresión lineal de Tanque evaporímetro clase A con Turc.....	91

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A Matriz de consistencia.....	101
ANEXO B Tablas para la estimación de la evapotranspiración de referencia	
ANEXO C Datos meteorológicos requeridos para la evapotranspiración	
ANEXO D Hojas de cálculo de evapotranspiración de referencia de diferentes métodos	
ANEXO F Hojas del cálculo para los índices estadísticos	
ANEXO F Panel fotográfico	

LISTA DE ACRÓNIMOS

INIA = Instituto Nacional de Innovación Agraria

FAO = Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

PETP = Programa de evapotranspiración potencial

CROPWAT = Crop Water (cultivo-agua)

LISTA DE ABREVIATURAS

T = Transpiración.

E = Evaporación.

Epan = Evaporación del Tanque evaporímetro.

ET = Evapotranspiración.

ETc = Evapotranspiración real o de cultivo.

ETo = Evapotranspiración potencial o de referencia.

ETc aj = Evapotranspiración del cultivo en circunstancias no típicas.

HR = Humedad relativa media mensual.

Kp = Coeficiente del Tanque evaporímetro.

MF = Factor mensual de latitud.

N = El promedio de horas de insolación intensa en la ubicación.

N = El tiempo de exposición al sol intenso, variando según el mes y la latitud del lugar.

RMM = La radiación solar recibida del espacio exterior, expresada en milímetros de evaporación por mes.

Rn = Radiación neta.

RSM = La radiación del sol, expresada en milímetros de evaporación por mes.

T = Transpiración.

TMF = Temperatura media mensual (°F).

E = Latitud o elevación del lugar (msnm).

Rs = radiación solar incidente.

Ra = Radiación solar extraterrestre.

RMSE = Raíz del error cuadrático medio.

PE = Error porcentual.

D = Índice de concordancia.

R = Coeficiente de correlación.

C = Índice de confianza.

Tan = Tanque evaporímetro clase A

FAO 56 = Método FAO Penman Monteith

Hrs = Método Hargreaves en base a la radiación solar

Ht = Método Hargreaves en base a la temperatura

J-H = Método Jensen – Haise

Ma = Método Makkink

Tc = Método Turc

LISTA DE SÍMBOLOS

R_n = La radiación neta en la superficie del cultivo. ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)

R_a = La radiación solar que llega a la atmósfera desde el espacio exterior. (mm día^{-1})

G = Transferencia de energía térmica desde el suelo hacia el aire o viceversa. ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)

T = Temperatura media del aire ($^{\circ}\text{C}$)

u_2 = Velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-1})

e_s = Presión de vapor de saturación (kPa)

e_a = Presión de vapor (kPa)

Δ = Pendiente curva presión de vapor ($\text{k Pa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

γ = Constante psicométrica ($\text{KPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

P = Presión atmosférica (kPa)

λ = Calor latente de vaporización, 2, 45 (MJ kg^{-1})

C_p = Calor específico a presión constante, $1,013 \times 10^{-3}$ ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

ϵ = El resultado de dividir el peso molecular del vapor de agua entre el del aire seco es igual a 0,622.

Z = Altura respecto al nivel del mar (m)

RS = Radiación solar promedio por mes. ($\text{cal/cm}^2/\text{día}$), medida.

K_i = El factor de ajuste mensual y sus cifras correspondientes son: 0.40 para meses con 30 y 31 días, 0.37 para febrero y 0.13 para periodos de 10 días.

n = Horas de exposición solar intensa promedio registradas en el lugar.

RESUMEN

El componente principal del ciclo hidrológico es la evapotranspiración de referencia, su estimación es importante para requerimiento de agua de los cultivos, planificación de gestión de recursos hídricos nacionales y regionales, el objetivo principal fue estimar y comparar la evapotranspiración de referencia por método directo Tanque evaporímetro clase A, con métodos empíricos en la estación meteorológica INIA, la metodología consistió en comparar los resultados de evapotranspiración de los modelos empíricos con valores de evapotranspiración de referencia obtenida de tanque evaporímetro clase A, los resultados de evapotranspiración promedio anual del año 2013-2028 fueron. Tanque evaporímetro clase A, 1305.88 mm/año, FAO Penman Monteith 1363.6 mm/año, Hargreaves en base a la radiación solar 1386.92 mm/año, Hargreaves en base a la temperatura 1290.55 mm/año, Jensen-Haise 1462.13mm/año, Makkink 1210.12 mm/año, Turc 1295.69 mm/año, mediante comparación de gráficas y graficas de dispersión se descartó los resultados evapotranspiración de los años 2015, 2019,2020,y 2021 ya que en estos años presentan variaciones distintas y la pendiente de la recta de regresión lineal es negativa y los coeficientes de correlación resultaron muy bajos, se comparó los resultados de evapotranspiración de referencia, de los años 2013-2014, 2016-2018 mediante los índices estadísticos con valores de evapotranspiración de tanque evaporímetro, los modelos Hargreaves en base a la radiación solar, Hargreaves en base a la temperatura, Jensen-Haise y Makkink presentaron un resultado de índice de confiabilidad tolerable, los modelos Penman Monteith y Turc presentaron un índice de confiabilidad bueno, Se sugiere utilizar estos modelos ya que proporcionaron las mejores estimaciones de los valores de evapotranspiración de referencia para la zona de INIA.

Palabra clave: Evaporación, evapotranspiración de referencia e índices estadísticos.

INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración de referencia desempeña un papel clave en la planificación agrícola y la gestión del agua. Los estudios de investigación deben contemplar el efecto del cambio climático en este proceso, ya que la agricultura y la ganadería están fuertemente ligadas al clima. Por lo tanto, el cambio climático afecta a la agricultura al influir en las necesidades de agua de los cultivos. (Monterroso & Gómez, 2021, p.1)

La estimación de la evaporación es un proceso complejo y costoso que implica el uso de equipos especializados distribuidos en todo el país. Dado que la evaporación es un componente climático, generalmente se deriva de datos recolectados en estaciones meteorológicas. Existen múltiples métodos para estimarla, algunos basados en la temperatura y otros en la radiación física y atmosférica. Los métodos basados en la temperatura solo requieren datos de temperatura y se apoyan en la suposición de que esta es un indicador confiable de la evaporación. Sin embargo, aunque estos métodos pueden ser útiles cuando otros datos meteorológicos no están disponibles, como la humedad relativa, la radiación solar y la velocidad del viento, se ha observado que los cálculos basados únicamente en la temperatura pueden no ser completamente precisos para analizar la demanda evaporativa a largo plazo. (Monterroso & Gómez, 2021, p. 2)

La estimación de la evapotranspiración es crucial para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos, ya que sirve como base para el diseño agronómico de sistemas de riego y para determinar las dimensiones de infraestructuras como canales, tuberías y embalses. Esto facilita la planificación y operación de los sistemas de riego y la gestión del agua en la cuenca. Sin embargo, una sobreestimación de la evapotranspiración puede llevar a proyectos demasiado grandes y costosos, mientras que una subestimación puede resultar en una deficiencia de agua para los cultivos. Por ejemplo, para cada milímetro de sobreestimación en la evapotranspiración de referencia (ET_o), se prevé un aumento en el consumo de agua de riego y, por lo tanto, en los costos de producción, además de crear condiciones favorables para enfermedades fúngicas. Por lo tanto, una estimación precisa de la ET_o es fundamental para optimizar el uso del agua de riego. (Ortiz & Chile, 2020, p.71)

Problema general

¿Cómo es el comportamiento de modelos alternativos con evaporación de Tanque evaporímetro clase A, en la estimación de evapotranspiración de referencia en la estación meteorológica INIA-Ayacucho?

Problemas específicos

1. ¿Cómo es la estimación de evapotranspiración de referencia mediante modelos alternativos en comparación con registros de evaporación de Tanque evaporímetro clase “A” en la estación meteorológica INIA-Ayacucho?
2. ¿Los resultados de modelos alternativos en la estimación de evapotranspiración se ajustarán al método Tanque evaporímetro clase A en la estación INIA-Canaán?

La evapotranspiración de referencia (ET_o) es un elemento fundamental para riego, la zonificación agroclimática, los estudios agrícolas, urbanos, balance hídrico, es un componente crucial de la investigación hidrológica. Dado que el desarrollo de modelos hidrológicos de balance de masas en una cuenca requiere el examen minucioso de modelos empíricos para su evaluación debido a la ausencia de datos de ET_o. (Bochetti, 2010, p.1)

Dado que una estimación exacta de la evapotranspiración real es esencial para establecer el equilibrio hídrico, la evaluación de la ET_o se emplea extensamente en la ingeniería de riego para calcular las demandas hídricas de los cultivos. Estas estimaciones son cruciales tanto en la planificación de nuevos sistemas de riego como en la administración y distribución del agua en sistemas ya establecidos. (Bochetti, 2010, p.1).

En la región de Ayacucho, especialmente en el área de investigación bajo estudio, las estaciones meteorológicas enfrentan una falta de datos suficientes. Esta carencia dificulta la estimación precisa de la evapotranspiración de referencia. Para

obtener resultados óptimos, es necesario invertir en estaciones meteorológicas adicionales o en dispositivos como lisímetros y tanques evaporímetros. Estos recursos son esenciales para calcular la evapotranspiración con las técnicas ya empleadas.

Teniendo en cuenta que la región Ayacucho ha experimentado un crecimiento importante en la agricultura y que la evapotranspiración es una variable fundamental debido a la abundancia de recursos hídricos en la zona, se requiere una estimación correcta de la evapotranspiración al momento de realizar un estudio hidrológico.

Mediante el uso de técnicas sencillas de estimación de la evapotranspiración y su comparación con registros mensuales, queremos identificar en este trabajo de investigación el modelo alternativo que demuestre mejor correlación y mejor ajuste en la zona de estudio INIA-Canaán. Con ello, esperamos obtener una herramienta que nos proporcione la seguridad necesaria para derivar esta variable utilizando un modelo diferente.

Objetivos

Objetivo general

Comparar el comportamiento de diferentes modelos empíricos para estimar evapotranspiración de referencia con registros de evaporación de Tanque evaporímetro clase “A”, en la estación meteorológica INIA-Ayacucho.

Objetivos específicos

1. Estimar la evapotranspiración de referencia empleando diferentes modelos alternativos para comparar con registros de evaporación de Tanque evaporímetro clase “A” en la estación meteorológica INIA-Ayacucho.
2. Comparar estadística y gráficamente los valores de las estimaciones evapotranspiración de referencia obtenidas por diferentes modelos con datos de evaporación Tanque evaporímetro clase “A” en la estación meteorológica INIA-Ayacucho.

Hipótesis

Hipótesis general

Los modelos alternativos de evapotranspiración es una solución por escasez de datos meteorológicos que están directamente y significativamente relacionados para la estimación de evapotranspiración.

Hipótesis específicas

1. Los modelos alternativos pueden ser evaluados, identificados y seleccionados para hacer una comparación con evaporación de Tanque evaporímetro clase A.
2. Mediante la comparación estadística y gráfica se obtienen los resultados más confiables.

El estudio "Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México" de Monterroso & Gómez (2021) aborda la necesidad de obtener información técnica sólida para proponer medidas de adaptación en la agricultura nacional mexicana. El estudio investiga la distribución espacial de la evapotranspiración de referencia (ET_o) y el periodo de crecimiento bajo las condiciones climáticas actuales en todo el país, así como en escenarios futuros de cambio climático. Se empleó una metodología que consta de tres etapas: estimación de la ET_o, determinación del periodo de crecimiento y aplicación de escenarios de cambio climático. Se utilizaron datos mensuales del periodo 1970-2000 como base para el análisis de variables climáticas y escenarios de cambio climático. La evapotranspiración de referencia se calculó utilizando el método Penman-Monteith recomendado por la FAO. El periodo de crecimiento se determinó utilizando el balance de humedad entre evapotranspiración y precipitación, desde el inicio hasta el final de la estación lluviosa. Se analizaron veintiocho escenarios de cambio climático para determinar cómo variaría la evapotranspiración de referencia y su efecto en el periodo de crecimiento. Se observa un aumento en la evapotranspiración debido al incremento de las temperaturas y la disminución de la humedad relativa, lo que podría resultar en una disminución o un aumento en el periodo de crecimiento dependiendo de la región. (pp 10-11)

Ortiz & Chile (2020) investigaron nueve métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia utilizando datos ambientales del Valle de Tumbaco, ubicado en la provincia de Pichincha, Ecuador. (p.70). La metodología incluyó la evaluación de nueve métodos para calcular la evapotranspiración, tales como FAO56, Tanque Evaporímetro, Thornthwaite Modificado, Hargreaves, Jensen-Haise, Makkink, Priestley-Taylor, Turc y Radiación FAO. Se emplearon datos climáticos mensuales de la estación de Tola correspondientes a la serie histórica de 1986 a 2018 (32 años). Los parámetros evaluados incluyeron el error medio absoluto, el coeficiente de determinación, el coeficiente de concordancia y el coeficiente de fiabilidad. Para validar el método con el mejor ajuste, se utilizó un índice de fiabilidad, que se examinó tanto en condiciones extremas para el año máximo de 2015 como para el año mínimo de 1988. (p. 75). El método de radiación de la FAO demostró una precisión satisfactoria, mientras que los métodos de Jensen-Haise, Makkink y Priestley-Taylor mostraron índices aceptables. Por otro lado, los métodos del Tanque Evaporímetro, Thornthwaite Modificado, Hargreaves y Turc arrojaron resultados muy deficientes, según los índices analizados basados en la FAO56 (p.76). En resumen, los métodos que se basan en la radiación solar tienden a subestimar la evapotranspiración potencial en los meses de julio y agosto debido a la falta de consideración de la velocidad del viento en la estimación. En consecuencia, se concluye que el método FAO56 es adecuado para calcular la evapotranspiración potencial mensual en el área del Valle de Tumbaco. (p.78)

Lujano et al. (2019) examinaron diversas técnicas alternativas para estimar la evapotranspiración de referencia en la estación meteorológica de Yauri, ubicada en Cusco, Perú. Su estudio evaluó el rendimiento de diferentes métodos empíricos y los comparó con la evapotranspiración calculada mediante el método estándar de la FAO-56 Penman-Monteith (p. 216). Este enfoque metodológico implica la comparación de los resultados obtenidos de varios modelos empíricos con los obtenidos a través del modelo estándar de la FAO-56 Penman-Monteith. (pp 216-218).

La evaluación del rendimiento de los métodos se realizó mediante un análisis cualitativo utilizando gráficos de dispersión, así como indicadores estadísticos cuantitativos que incluyen el error porcentual (PE), la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el índice de concordancia (d), el coeficiente de correlación (r) y el índice de confianza (c) (pp. 218-219). Los resultados indican que el método HS_Berti muestra un rendimiento sobresaliente en comparación con otros métodos, con un RMSE de 0.22 mm/día, un PE de 3.24%, un d de 0.29, un r de 0.95 y un c de 0.27. (pp 219-,221).

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

1.1.1 Antecedente a nivel mundial

Villazón et al. (2021) llevaron a cabo un análisis de métodos empíricos para estimar la evapotranspiración de referencia en Holguín, Cuba. El propósito fue comparar las estimaciones de evapotranspiración obtenidas a partir de cuatro enfoques empíricos indirectos en cuatro áreas de importancia agrícola dentro de la provincia de Holguín. Los enfoques evaluados incluyeron Thornthwaite, Blaney-Criddle, Hargreaves y Samani, junto con el método estándar Penman-Monteith de la FAO. Se emplearon diversos índices estadísticos, como la desviación media, la raíz cuadrada de la desviación media, el índice de eficiencia, el índice de concordancia, el índice de confianza y el porcentaje de desviación, para evaluar el ajuste de los modelos utilizando datos de las estaciones meteorológicas de La Jíquima, Guaro, Pinares de Mayarí y Velasco de una serie histórica de 2006 a 2015. Se observó que los modelos de Hargreaves y Hargreaves y Samani presentaron el mejor ajuste en todas las localidades. Sin embargo, los resultados fueron menos satisfactorios con los métodos utilizados para la estimación de evapotranspiración en Pinares de Mayarí.

Monterroso & Gómez (2021) llevaron a cabo un análisis exhaustivo de la distribución geográfica de la ETP, así como del periodo de crecimiento en todo el país y los efectos potenciales de los escenarios de cambio climático. El objetivo principal era recopilar datos técnicos suficientes para proponer medidas de adaptación para la producción agrícola nacional. Se empleó el método Penman-Monteith para calcular la ETP mensual a partir de la ETP de referencia (ET_o). Para determinar el inicio, final y duración del periodo vegetativo, se combinó este parámetro con la precipitación media mensual (P). Se evaluaron un total de veintiocho escenarios de cambio climático para examinar cómo los cambios en la ETP podrían impactar en el periodo de crecimiento en los distritos agrícolas del país. Se anticipa un aumento generalizado de la ETP en casi todo el país debido al probable incremento de la temperatura y la disminución de la humedad relativa. Se espera que los grados de ETP superiores a 1000 mm aumenten en promedio un 20% en el periodo medio (2040-2069) y casi un 50% en el largo plazo

(2070-2099), mientras que los grados de ETP inferiores a 1000 mm disminuirán anualmente. Tres estados (Baja California Sur, Coahuila y San Luis Potosí) indicaron que no modificarán sus políticas en respuesta al cambio climático. Sin embargo, se espera que otros estados experimenten una reducción en el periodo de crecimiento debido a cambios en el inicio y final de la estación vegetativa. Se destaca la importancia de considerar estudios cartográficos en la planificación del uso agrícola del agua, ya que facilitan el análisis espacial de los resultados y proporcionan una base técnica sólida para el desarrollo de estrategias de adaptación al cambio climático.

1.1.2 Antecedente a nivel nacional, regional y local

Aroni (2019) realizó una comparación de la evapotranspiración de referencia en la cuenca Huancané de la región de Puno utilizando el modelo SEBAL y un evaporímetro de tanque. Se buscaba comparar y validar los resultados de evapotranspiración obtenidos mediante el evaporímetro de tanque con los del modelo SEBAL. La evapotranspiración real se estimaba utilizando el evaporímetro de tanque basado en datos meteorológicos de las estaciones de Huancané y Muñani. Los resultados del modelo SEBAL variaron entre 1.50 a 4.20 mm/día, mientras que los valores de ETo obtenidos mediante el evaporímetro de tanque fueron en promedio 2.10, 2.44, 1.76, 2.04 mm/día. Para comparar y validar los resultados, se emplearon índices estadísticos como el error medio cuadrático, el coeficiente de determinación y la eficiencia de Nash-Sutcliffe. En la estación Huancané, el error medio cuadrático fue de 0.26 y 0.25, el coeficiente de determinación fue de 0.97, y la eficiencia de Nash-Sutcliffe fue de 0.81 y 0.83. En la estación Muñani, el error medio cuadrático fue de 0.13 y 0.14, el coeficiente de determinación fue de 0.97 y 0.93, y la eficiencia de Nash-Sutcliffe fue de 0.81 y 0.82. Como resultado, se concluyó que el modelo SEBAL mostró resultados altamente satisfactorios en comparación con el evaporímetro de tanque, lo que sugiere que en esta cuenca podría ser utilizado como un método alternativo para estimar la evapotranspiración de referencia.

Lujano et al. (2019) examinaron siete métodos empíricos en la estación meteorológica de Yauri: Penman-Monteith de la FAO, Turc (1961), Hargreaves & Samani (1985), Serruto (1993), Droogers & Allen (2002), Ravazzani et al. (2012), Berti et al. (2014). Estos fueron comparados con la evapotranspiración estimada

mediante el método estándar Penman-Monteith de la FAO-56. La comparación se realizó a través de análisis cualitativos y cuantitativos. Los resultados indicaron que el método de Berti exhibió el mejor rendimiento para la estimación de E_{To} , seguido por el método de Hargreaves & Samani, Turc, Serruto y Ravazzani, con desempeños catalogados como muy bueno, bueno, promedio y pobre, respectivamente, para el área de estudio. Según estos autores, el método de Berti representa una alternativa válida para la evaluación de la evapotranspiración de referencia en situaciones donde los datos meteorológicos son escasos.

More (2021) examinó ocho métodos empíricos diferentes: Thornthwaite, Hargreaves simplificado, Hargreaves basado en la temperatura, Blaney-Criddle, Ivanov, Papadakis, Linacre y Holdridge, además del método estándar Penman-Monteith de la FAO. Estos métodos fueron evaluados utilizando datos de la estación de Tumpis, ubicada en la región de Tumbes, y se emplearon series históricas de datos meteorológicos mensuales recopilados entre 2007 y 2020. Se aplicaron diversos índices estadísticos, como el error cuadrático medio, el error porcentual, el coeficiente de correlación de Pearson, el índice de concordancia y el coeficiente de fiabilidad, para determinar la eficacia de cada método empírico. Los resultados revelaron que el método de Linacre demostró un rendimiento satisfactorio, con un alto índice de fiabilidad. En consecuencia, se concluyó que el método de Linacre es el más confiable para estimar la E_{To} en esta área de estudio.

Rondinel (2020), comparó los resultados de evapotranspiración con datos satelitales basados en plataformas satelitales, obteniendo evapotranspiración de referencia satelital de 1320.53 mm/año, para respaldar los resultados obtenidos se estimaron evapotranspiraciones con métodos directos Tanque evaporímetro clase A = 1227.11 mm/año, FAO Penman Monteith = 1344.72mm/año, Hargreaves en base a datos registrados de radiación solar,=1361.03 mm/año, Hargreaves en base a temperatura =1278.61 mm/año estas fueron desarrollados mediante el software PETP V2.0.0 en la estación meteorológica automática INIA-Canaán, frente a estos resultados se validó y ajustó los resultados mediante índices estadísticos obteniendo los resultados de insuficiente para el Tanque evaporímetro clase A, y se obtuvo muy buenos resultados frente a los demás métodos de acuerdo a la escala de interpretación de desempeño de los índices estadísticos, después de analizar los datos, se llegó a la

conclusión de que el enfoque satelital representa una opción válida cuando hay restricciones en la disponibilidad de datos meteorológicos para evaluar la evapotranspiración de referencia.

Ortiz & Chile (2018) realizaron una evaluación en el valle de Tumbaco, ubicado en la provincia de Pichincha, Ecuador, donde se consideraron un total de nueve modelos para prever la evapotranspiración de referencia en función de las condiciones climáticas locales. Se analizaron los modelos Tanque evaporímetro, Thornthwaite modificado, Jensen-Haise, Makkink, Priestley-Taylor, Turc, Radiación FAO y Hargreaves para estimar la ETo. Se emplearon el coeficiente de determinación, el coeficiente de concordancia, el coeficiente de fiabilidad, el error medio absoluto y otros índices estadísticos para evaluar los resultados obtenidos. Los resultados revelaron que Jensen y Haise, Makkink, Priestley y Taylor identificaron al método Penman Monteith de la FAO como el más preciso para estimar la ETo. Sin embargo, el evaporímetro de tanque, Thornthwaite modificado, Turc, Hargreaves y el evaporímetro exhibieron índices inferiores en términos de precisión.

Rodríguez (2021), evaluó modelos empíricos para calcular la ETo utilizando datos climáticos procedentes de estaciones meteorológicas. El objetivo principal de este estudio fue predecir la evapotranspiración de referencia de los cultivos en la cuenca del río Ramis en relación con diversos factores y elementos climáticos. Para ello, se recopilaron datos meteorológicos de la estación, humedad relativa, velocidad del viento, temperatura, horas de sol, evaporación del depósito y las precipitaciones. En el análisis de las variables para determinar la ETo se utilizaron los métodos de Penman Monteith y del Tanque de clase A, mínimos cuadrados y técnicas de estimación de máxima verosimilitud. Se validaron los valores observados y se utilizó el programa Cropwat para calcular el balance hídrico de los principales cultivos de la cuenca para el mes de mayor demanda. Se ha comprobado que las temperaturas medias mínima, máxima y de la velocidad del viento son estadísticamente significativas al 0,05 de significación, con $r^2 = 37\%$. El modelo funciona mal cuando se validan los datos de Ananea.

Rodríguez (2021) examinó modelos empíricos para estimar la ETo mediante el uso de datos climáticos provenientes de estaciones meteorológicas. El objetivo

principal de este estudio fue pronosticar la evapotranspiración de referencia de los cultivos en la cuenca del río Ramis considerando diversos factores y elementos climáticos. Se recopilaron datos meteorológicos como humedad relativa, velocidad del viento, temperatura, horas de sol, evaporación del depósito y precipitaciones. En el análisis de estas variables para determinar la ETo, se emplearon métodos como Penman Monteith y Tanque de clase A, así como técnicas de mínimos cuadrados y estimación de máxima verosimilitud. Se validaron los valores observados y se utilizó el programa Cropwat para calcular el balance hídrico de los principales cultivos de la cuenca durante el mes de mayor demanda. Se observó que las temperaturas medias mínimas, máximas y la velocidad del viento son estadísticamente significativas al nivel de significación del 0,05, con un coeficiente de determinación (r^2) del 37%. Sin embargo, el modelo muestra un rendimiento deficiente cuando se validan los datos de Ananea.

1.2 Evaporación (E)

La evaporación del agua implica su transformación en vapor y su liberación desde la superficie terrestre. Este fenómeno se debe a la disparidad de presión de vapor de agua entre el entorno y la superficie donde ocurre la evaporación, y requiere fuentes de energía como la radiación solar directa y la temperatura ambiente. Este proceso está influenciado por diversos parámetros meteorológicos, como la radiación solar, la humedad relativa, la temperatura del aire y la velocidad del viento. (Allen et al., 2006, p.1)

Los factores que influyen en la evaporación en una superficie de agua al aire libre son principalmente dos: la radiación solar, que proporciona la principal fuente de energía térmica y la transporta desde la superficie, dependiendo del gradiente de humedad específica del aire sobre ella, y la velocidad del viento, que facilita la transferencia del calor latente de vaporización lejos de la superficie evaporativa. (Chow et al., 2000, pp 82-83)

El ciclo hidrológico comienza su proceso de evaporación cuando las precipitaciones alcanzan la superficie del suelo. El agua que se absorbe en la capa superior del suelo después de lluvias recientes puede penetrar a poca profundidad o ascender desde el nivel freático mediante la acción capilar, atravesando directamente

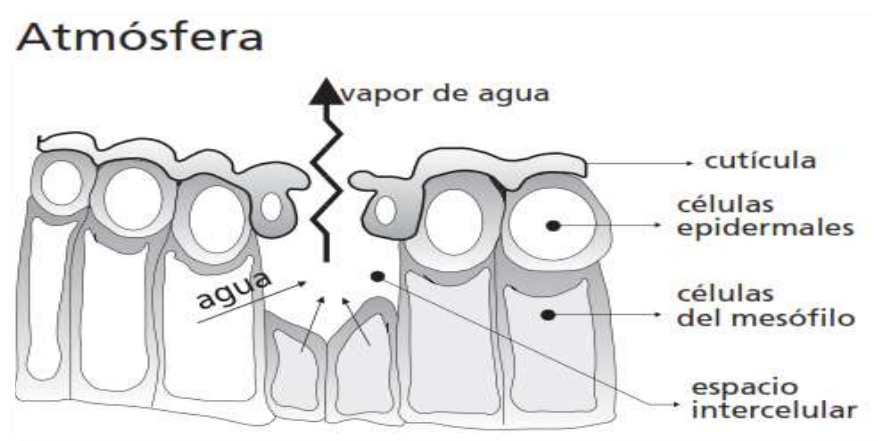
la cobertura vegetal. Esta agua constituye una significativa fuente de evaporación. (Cahuana & yugar, 2009, p.81)

1.3 Transpiración (T)

Los gases de vapor de agua se originan en las estomas de las plantas, estas son pequeñas aberturas ubicadas en sus hojas a través de las cuales el vapor de agua se libera hacia la atmósfera (ver Figura 1), este proceso se denomina transpiración y consiste en la evaporación del agua contenida en los tejidos vegetales que luego es devuelta a la atmósfera. La absorción de agua por parte de las plantas a través de las raíces, junto con algunos nutrientes, da lugar a la vaporización en el interior de las hojas, específicamente en los espacios intercelulares, siendo la apertura estomática la encargada de regular este intercambio. La transpiración está influenciada por la presión de vapor y la velocidad del viento, por lo que la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento también son consideradas al determinar este fenómeno. (Allen et al., 2006, p.3)

Figura 1

Diagrama gráfico de estoma



Nota: Diagrama gráfico de estoma (Allen et al., 2006, p.2)

1.4 Evapotranspiración (ET)

Cuando ocurre simultáneamente la transpiración y la evaporación, se da lugar a la evapotranspiración. En las etapas iniciales del crecimiento de un cultivo, la mayor

parte de la pérdida de agua ocurre debido a la evaporación directa desde el suelo; sin embargo, a medida que la planta crece y desarrolla una cobertura vegetal completa, la transpiración se convierte en el proceso predominante. La evaporación de los cultivos está principalmente influenciada por la radiación solar que incide en la superficie del suelo, disminuyendo a lo largo del ciclo vegetativo del cultivo. La evapotranspiración está relacionada con la superficie foliar en relación a la superficie del suelo, y aproximadamente el 90% de la evapotranspiración total corresponde a la transpiración. (Allen et al., 2006, p.3). este proceso se ve en la figura 2.

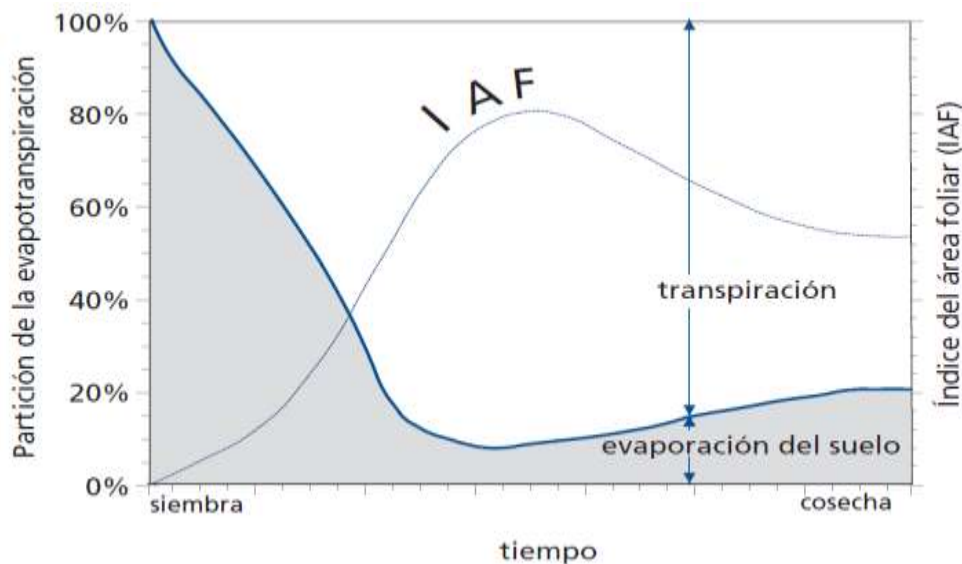
La evapotranspiración surge de la combinación de la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de las plantas. Además de estos procesos, factores como la energía suministrada, el transporte de vapor y la humedad superficial también influyen en la evaporación desde la superficie. Como consecuencia de estos factores, la tasa de evapotranspiración disminuye gradualmente hasta alcanzar un nivel por debajo de la humedad del suelo. (Chow et al., 2000, pp 93-94)

La evapotranspiración es el resultado de la combinación de dos procesos distintos que ocasionan la pérdida de agua: la evaporación del agua del suelo y la transpiración de las plantas. Este fenómeno está influenciado por varios factores que también inciden en la transpiración y la evaporación. En la planificación de los sistemas de riego y sus elementos, la evapotranspiración juega un papel fundamental. (Cahuana & Yugar, 2002, p.94)

En caso de que el suelo cuente con un aporte de humedad constante, tanto la evaporación del agua desde el suelo como la transpiración de las plantas ocasionarían la pérdida de agua, fenómeno conocido como evapotranspiración. (Monsalve, 1999, p.150).

Figura 2

Durante el ciclo de desarrollo de un cultivo anual, se distribuye la pérdida de agua en evaporación y transpiración.



Nota: Esquemización de evapotranspiración. (Allen et al., 2006, p.2)

1.5 Factores que afecta la evapotranspiración

1.5.1 Variables climáticas

Los principales factores climáticos que influyen en la evapotranspiración son la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Basándose en estos factores, se han establecido varios métodos para calcular la evaporación. La evapotranspiración de referencia (ET₀) representa la cantidad de agua evaporada hacia la atmósfera desde una superficie estándar de cultivo. (Allen et al., 2006, p.5)

1.5.2 Factores de cultivo

Es crucial considerar el tipo específico de cultivo, su variante y la etapa de desarrollo al evaluar la evapotranspiración en regiones extensas y bien administradas. La cantidad de agua evaporada por diferentes variedades de cultivos puede variar dependiendo de factores como la cobertura del suelo, las características de las raíces, la altura de las plantas, su textura y la resistencia a la transpiración. La demanda evaporativa atmosférica de los cultivos en condiciones ideales de humedad del suelo

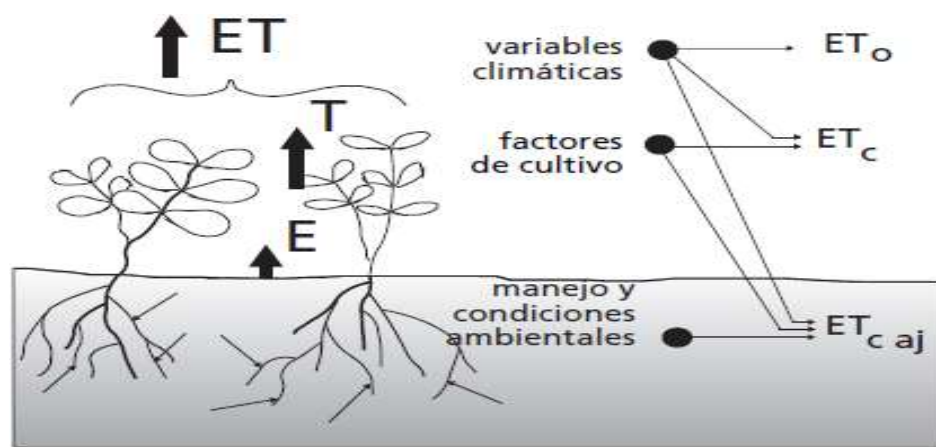
se denomina evapotranspiración de cultivos en condiciones estándar (ET_c). (Allen et al., 2006, p.5)

1.5.3 Manejo y condiciones ambientales

La salinidad, la falta de fertilidad del suelo, la limitación en el uso de fertilizantes, la compactación del suelo que lo hace impermeable, la falta de control de enfermedades y prácticas de manejo inadecuadas pueden reducir la evapotranspiración y obstaculizar el crecimiento de los cultivos. Al analizar la evapotranspiración, es esencial considerar el contenido de agua en el suelo, el cual está determinado por el déficit hídrico específico de cada tipo de suelo. Esto se debe a que un exceso de agua puede provocar saturación, lo que daña el sistema radicular de la planta y disminuye su capacidad para absorber agua, afectando la respiración, la cobertura del suelo y la densidad del cultivo (Allen et al., 2006, p.5). La figura 3 ilustra los factores que afectan la evapotranspiración de referencia

Figura 3

Variables que influyen en la evapotranspiración de referencia



Nota: Variables que influyen en la evapotranspiración de referencia. (Allen et al., 2006, p.4)

1.6 Definición de evapotranspiración

Según Allen et al., (2006) consideran tres diferentes definiciones de evapotranspiración de cultivo de referencia.

1.6.1 Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o)

La evapotranspiración de referencia se produce en una superficie estándar sin limitaciones de agua, donde se simula un cultivo hipotético de pasto con sus propias características. Este valor se utiliza para evaluar la demanda de evapotranspiración atmosférica, independientemente del tipo de cultivo, su desarrollo o las prácticas de manejo. La evapotranspiración de referencia es un parámetro climático que está influenciado por factores climáticos y puede ser calculado utilizando datos meteorológicos, sin considerar las particularidades del cultivo o las condiciones del suelo. Por esta razón, el método de Penman-Monteith de la FAO es el método recomendado para calcular la evapotranspiración de referencia, ya que proporciona resultados precisos en diferentes ubicaciones. Este método utiliza parámetros fisiológicos y aerodinámicos, y puede ajustarse para tener en cuenta los datos climáticos que puedan faltar en ciertas ubicaciones. (Allen et al., 2006, p.7)

Según Allen et al. (2006), en la tabla 1 se presentan los rangos habituales de Evapotranspiración de Referencia (ET_o) en diferentes regiones agroclimáticas (p.8), mientras que en la tabla 2 se detallan los valores de referencia específicos para la zona alta andina del Perú.

Tabla 1

ET_o promedio para diversas regiones agroclimáticas se expresa en milímetros por día mm día⁻¹

Regiones	Temperatura promedio durante el día (°C)		
	Templada -10 °C	Moderada 20 °C	Caliente > 30 °C
Trópicos y subtropicos			
- Húmedos y subhúmedos	2-3	3-5	5-7
- Áridos y semiáridos	3-4	4-6	6-8
Regiones templadas			
- Húmedos y subhúmedos	1-2	2-4	4-7
- Áridos y semiáridos	1-3	4-7	6-9

Nota: Se muestra rangos de evapotranspiración en diferentes regiones agroclimáticas. (Allen et al., 2006, p.8)

Tabla 2*Valores referenciales de zona alto andina del Perú*

ZONAS	Evapotranspiración potencial (ET _o)
Valles (de 1,000 a 2,000 msnm)	4.0 mm/día
Zonas Quechua (de 2,000 a 3,000 msnm)	3.0 mm/día
La Jalca (de 3,000msnm o más)	2.5 mm/día

Nota: Se muestra rangos de evapotranspiración en zonas altoandinas del Perú. (Vásquez et al., 2017, p.179)

1.6.2 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c)

La evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua que se pierde por evaporación y transpiración en condiciones óptimas de cultivo, incluyendo una salud adecuada de las plantas, una fertilización adecuada y un entorno favorable de suelo y agua. Esta cantidad se conoce como ET_c. Es importante destacar que aunque los conceptos de evapotranspiración del cultivo y las necesidades de agua del cultivo son similares, se diferencian en sus definiciones. Las necesidades de agua del cultivo se refieren a la cantidad de agua que se requiere para compensar la pérdida de evapotranspiración, ya sea a través del riego o la precipitación. Esto se calcula como la diferencia entre las necesidades de agua del cultivo y la precipitación efectiva. Por otro lado, la evapotranspiración del cultivo representa la cantidad real de agua perdida debido a la evapotranspiración. (Allen et al., 2006, pp 7-9)

La evapotranspiración del cultivo se determina utilizando datos climáticos y ajustando estos con factores que consideran la resistencia del cultivo. La relación entre la evapotranspiración del cultivo y la evapotranspiración de referencia se conoce como coeficiente de cultivo (K_c), y se determina experimentalmente.

$$ET_c = K_c \times ET_o \dots\dots\dots \text{Ec. 1.1}$$

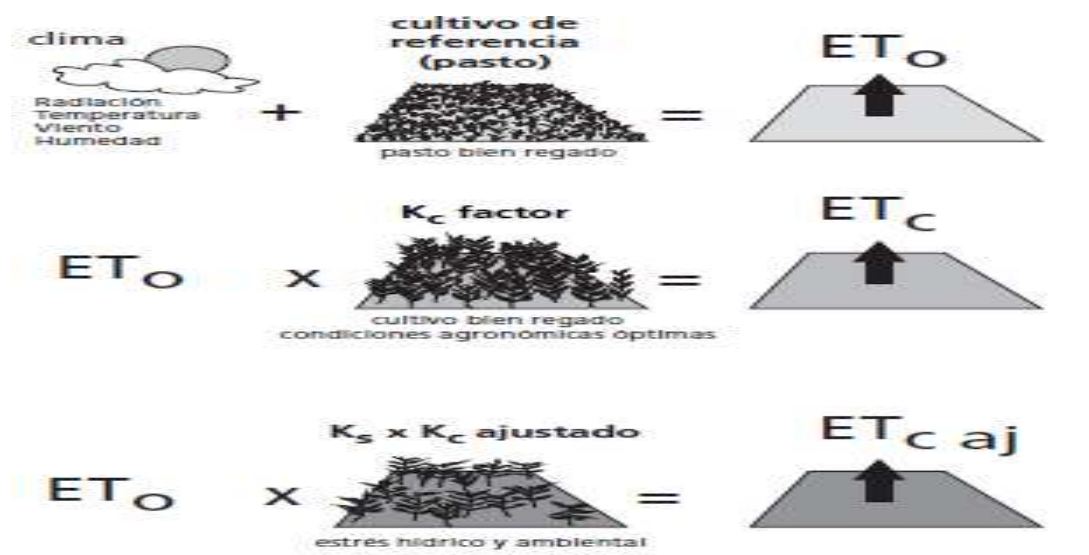
1.6.3 Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (ET_{c aj})

La evapotranspiración del cultivo en condiciones no estándar, designada como ET_{c aj}, se refiere a la cantidad de agua que se pierde por evaporación y transpiración en circunstancias subóptimas para el cultivo. Estas condiciones incluyen la presencia

de plagas, enfermedades, prácticas inadecuadas de manejo del suelo, baja fertilidad del suelo, exceso o falta de agua, y salinidad del suelo. Todos estos factores pueden disminuir el crecimiento y desarrollo de los cultivos, lo que a su vez afecta la tasa de evapotranspiración, llevándola por debajo de los valores ideales de ET_c . Para calcular la evapotranspiración del cultivo en estas condiciones no óptimas, se utiliza un coeficiente de estrés hídrico (K_s) o un coeficiente de cultivo ajustado (K_c), junto con otros coeficientes relacionados con el estrés hídrico y las limitaciones ambientales en la evapotranspiración del cultivo. (Allen et al., 2006, pp 9-10). La Figura 4 ilustra las tres definiciones diferentes de evapotranspiración.

Figura 4

Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), en situaciones normales (ET_c) y bajo condiciones no usuales (ET_c aj)



Nota: Esquematización de evapotranspiración bajo situaciones normales y no usuales. (Allen et al., 2006, p.6)

1.7 Factores meteorológicos que determinan la evapotranspiración

1.7.1 Radiación solar

La cantidad de energía requerida para evaporar el agua es el factor determinante en el proceso de evapotranspiración, y la radiación solar, siendo la fuente principal de energía en la Tierra, tiene la capacidad de convertir grandes volúmenes de agua líquida en vapor de agua. Sin embargo, este potencial nivel de radiación solar varía según la latitud y la estación del año, y está influenciado por la presencia de nubes densas y la

claridad de la atmósfera. Es importante destacar que no toda la energía solar disponible se emplea en la evaporación del agua, lo que debe ser considerado al calcular el efecto de la radiación solar en el proceso de evapotranspiración. Además, tanto la superficie terrestre como la atmósfera se calientan parcialmente debido a la radiación solar. (Allen et al., 2006, p.29)

1.7.2 Temperatura del aire

La radiación solar es absorbida por la atmósfera, y el calor que emana de la tierra calienta el aire, elevando su temperatura. Esta temperatura del aire, que contiene calor sensible, influye en la cantidad de energía transferida a las plantas, lo que a su vez regula la tasa de transpiración. En días cálidos y soleados, la transpiración es mayor en comparación con días frescos y nublados. (Allen et al., 2006, p.29)

1.7.3 Humedad relativa

Las causas principales de la evaporación del agua son la energía solar y el aire del ambiente, pero la eliminación de vapor de agua viene determinada por la oposición de presión de vapor de agua entre la superficie de evapotranspiración y el aire. Como pueden extraer vapor de la atmósfera y tienen una gran disponibilidad de energía, las zonas bien regadas en climas cálidos y secos utilizan mucha agua. Por el contrario, la elevada humedad del aire en los trópicos húmedos disminuye la necesidad de evapotranspiración, incluso con un aporte energético considerable. En este último caso, el valor evapotranspiración es menor en zonas áridas, ya que el aire está casi saturado y no puede absorber más humedad. (Allen et al., 2006, p.30)

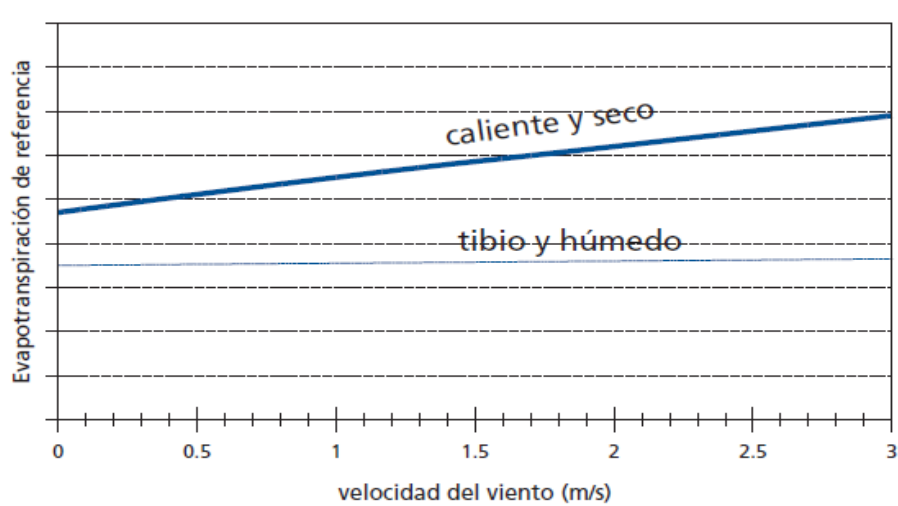
1.7.4 Velocidad del viento

El viento y la agitación del aire son fundamentales para transportar grandes volúmenes de aire hacia la superficie de evaporación, facilitando así la eliminación del vapor de agua. Conforme el agua se evapora, el aire sobre la superficie se satura gradualmente de vapor. La eficacia para eliminar el vapor de agua disminuye si este aire saturado es reemplazado ocasionalmente por aire más seco. La figura 5 ilustra cómo los diversos parámetros climáticos influyen en la evapotranspiración en diferentes condiciones climáticas. la radiación solar directa y el calor latente

disponibles, las demandas de evapotranspiración son mayores en climas cálidos y secos. (Allen et al., 2006, p.30)

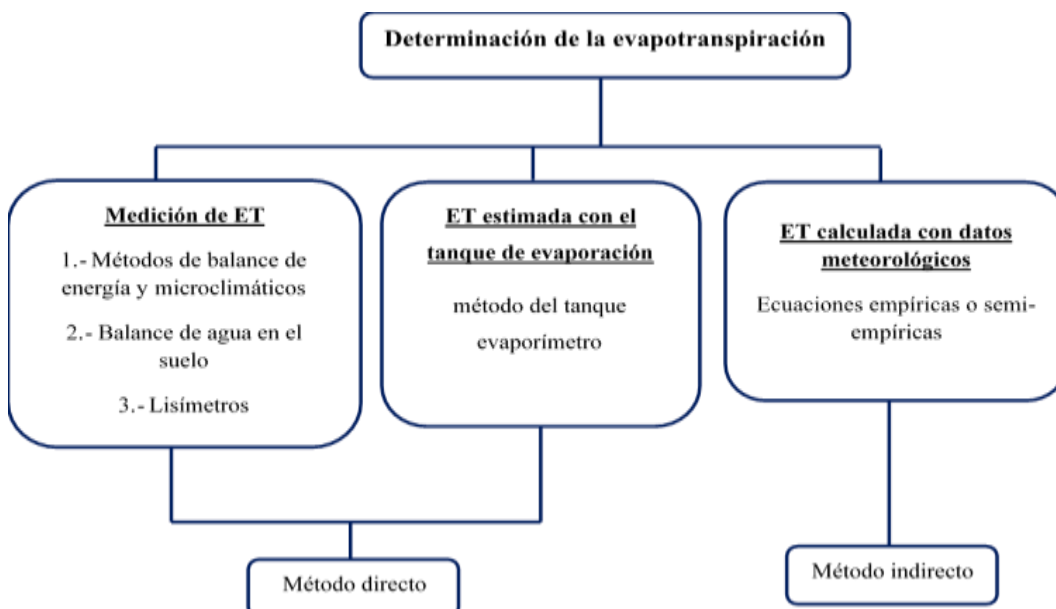
Figura 5

El impacto de la velocidad del viento en la evapotranspiración se contrasta entre atmósferas secas y calurosas, y atmósferas húmedas y templadas.



Nota: Esquematización de velocidad de viento bajo condiciones atmosféricas. (Allen et al., 2006, p.30)

1.8 Determinación de la evapotranspiración



1.8.1 Método directo del tanque evaporímetro

1.8.1.1 Tanque evaporímetro

Determinar la tasa de evaporación en un tanque de evaporación lleno de agua es relativamente simple. En ausencia de lluvia, la cantidad de agua evaporada en un período específico (expresada en mm/día) equivale a la disminución en el nivel del agua en el tanque durante ese lapso. Estos tanques proporcionan una representación de cómo la radiación, el viento, la temperatura y la humedad influyen en el proceso de evaporación en las superficies de agua al aire libre. Aunque los tanques de evaporación reaccionan de manera similar a las mismas condiciones meteorológicas que afectan la transpiración de los cultivos, existen diversos factores que ocasionan variaciones significativas en la pérdida de agua entre las superficies cultivadas y las de evaporación natural. (Allen et al., 2006, pp 78-79)

La evaporación del tanque se calcula como la evapotranspiración de referencia multiplicada por un coeficiente específico del tanque evaporímetro.

$$E_{To} = K_p E_{pan} \dots \dots \dots \text{Ec. 1.2}$$

E_{To} = Evapotranspiración de referencia (mm/día)

K_p = Coeficiente del tanque evaporímetro (ANEXO B, Tabla B-1)

E_{pan} = Evaporación del tanque evaporímetro (mm/día).

$$K_p = 0.5321 - 3 \times 10^{-4} \times U + 0.0249 * \ln(F) + 0.0025 \times HR \dots \dots \dots \text{Ec.1.3}$$

U = Velocidad de viento (m/s)

F = La distancia entre el tanque evaporímetro y el área del cultivo se mide en metros.

HR = Humedad relativa (%)

1.8.1.2 Descripción del tanque clase A

Los tanques de almacenamiento de Clase A tienen una configuración circular con un diámetro de 120,7 centímetros y una profundidad de 25 centímetros. Están fabricados en hierro galvanizado o chapa con un grosor de 0,8 mm. Estos tanques se colocan sobre una plataforma de madera en forma de valla, elevada a 15 cm del suelo,

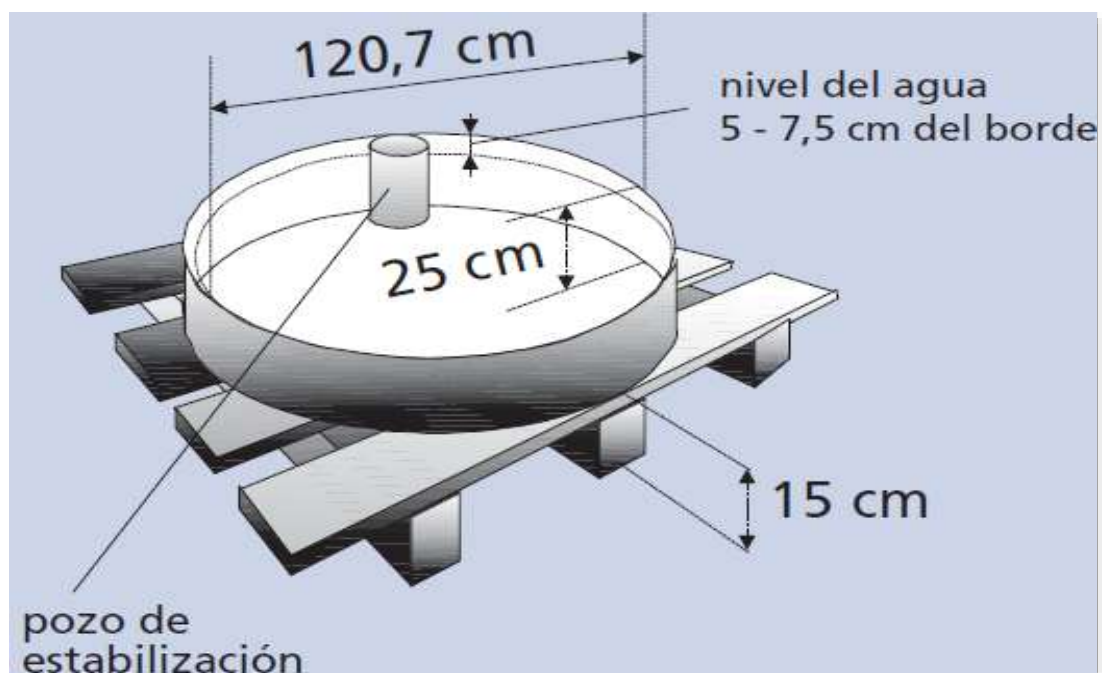
y se aseguran de que estén nivelados horizontalmente. Después de la instalación, se llena el tanque con agua hasta que esté a una profundidad de 5 cm por debajo del borde, y se garantiza que el nivel del agua no descienda más de 7,5 cm por debajo del borde. Se recomienda cambiar el agua periódicamente, al menos una vez a la semana, para evitar la turbidez. En el caso de los tanques galvanizados, es necesario aplicar una capa de pintura de aluminio una vez al año. Se desaconseja la instalación de mallas en los tanques, y es crucial protegerlos con una red de seguridad para prevenir la entrada de animales. (Allen et al., 2006, p.84)

Es recomendable que el área de instalación esté cubierta preferiblemente de césped y tenga unas dimensiones de 20 x 20 metros, con accesibilidad abierta en todos los lados para permitir la circulación de aire. Las estaciones de monitoreo deberían estar ubicadas idealmente en el centro o en áreas extensas de tierra cultivada. (Allen et al., 2006, p.84)

Cada día, se realizan las mediciones del tanque junto con la recolección de datos de lluvia. Estas mediciones se llevan a cabo en una ubicación fija cerca del borde del tanque. Para garantizar la estabilidad, se emplea una zona de estabilización que comúnmente consta de un cilindro metálico de alrededor de 10 cm de diámetro y 20 cm de profundidad, con una pequeña apertura en la parte inferior para facilitar el drenaje del agua. (Allen et al., 2006, p.84)

Figura 6

Representación gráfica de tanque clase A



Nota: Esquematización de instalación de tanque evaporímetro clase A. (Allen et al., 2006, p.84)

1.8.1.3 Coeficiente del tanque evaporímetro (K_p)

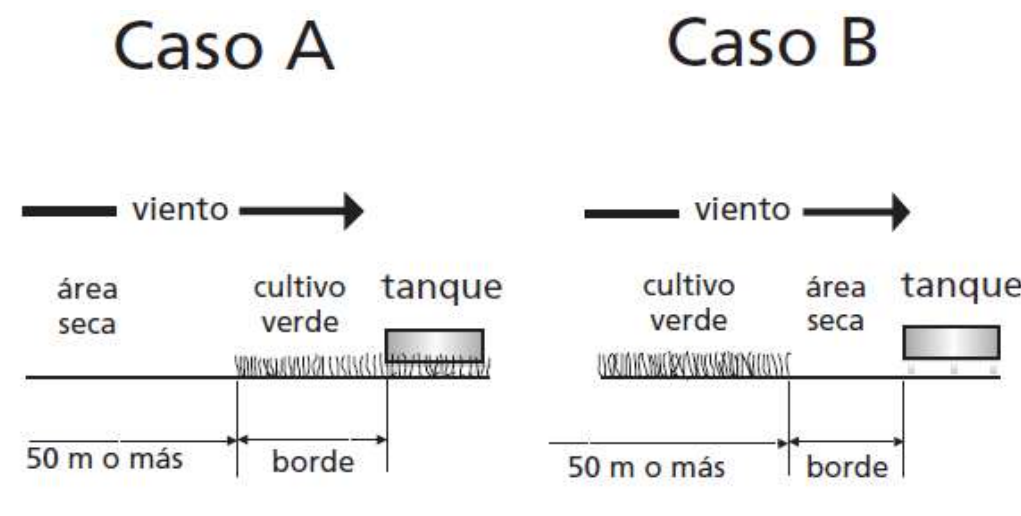
La elección del coeficiente del tanque evaporímetro depende de factores como la cobertura del suelo, la velocidad del viento, la humedad y la ubicación. La configuración y el entorno del tanque evaporímetro pueden influir en los resultados. En la Figura 7 se presentan dos situaciones:

En la situación A, el tanque evaporímetro está ubicado en un área donde hay césped corto y verde, rodeado de suelo sin cultivar.

En la situación B, el tanque evaporímetro se encuentra en un área donde el suelo está sin cultivar, rodeado de cultivos en crecimiento.

Figura 7

Se presentan dos escenarios de ubicación del tanque evaporímetro y su entorno



Nota: Esquematización de localización de tanque evaporímetro. (Allen et al., 2006, p.79)

1.8.2 Métodos indirectos para determinar ETo

Los métodos indirectos son las fórmulas empíricas propuestos por diversos investigadores, estas ecuaciones son dudosas están basadas por variables meteorológicas como influyen el valor de evapotranspiración de referencia, y además estas fórmulas fueron realizadas para zonas con características adecuadas (Vásquez et al., 2017, p.75).

En los 50 últimos años varios científicos y especialistas han desarrollado varios métodos empíricos en el mundo, para calcular evapotranspiración con variables climáticos, las fórmulas obtenidas son sujetos a comprobaciones así demostrando limitada validez (Allen et al., 2006, p.17).

Al momento de seleccionar los modelos empíricos se debe considerar un factor primordial de que estas tienen influencia de la zona de estudio, por ejemplo, Perú está constituido por tres regiones geográficas: costa, sierra y selva. Cada uno de estas regiones presentan comportamientos distintos para calcular la ETo. Esto es por diferencia de clima, latitud, relieve, suelo, planta, y también se debería de considerarse en el cálculo la influencia marítima, y cordillera de los andes, de igual manera se debería considerar situaciones actuales de cada estación meteorológica en cada zona para así seleccionar modelos empíricos para desarrollar.

1.8.2.1 Ecuación de Penman-Monteith

En 1948, Penman desarrolló una fórmula para estimar la evapotranspiración al derivar el balance energético utilizando el método de transferencia de masa en una superficie de agua abierta, empleando datos climáticos como la duración de la insolación, la temperatura, la humedad del aire y la velocidad del viento. (Allen et al., 2006, p.18)

1.8.2.2 Método FAO Penman-Monteith

En mayo de 1990, se llevó a cabo una reunión entre la Comisión Internacional de Riego y Drenaje, la Organización Meteorológica Mundial y otros expertos e investigadores en riego, con el objetivo de examinar los métodos propuestos por la FAO para calcular las necesidades hídricas de los cultivos. Después de discusiones entre investigadores y especialistas en riego, se llegó a la conclusión de que el enfoque combinado Penman-Monteith era el procedimiento preferido para calcular los parámetros necesarios, y se estableció como el método estándar para determinar la evapotranspiración de referencia. Para desarrollar el método Penman-Monteith de la FAO, se utilizó un modelo de cultivo hipotético con una altura supuesta de 0,12 metros, una resistencia superficial de 70 s/m y una deflexión de 0,23, que simula las condiciones de evapotranspiración en una extensa área de hierba verde. Es importante señalar que se consideró que la hierba tiene una altura uniforme, está en un estado activo de crecimiento y recibe un riego adecuado. (Allen et al., 2006, p.15)

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{900}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34)u_2} \dots\dots\dots \text{Ec. 1.4}$$

ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

R_n = Radiación neta que llega a la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹)

R_a = Radiación extraterrestre (mm día⁻¹)

G = Flujo de calor del suelo (MJ m⁻² día⁻¹)

T = Temperatura media del aire (°C)

u₂ = Velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹)

e_s = Presión de vapor de saturación (kPa)

e_a = Presión de vapor (kPa)

$(e_s - e_a)$ = Déficit de presión de vapor (Kpa)

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor (k Pa °C⁻¹)

γ = Constante psicrométrica (KPa °C⁻¹)

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.665 + 10^{-3} \dots \dots \dots \text{Ec. 1.4.1}$$

P = Presión atmosférica (kPa)

λ = Calor latente de vaporización, 2, 45 (MJ kg⁻¹)

C_p = Calor específico a presión constante, 1,013 x 10⁻³ (MJ kg⁻¹ °C⁻¹)

ε = Cociente del peso molecular de vapor de agua /aire seco = 0,622 (ANEXO B, Tabla B-5)

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27 T}{T + 237.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2} \dots \dots \dots \text{Ec. 1.4.2}$$

Δ = Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor a la temperatura del aire
T (k Pa °C⁻¹)

T = Temperatura media del aire (°C)

Los valores de pendiente Δ par distintas temperaturas del aire se calcula interpolando del anexo A Tabla (B-6).

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065Z}{293} \right)^{5,26} \dots \dots \dots \text{Ec. 1.4.3}$$

P = Presión atmosférica (kPa)

Z = Elevación sobre nivel del mar (m)

Los valores de la presión atmosférica en función de la altitud se presentan en anexo B (tabla B-7)

1.8.2.3 Método Hargreaves en base a la radiación solar

Los elementos meteorológicos requeridos para implementar este método incluyen la temperatura promedio mensual, la radiación solar medida, la radiación extraterrestre equivalente, el factor de latitud mensual, la humedad relativa y la altitud. Estos factores pueden emplearse para estimar la evapotranspiración potencial.. (Vásquez et al., 2017, p.185)

$$ET_o = 0.004 * TMF * RS \dots\dots\dots Ec. 1.5$$

ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm mes⁻¹)

RS = Radiación solar media mensual (cal/cm²/día), medida.

TMF = Temperatura media mensual en grados Fahrenheit (°F), medida

$$TMF = \frac{9}{5} * T_{media} (°C) + 32 \dots\dots\dots Ec. 1.6$$

1.8.2.4 Método Hargreaves en base a la temperatura

La temperatura media mensual, el factor de latitud mensual, la humedad relativa y la altitud son los datos meteorológicos necesarios para utilizar este procedimiento. (Vásquez et al., 2017, p.185)

$$ET_o = MF * TMF * CH * CE \dots\dots\dots Ec. 1.7$$

Dónde:

ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm mes⁻¹)

MF = Factor mensual de latitud (ANEXO B, Tabla B-4)

TMF = Temperatura media mensual (°F), medida

CH = Factor de corrección para la humedad relativa, y

CE = Factor de corrección para la altura o elevación del lugar

$$CH = 0.166(100 - HR)^{0.5} \dots\dots\dots Ec. 1.8$$

Dónde:

HR = Humedad relativa media mensual (%), medida.

Si, $HR > 64\%$, se emplea la fórmula anterior, en caso $HR < 64\%$, $CH = 1$, y

$$E = 1 + 0.04 * \frac{E}{2000} \dots\dots\dots \text{Ec. 1.9}$$

E = Latitud o elevación del lugar (msnm)

1.8.2.5 Obtención de la radiación solar incidente (Rs)

Rs: la cantidad de radiación solar recibida en la superficie terrestre es solo una fracción de la radiación total que llega desde el espacio exterior. La radiación solar directa, conocida como Ra, se puede medir directamente; en caso de que estos datos no estén disponibles en la región de interés, se puede calcular utilizando la fórmula siguiente.

$$Rs = \left(0.25 + 0.50 * \frac{n}{N}\right) * Ra \dots\dots\dots \text{Ec. 1.10}$$

Donde:

n/N = Relación entre las horas reales (n) y las horas máximas posibles (N) de fuerte insolación.

Ra = Radiación extraterrestre que se recibe antes de llegar a la atmósfera. Se expresa equivalente de evaporación de agua (mm/día). (ANEXO B, Tabla B-2)

Los valores de n se obtienen de la lectura de heliógrafos en las estaciones meteorológicas.

1.8.2.6 Método Jensen – Haise

Basándose en la radiación y la temperatura, Jensen y Haise (1963) crearon una ecuación para predecir la evapotranspiración potencial en milímetros por día utilizando datos de áreas áridas del oeste de Estados Unidos (Bochetti; 2010).

$$ET_o = Rs(0.025T + 0.08) \dots\dots\dots \text{Ec. 1.11}$$

Donde:

ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

T = Temperatura media (°C)

Rs = Radiación solar que llega al nivel de suelo mm/día.

1.8.2.7 Método Makkink

Después de contrastar los resultados obtenidos mediante el método de Penman con los datos provenientes de lisímetros en las condiciones ambientales típicas de los Países Bajos, la técnica de Makkink se revela como una versión modificada de la ecuación de Penman. (Ortiz & Chile; 2020).

$$ET_o = 0.61 * \frac{R_s}{\lambda} \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) - 0.12 \dots \dots \dots \text{Ec. 1.12}$$

ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

Δ = Pendiente de la curva de variación de la presión (kPa °C⁻¹)

λ = Calor latente de vaporización (MJ kg⁻¹).

γ = Constante psicrométrica (kPa °C⁻¹)

R_s = Radiación solar que llega al nivel de suelo mm/día.

1.8.2.8 Método de Turc

Según Turc, (1961 citado por Huaccoto, 2017) Con ayuda de este proceso, se puede determinar la evapotranspiración potencial mensual en milímetros con de la temperatura, la radiación solar y la humedad relativa. Se modificó para situaciones en las que la humedad relativa menor al 50%, aunque se creó en regiones húmedas de Europa.

ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

$$ET_o = C_i K_i \left(\frac{t_{med}}{t_{med} + 15} \right) (R_i + 50) \dots \dots \dots \text{Ec. 1.13}$$

C_i = Es un factor de ajuste aplicable en regiones áridas, el cual varía en función de la humedad relativa mensual.

Cuando la humedad relativa supera el 50%, el valor de C_i se establece en 1. En situaciones contrarias:

$$C_i = \left(\frac{1 + 50 - HR}{70} \right) \dots \dots \dots \text{Ec. 1.14}$$

Donde:

ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm mes^{-1})

HR = Humedad relativa media mensual en porcentaje.

K_i = El factor de ajuste mensual varía según el mes: es de 0.40 para meses de 30 y 31 días, de 0.37 para febrero, y de 0.13 para períodos de 10 días.

T_{med} = Temperatura media mensual del aire expresada en °C.

R_i = La radiación global incidente, también conocida como radiación de onda corta que llega a la superficie terrestre, se expresa en $\text{cal/cm}^2\text{día}$.

$$R_i = R_a(0.18 + 0.62) * \frac{n}{N} \dots\dots\dots \text{Ec. 1.15}$$

R_a = Radiación solar extraterrestre (ANEXO B, Tabla B-2).

n = El promedio de horas de insolación intensa registrado en el lugar.

N = El máximo de horas de sol para el mes en cuestión, determinado por la latitud (ANEXO B, Tabla B-3).

Tabla 3

Parámetros requeridos para calcular evapotranspiración de referencia

Autor	T	H	V	RS	n	Ra	Fórmulas
FAO Penman Monteith	✓	✓	✓	✓	✓	✓	$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{900}{T + 273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34)u_2}$
Método Hargreaves en base a la radiación solar	✓			✓		✓	$ET_o = 0.004 * TMF * RS$
Método Hargreaves en base a la temperatura	✓	✓					$ET_o = MF * TMF * CH * CE$

Método Jensen – Haise	✓	✓	$ET_o = R_s(0.0252T + 0.078)$			
Método Makkink	✓	✓	$ET_o = 0.61 * \frac{R_s}{\lambda} \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) - 0.12$			
Turc (1961)	✓	✓	✓	✓	✓	$ET_o = C_i K_i \left(\frac{t_{med}}{t_{med} + 15} \right) (R_i + 50)$

Nota: T: Temperatura, R: Humedad relativa, V: Velocidad de viento, RS: Radiación solar, n: Horas insolación, Ra: Radiación extraterrestre, ET_o: Evapotranspiración de referencia.

Tabla 4

Fórmulas y unidad de medida de evapotranspiración de referencia de diferentes métodos

Autor	Fórmulas	Und
FAO Penman Monteith	$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34)u_2}$	mm/día
Método Hargreaves en base a la radiación solar	$ET_o = 0.004 * TMF * RS$	mm/mes
Método Hargreaves en base a la temperatura	$ET_o = MF * TMF * CH * CE$	mm/mes
Método Jensen – Haise	$ET_o = R_s(0.0252T + 0.078)$	mm/día
Método Makkink	$ET_o = 0.61 * \frac{R_s}{\lambda} \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) - 0.12$	mm/día

Turc (1961)	$ET_o = C_i K_i \left(\frac{t_{med}}{t_{med} + 15} \right) (R_i + 50)$	mm/mes
-------------	---	--------

Nota: Fórmulas empíricas de evapotranspiración de referencia

1.9 Métodos estadísticos para comparación de resultados

Canales (2015 citado por Huaccoto 2017): menciona, que el proceso de correlación traslada la aceptación como simulador confiable del método físico, quiere decir que no significa que los resultados deben admitirse como estrictamente verdadero, si no que la estructura no contenga errores lógicos. El método más habitual para evaluar la precisión de las predicciones es la medición estadística de errores, que emplea valores absolutos o tablas de errores estadísticos. En general, cuanto menor sea la suma de errores, más precisa será la predicción.

Tabla 5

Parámetros estadísticos empleados para contrastar los métodos de ETo

Indicadores estadísticos	Ecuación	Valor óptimo
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}}$	0
Error porcentual (PE)	$PE = \left \frac{P - O}{O} \right * 100$	0
Índice de concordancia (d)	$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - O + O_i - O)^2} \right]$	1
Coefficiente de correlación (r)	$r = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - O)(P_i - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - O)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - P)^2}}$	1
Índice de confianza (c)	$c = r \cdot d$	1

Nota: Variables: Donde: Pi es el valor estimado; P es la media de los valores estimados; Oi es el valor observado; y O es la media de los valores observados.

CAPÍTULO II METODOLOGÍA

2.1 Ubicación y características generales de la zona

2.1.1 Ubicación política

La zona de estudio en la que se realizó el trabajo de investigación es en la estación meteorológica automática INIA-Canaán. Que se encuentra situada en el distrito de Huamanga, provincia de Huamanga región Ayacucho.

Región: Ayacucho
Provincia: Huamanga
Distrito: Huamanga
Lugar: INIA – Cannán

2.1.2 Ubicación geográfica

Latitud: 13°10'00.06"
Longitud: 74°12'22.92"
Altitud: 2756 m.s.n.m
Zona: 18S
Datum: WGS84

2.1.3 Descripción climática del ámbito del estudio

Precipitación

De acuerdo con los registros de la estación meteorológica INIA en la región de estudio, la precipitación media anual durante el período de 2013 a 2018 fue de 515.68 mm. A lo largo del año, las cifras mensuales oscilan desde 1.78 mm en julio hasta 99.68 mm en febrero, destacándose como los meses de mayor precipitación diciembre, enero, febrero y marzo.

Temperatura

Según los registros de la estación meteorológica INIA en la región de estudio, se observa una temperatura promedio mensual del aire de 17.22 °C. Las temperaturas máximas promedio alcanzan los 26.38 °C en noviembre, mientras que las mínimas promedio descienden a 7.61 °C en julio. Se identifica un período "frío" entre mayo y agosto, y un período "caliente" de septiembre a abril.

Humedad relativa

De acuerdo con los datos registrados por la estación meteorológica INIA en la zona de estudio, se observa que la humedad relativa tiene un promedio mensual de 85.46 % en marzo y de 72.90 % en mayo. Esto indica que durante el mes de mayo se experimenta una mayor evaporación del suelo en comparación con otros meses.

Velocidad del viento

Según los registros de la estación meteorológica INIA en la región de estudio, se observa que las velocidades del viento alcanzan su máximo de 2.91 m/s (vientos fuertes) entre los meses de octubre y febrero, mientras que registran un mínimo de 1.45 m/s en junio

Horas sol

Según los datos recopilados por la estación meteorológica INIA en la región de estudio, se observa que la duración de las horas de sol es más extensa durante los meses de mayo a septiembre, así como en noviembre. Por otro lado, los meses con menor cantidad de horas de sol son octubre, diciembre y los meses que van desde enero hasta abril.

Evaporación

De acuerdo con los registros de la estación meteorológica INIA en la región de estudio, la evaporación medida por el tanque evaporímetro muestra un promedio anual de 129.87 mm. A nivel mensual, este valor varía desde 142.90 mm en agosto hasta 105.65 mm en febrero.

2.2 Materiales, equipos y herramientas

2.2.1 Materiales

2.2.1.1 Información meteorológica

La información meteorológica se obtuvo elaborando una solicitud a la institución encargada de la estación meteorológica de gobierno regional de Ayacucho Oficina de OPEMAN, institución encargada de registro de datos, con los siguientes parámetros:

1. Temperatura máxima y mínima
2. Humedad relativa
3. Velocidad del viento
4. Horas sol
5. Evaporación diaria de tanque clase A

La evapotranspiración de referencia no podría estimarse sin estos datos meteorológicos.

2.2.2 Equipos y programas de cómputo

2.2.2.1 Materiales de escritorio

Para el trabajo de investigación se utilizó papel bond A4, memoria USB 4GB, tintas de impresoras, materiales de escritorio (marcadores, lapiceros, lápiz, borrador, etc)

Materiales y equipos de campo

Para el presente trabajo de investigación se utilizó cámara fotográfica y entre otros.

Materiales y equipos de gabinete

Para el presente trabajo de investigación se utilizó una computadora portátil toshiba coreI7, impresora multifuncional epon L210, fotografías digitalizadas,

bibliografías necesarias, Google Earth Pro, Microsoft Office 2016, PETP V2.0.0, CROPWAT 8.0.

2.3 Problema específico

A. ¿Cómo es la estimación de evapotranspiración de referencia mediante modelos alternativos en comparación con registros de evaporación de tanque evaporímetro clase “A” en la estación meteorológica INIA-Ayacucho?

El enfoque de investigación es cuantitativo debido a que contiene variables, ya que los datos de los indicadores son valores medibles numéricos. El tipo de investigación según su objetivo de estudio es aplicativo, según su metodología o nivel de profundización es descriptiva comparativa ya que contrasta comportamiento de ETo, estimado por modelos alternativos en función al método tanque evaporímetro, y según su manipulación de variable es no experimental.

La población es el total de datos meteorológicos de la estación meteorológica automática INIA-Canaán correspondiente al dato historial del año 2013 a 2021. Estación meteorológica de Ayacucho.

La muestra consiste en el conjunto de información meteorológica mensual, que incluye datos como la temperatura mínima, temperatura media, temperatura máxima, humedad relativa, horas de sol, velocidad del viento y evaporación. Estos datos corresponden al periodo entre 2013 y 2021 y provienen de la estación meteorológica automática INIA-Canaán.

2.3.1 Técnicas e instrumentos de recojo de datos

La técnica empleada en este trabajo de investigación es una combinación de técnicas de observación y análisis de contenido ya que su instrumento de observación son guías de observación como revisiones bibliográficas, análisis de contenido es cuadro de registros que se obtuvo datos meteorológicos de la estación meteorológica INIA Canaán del periodo 2013-2021.

A. Fase preliminar

Para este trabajo de investigación se indagó bibliografías referidos en temas de publicación, de igual manera se ha recopilado diversos modelos alternativos de los estudios hechos similares a la zona de estudio, como también hojas de cálculo y software referente a este tema.

B. Fase de campo

En esta fase se realizó recopilación de datos fuera del gabinete con tal de conseguir los objetivos propuestos. Para visita, recopilación de datos meteorológica se elaboró una solicitud a la institución representante que maneja la estación meteorológica el Gobierno Regional de Ayacucho oficina de OPEMAN institución encargada de registro de datos meteorológicos.

Se realizó la visita a la estación meteorológica automática de INIA, con fin de observar y reafirmar el funcionamiento de los instrumentos meteorológicos, y que no existe carencia de datos registrados independiente. Comprobando la funcionalidad y operatividad de los equipos meteorológicos, se pasó a recopilar la información respectiva confiable de la estación meteorológica INIA – Canaán de los periodos de 2013-2021.

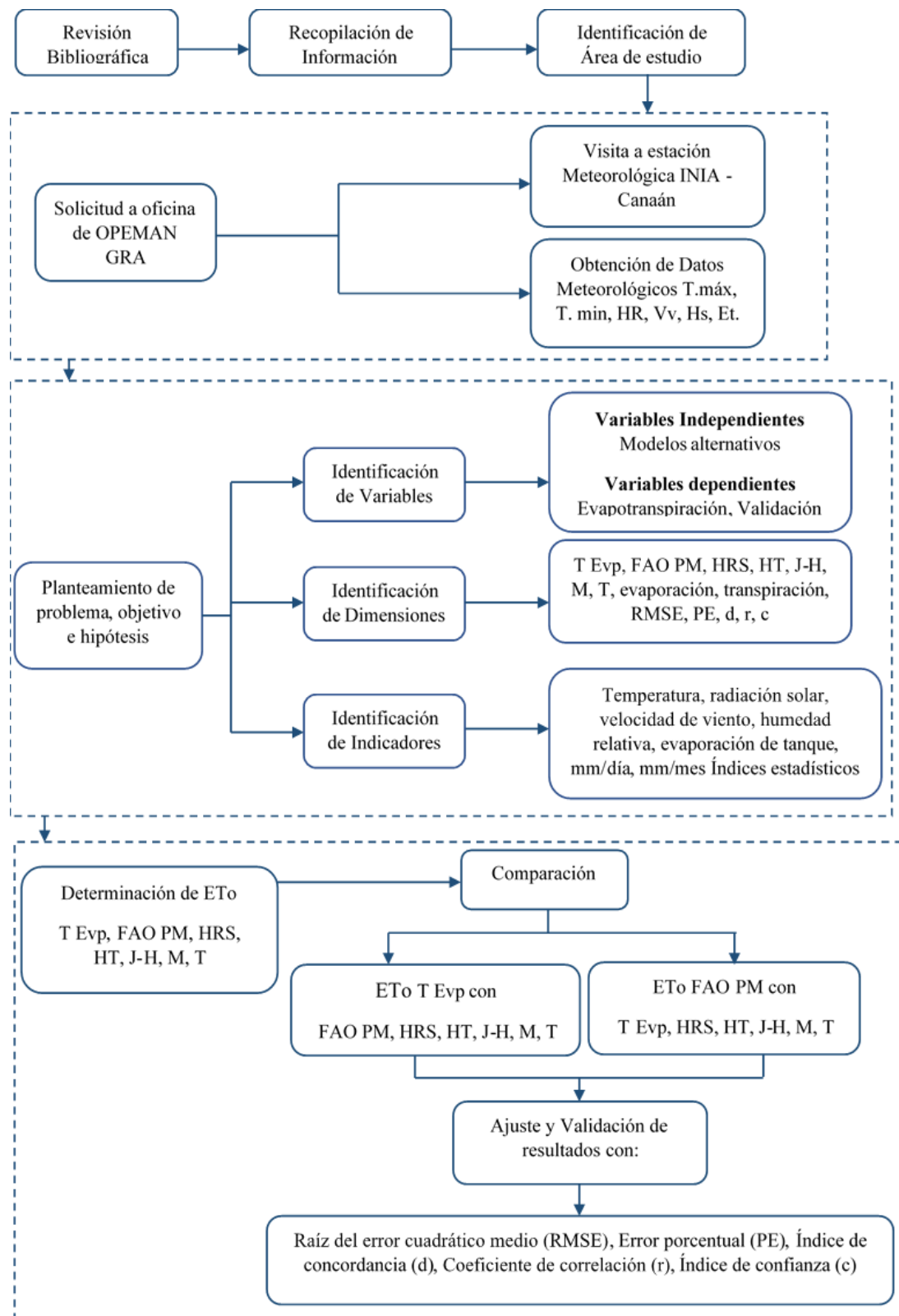
Para el presente trabajo de investigación se recolectaron los datos meteorológicos, (evaporación de tanque, horas sol, velocidad de viento, temperatura máxima, humedad relativa, temperatura mínima), correspondientes del año 2013-2021 de la estación meteorológica automática INIA-Canaán.

C. Fase de gabinete

En este período de gabinete se ejecutó el procesamiento de información obtenida con los datos proporcionados por la institución encargada de registrar datos OPEMAN de gobierno regional de Ayacucho, para este se utilizó la siguiente metodología para determinar la evapotranspiración.

Figura 8

Metodología para calcular evapotranspiración de referencia y realizar comparación



2.3.2 Técnicas de procesamiento y análisis de la información

a Técnicas de procesamiento

Se empleó el programa CROPWAT 8.0, diseñado por Joss Swennenhuis para la Unidad de Fomento y Gestión de las Aguas de la FAO, como herramienta para procesar los datos y calcular la evapotranspiración de referencia mediante el método de FAO Penman-Monteith. Este software, desarrollado por la FAO, está destinado a determinar las necesidades de agua para el riego en áreas agrícolas, centrándose inicialmente en la estimación de la evapotranspiración de referencia utilizando datos climáticos diarios o mensuales.

Gutiérrez (2016), los otros métodos fueron calculados con el software PETP 2.0, en el año 2011 este software fue desarrollado con la finalidad de simplificar los cálculos de ETo. PETP 1.0 con pocas herramientas y con algunas deficiencias de ingreso de datos, este software y su manual ha sido presentado al programa de investigación en agua y energía (PIAE) de la facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, en el año 2016 se mejoró la aplicación obteniendo la versión de Software PETP 2.0, el cual tiene sistematizado cada uno de las metodologías desarrolladas de evapotranspiración de referencia.

2.3.3 Metodología de estimación de la evapotranspiración tanque evaporímetro

Se recopilaron los datos mensuales de velocidad del viento, humedad relativa y evaporación del tanque de la estación meteorológica automática INIA - Canaán para calcular la evapotranspiración de referencia utilizando el método del tanque evaporímetro de Clase A.”

Para estimación de ETo mediante tanque evaporímetro es la relación de evaporación de tanque por un coeficiente de tanque evaporímetro que está en función de cobertura del suelo, velocidad de viento y humedad relativa.

Ecuación de ETo de tanque evaporímetro

$$ETo = Kp Epan \dots \dots \dots \text{Ec. 2.1}$$

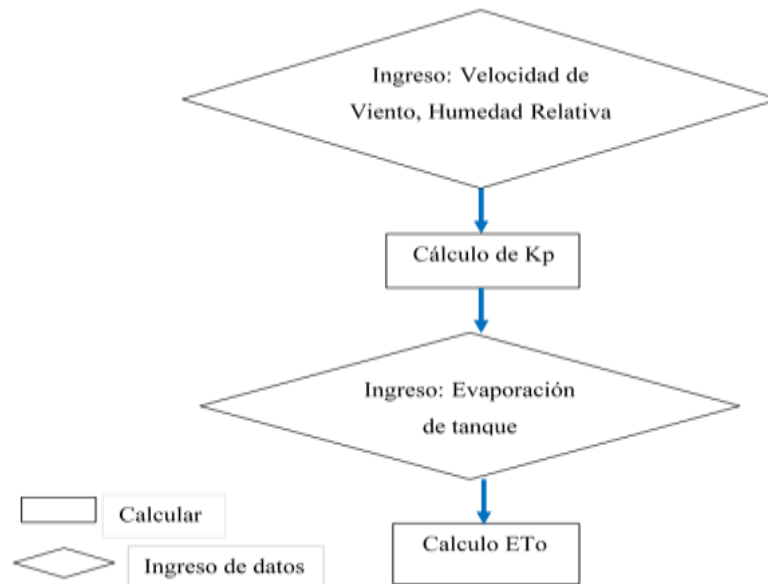
ETo = Evapotranspiración de referencia (mm/día)

Kp = Coeficiente del tanque evaporímetro (ANEXO B, Tabla B-1)

E_{pan} = Evaporación del tanque evaporímetro (mm/día).

Figura 9

Diagrama de flujo evapotranspiración de referencia tanque evaporímetro



2.3.4 Metodología de estimación de la evapotranspiración por FAO Penman Monteith

Formula:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{900}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34)u_2} \dots\dots\dots \text{Ec. 2.2}$$

ET_0 = Evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

R_n = Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹)

R_a = Radiación Extraterrestre (mm día⁻¹)

G = Flujo de calor del suelo (MJ m⁻² día⁻¹)

T = Temperatura media del aire (°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 de vapor (kPa)

$(e_s - e_a)$ = Déficit de presión de vapor (Kpa)

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor (k Pa °C⁻¹)

γ = Constante psicométrica (KPa °C⁻¹)

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 + 10^{-3} \dots \text{Ec. 2.3}$$

P = presión atmosférica (kPa)

λ = calor latente de vaporización, 2, 45 (MJ kg⁻¹)

c_p = Calor específico a presión constante, 1,013 x 10⁻³ (MJ kg⁻¹ °C⁻¹)

ϵ = Cociente del peso molecular de vapor de agua /aire seco = 0,622, (ANEXO B, Tabla B-5)

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27 T}{T + 237.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2} \dots \text{Ec. 2.4}$$

Δ = Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor a la temperatura del aire T (k Pa °C⁻¹)

T = Temperatura media del aire (°C), (ANEXO B, Tabla B-6).

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \dots \text{Ec. 2.5}$$

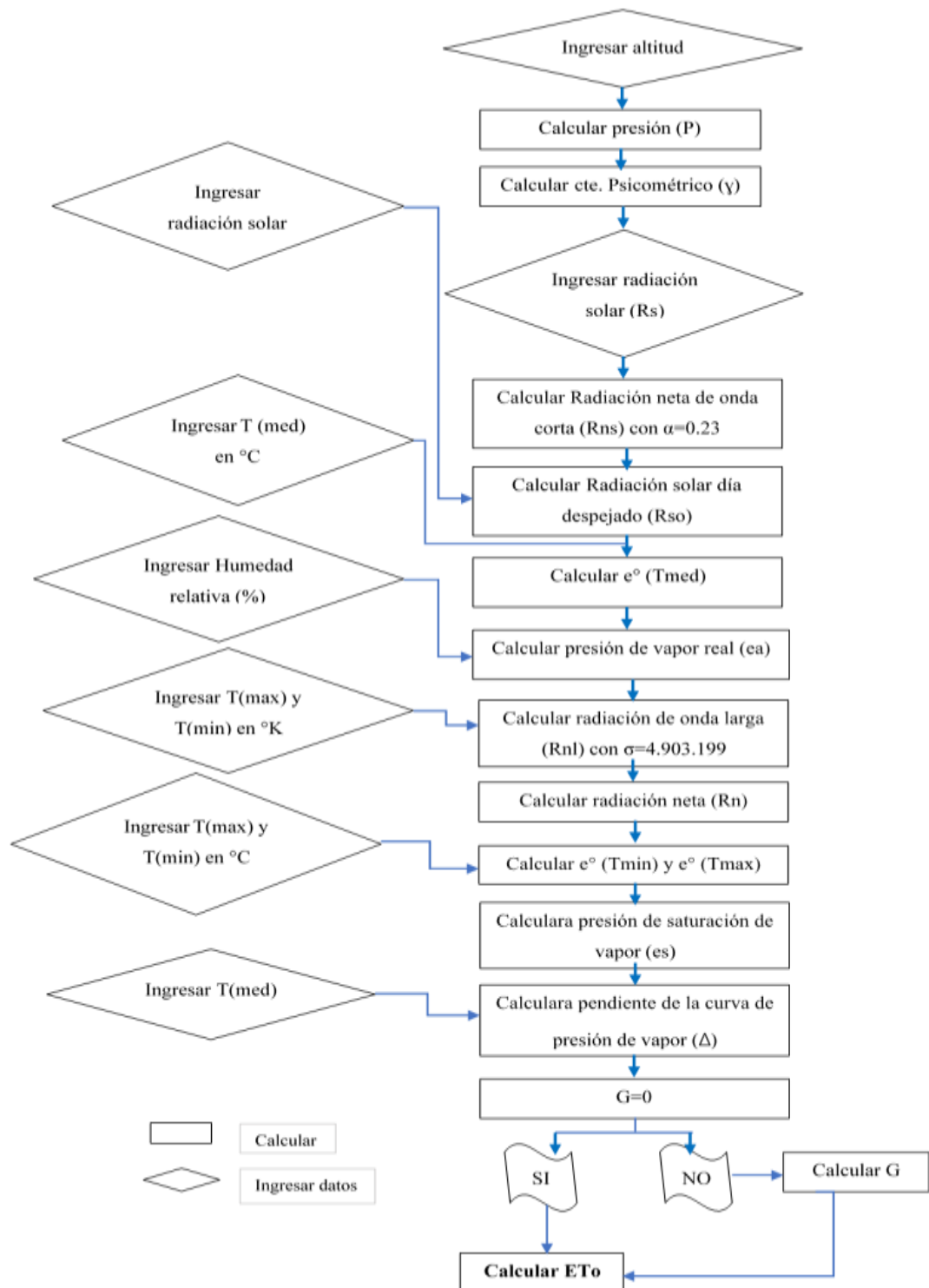
P = Presión atmosférica (kPa)

Z = Elevación sobre nivel del mar (m)

Los valores de la presión atmosférica en función de la altitud se presentan en (ANEXO B, Tabla B-7)

Figura 10

Diagrama de flujo evapotranspiración FAO Penman Monteith



2.3.5 Metodología de estimación de la evapotranspiración por Hargreaves en base a la radiación solar

Para aplicar este procedimiento, se necesitan los siguientes datos meteorológicos: La temperatura y la radiación pueden servir de base para posibles cálculos de evapotranspiración. (Vásquez et al., 2017, p.185)

$$ET_o = 0.004 * TMF * RS \dots\dots\dots Ec. 2.6$$

ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm mes⁻¹)

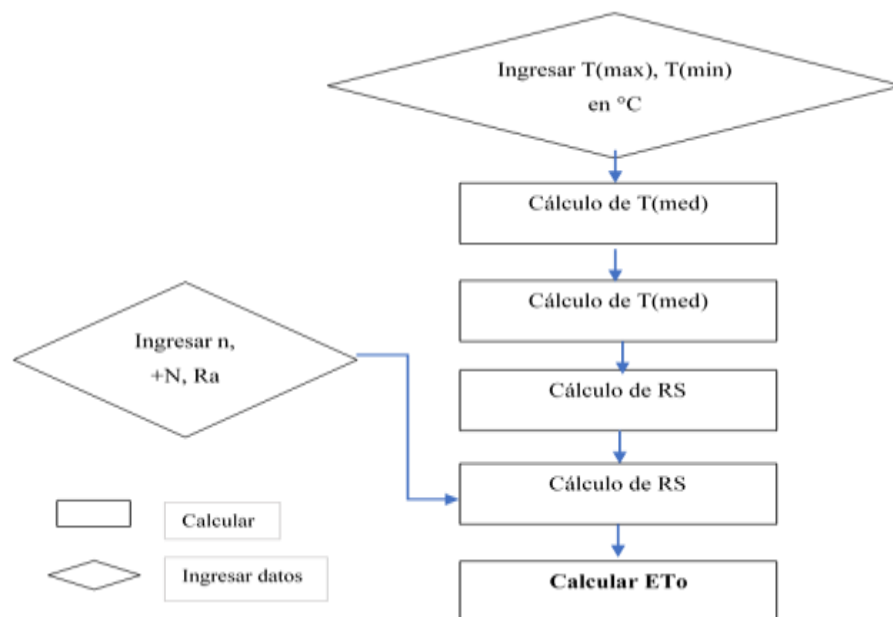
RS = Radiación solar media mensual (cal/cm²/día), medida.

TMF =Media mensual de temperatura en grados fahrenheit (°F), medida

$$TMF = \frac{9}{5} * T_{media} x (^{\circ}C) + 32 \dots\dots\dots Ec. 2.7$$

Figura 11

Diagrama de flujo evapotranspiración Hargreaves en base a la radiación solar



2.3.6 Metodología de estimación de la evapotranspiración por Hargreaves en base a la temperatura

La aplicación de este método requiere los siguientes datos meteorológicos: altitud, humedad relativa, factor de latitud mensual, temperatura media mensual.

$$ET_o = MF * TMF * CH * CE \dots\dots\dots Ec. 2.8$$

Dónde:

ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm mes⁻¹)

MF = Factor mensual de latitud (ANEXO B, Tabla B-4)

TMF = Temperatura media mensual (°F), medida

CH = Factor de corrección para la humedad relativa

CE = Factor de corrección para la altura o elevación del lugar

$$CH = 0.166(100 - HR)^{0.5} \dots\dots\dots Ec. 2.9$$

Dónde:

HR = Humedad relativa media mensual (%), medida.

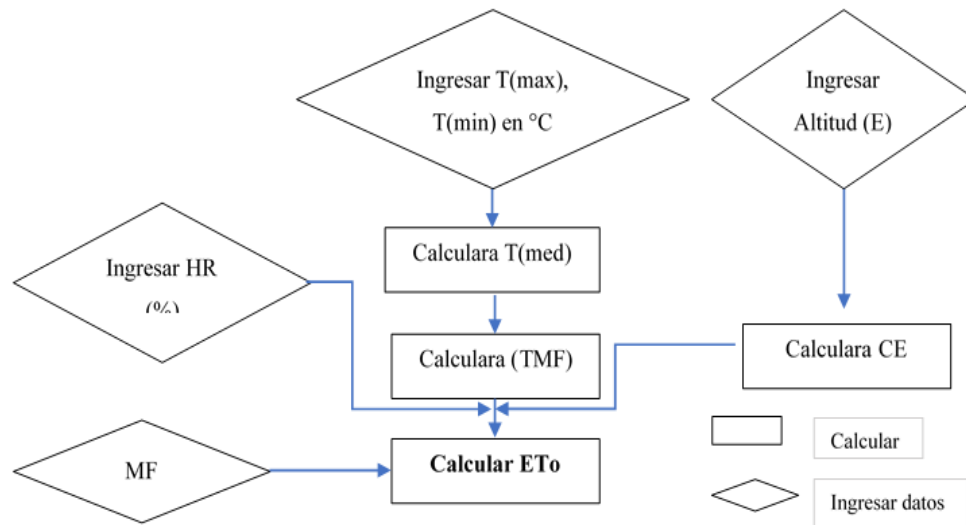
Si la humedad relativa es superior al 64%, se utiliza la fórmula mencionada anteriormente; si es inferior al 64%, se asigna un valor de 1 a CH.

$$CE = 1 + 0.04 * \frac{E}{2000} \dots\dots\dots Ec. 2.10$$

E = Latitud o elevación del lugar (msnm)

Figura 12

Diagrama de flujo evapotranspiración Hargreaves en base a la temperatura



2.3.7 Metodología de estimación de la evapotranspiración por Jensen – Haise

Tras recopilar datos de lugares áridas del oeste de Estados Unidos, Jensen y Haise (1963) crearon una ecuación basada en la temperatura y la radiación que podía utilizarse para tasar la evapotranspiración de referencia en milímetros por día. (Bochetti; 2010)

$$ET_o = R_s(0.025T + 0.08) \dots\dots\dots \text{Ec. 2.11}$$

Donde:

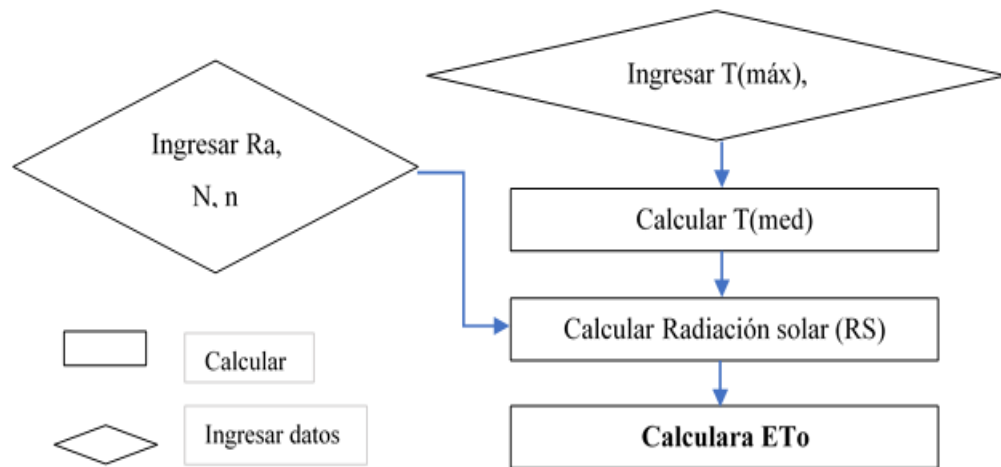
ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm día^{-1})

T = Temperatura media ($^{\circ}\text{C}$)

R_s = Radiación solar que llega al nivel de suelo mm/día . Con ecuación 1.10.

Figura 13

Diagrama de flujo evapotranspiración Jensen – Haise



2.3.8 Metodología de estimación de la evapotranspiración por Makkink

Tras comparar los datos del método de Penman con los productos derivados de los lisímetros para las circunstancias medioambientales holandesas, la técnica de Makkink es una adaptación de la ecuación de Penman. (Ortiz & Chile; 2020).

$$ET_o = 0.61 * \frac{R_s}{\lambda} \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) - 0.12 \dots \dots \dots \text{Ec. 2.12}$$

ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹)

Δ = Pendiente de la curva de variación de la presión (kPa °C⁻¹)

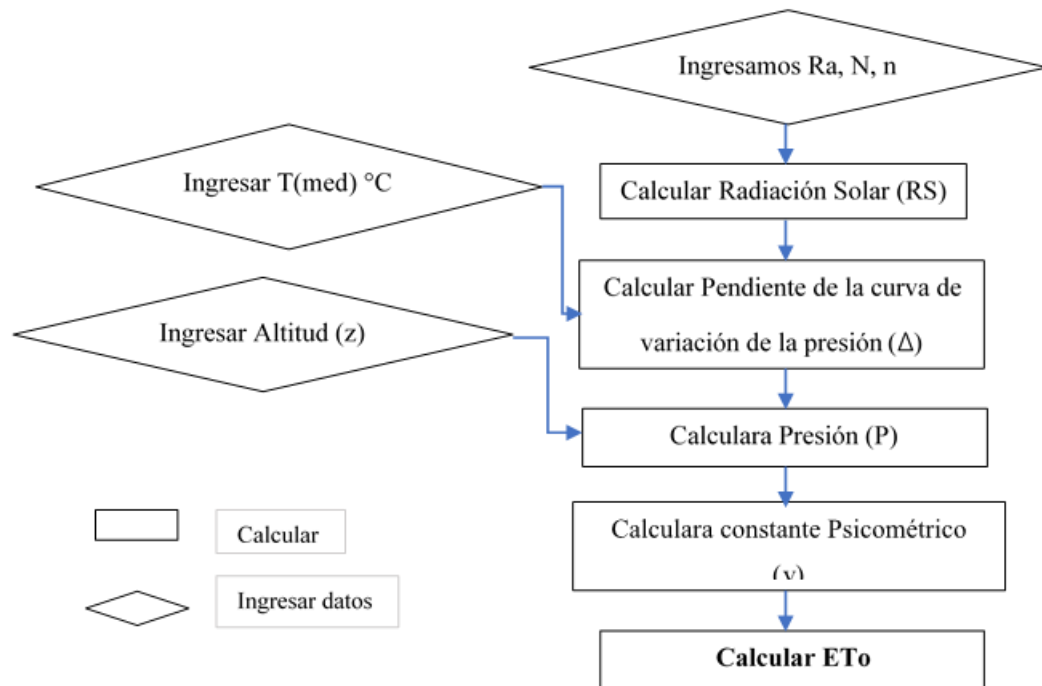
λ = Calor latente de vaporización (MJ kg⁻¹).

γ = Constante psicrométrica (kPa °C⁻¹)

R_s = Radiación solar que llega al nivel de suelo mm/día.

Figura 14

Diagrama de flujo evapotranspiración Makkink



2.3.9 Metodología de estimación de la evapotranspiración por Turc

Este enfoque metodológico posibilita el cálculo mensual de la evapotranspiración potencial en milímetros, considerando la temperatura, la radiación solar y la humedad relativa, según el método de Turc. (1961 citado por Huaccoto, 2017). Aunque se creó en regiones húmedas de Europa, se ha modificado para situaciones de humedad relativa es menor al 50%.

ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm día^{-1})

$$ET_o = C_i K_i \left(\frac{t_{med}}{t_{med} + 15} \right) (R_i + 50) \dots \dots \dots \text{Ec. 2.13}$$

C_i = Se trata de un factor de ajuste diseñado para áreas secas, el cual está influenciado por la humedad relativa mensual.

$$C_i = \left(\frac{1 + 50 - HR}{70} \right) \dots \dots \dots \text{Ec. 2.14}$$

Donde:

ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm mes^{-1})

HR = Humedad relativa media mensual en porcentaje.

Ki =

El factor de ajuste mensual varía según la duración del mes: es de 0.40 para meses de 30 y 31 días, de 0.37 para febrero y de 0.13 para períodos de 10 días.

Tmed = La temperatura promedio mensual del aire medida en °C.

Ri = Radiación total incidente o radiación de onda corta que llega a la superficie terrestre cal/cm²día.

$$Ri = Ra(0.18 + 0.62) * \frac{n}{N} \dots\dots\dots \text{Ec. 2.15}$$

Ra= Radiación solar extraterrestre (ANEXO B, Tabla B-2).

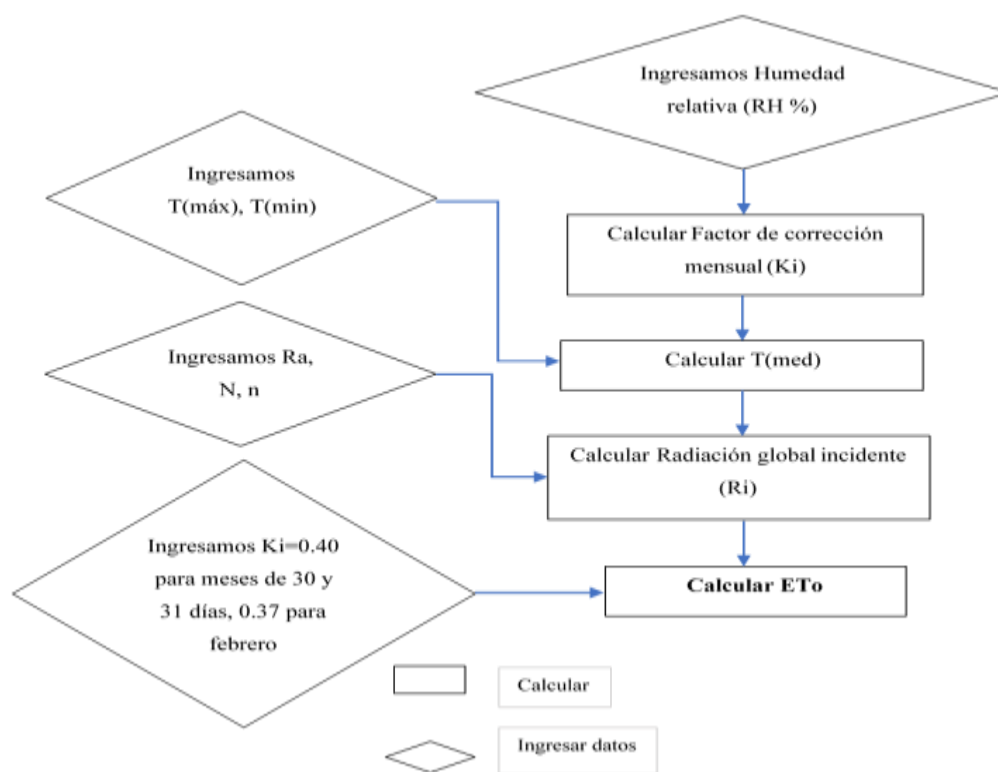
n = Horas de exposición solar intensa promedio registradas en el área

N = Cantidad máxima de horas de sol registradas para el mes específico, según la latitud correspondiente (ANEXO B, Tabla B-3).

Según Olarte (1987) cualquier método empírico en base a radiación son más precisos, especialmente si se cuenta con radiación neta (Rn), mientras Los métodos basados en la meteorología son notoriamente empíricos debido a un inconveniente bien conocido: los parámetros climáticos están desfasados con respecto a la evapotranspiración y mientras que la radiación es constante en correlación plana. Por ello la FAO mediante la evaluación de diversos expertos e investigadores en este tema recomienda la fórmula de FAO Penman Monteith, ya que los resultados obtenidos por esta fórmula son más exactos a la realidad y cuenta con una amplia base científica, y en su procesamiento de datos mezcla principales factores climáticos que afecta a pesar de que el método de Hargreaves ofrece una alternativa para estimar la evapotranspiración, se considera complicado y requiere múltiples datos climáticos. Por lo tanto, se sugiere utilizar la ecuación de Hargreaves, que se basa en registros mensuales de radiación media en cal/cm²/día. Esto se respalda con investigaciones realizadas en la sierra peruana, específicamente en Huayao en Huancayo y Weberbauer en Cajamarca, por el ingeniero Abelardo de la Torre V. como parte del programa de asistencia técnica CID-ATA/CLASS del plan Maris I en 1978, que concluyeron y recomendaron el uso del método Hargreaves basado en registros de radiación.

Figura 15

Diagrama de flujo evapotranspiración Turc



B. ¿Los resultados obtenidos de modelos alternativos para estimar la evapotranspiración serán comparados con el método del tanque evaporímetro clase A en la estación meteorológica INIA-Canaán para ajustarlos.?

Para el análisis de comparación gráficamente y estadísticamente de los resultados de la evapotranspiración se utilizaron graficas de dispersión, indicadores estadísticos, raíz del error cuadrático medio (RMSE), error porcentual (PE), índice de concordancia (d), para la confiabilidad de los métodos, se usó el coeficiente de correlación (r) y el índice de confianza (c), de acuerdo con la sistemática propuesta por Camargo y Sentelhas (1997).

2.3.10 Métodos estadísticos de comparación de resultados

Se consideraron ciertos índices estadísticos para evaluar y comparar la eficacia de los métodos de referencia.

La raíz del error cuadrático medio (RSME),

El error porcentual estimado (PE),

El índice de concordancia (d) (Willmott, 1982).

Se siguió la técnica de Camargo y Sentelhas (1997) para comparar las metodologías utilizando el coeficiente de correlación (r) y el índice de confianza (c).

Tabla 6

Se emplearon indicadores estadísticos para contrastar y evaluar los distintos métodos.

Indicadores estadísticos	Ecuación	Valor óptimo
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}}$	0
Error porcentual (PE)	$PE = \left \frac{P - O}{O} \right * 100$	0
Índice de concordancia (d)	$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - O + O_i - O)^2} \right]$	1
Coeficiente de correlación (r)	$r = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - O)(P_i - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - O)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - P)^2}}$	1
Índice de confianza (c)	$c = r \cdot d$	1

Nota: Variables: Donde: P_i es el valor estimado; P es la media de los valores estimados; O_i es el valor observado; y O es la media de los valores observados. (Camargo y Sentelhas, 1997).

El error cuadrático medio (RMSE), Calcula la cantidad de desviación entre dos conjuntos de datos. La desviación estándar de los residuos, o RMSE, sirve para medir la fiabilidad de la predicción. (Ortiz & Chile, 2020, p.74).

El error porcentual (PE) es el error relativo expresado en porcentaje. En otras frases, te permite saber la discrepancia que existe entre el valor calculado y el real (Ortiz & Chile, 2020, p.74).

Índice de concordancia (d), mide la claridad de los resultados obtenidos por método al anunciar las observaciones. Si el índice de consistencia tiende a 1, se considera que el método tiene mayor precisión (Ortiz & Chile, 2020, p.74).

El coeficiente de correlación de Pearson (r) es una medida estadística que busca identificar la relación entre dos variables a nivel de intervalo o razón. Este coeficiente cuantifica el grado de asociación lineal entre dos variables, X e Y. Es importante destacar que este coeficiente no evalúa la causalidad, por lo que no se considera que una variable sea independiente y la otra dependiente. (Ortiz & Chile, 2020, p.74).

Coeficiente de confiabilidad o índice de confianza (C), establece la exactitud de resultados se calcula, con producto del coeficiente de determinación y el coeficiente de correlación (Ortiz & Chile, 2020, p.74).

Los valores tomados para la interpretación de coeficiente de confiabilidad por (Camargo & Sentelhas, 1997), se aprecia en la tabla 2.5.

Tabla 7

Valores de interpretación de índice de confiabilidad

Valor de c	Desempeño
> 0.85	Óptimo
0.75 a 0.85	Muy bueno
0.66 a 0.75	Bueno
0.61 a 0.66	Mediano
0.51 a 0.60	Tolerable
0.41 a 0.50	Malo
≤ 0.40	Pésimo

Nota: valores de índice de confiabilidad. (Camargo & Sentelhas, 1997)

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se presentan los hallazgos alcanzados en el curso de esta investigación, los cuales han contribuido al logro de los objetivos establecidos. Es decir, la estimación de evapotranspiración a través de la ecuación empírica seleccionada y método directo Tanque evaporímetro clase A, mediante datos meteorológicos de estación INIA, y comparados gráficamente y estadísticamente la correlación lineal del método Tanque evaporímetro clase A, con los métodos empíricos seleccionados.

3.1 Estimación de evapotranspiración de referencia por método directo

3.1.1 Estimación de evapotranspiración por el método de tanque evaporímetro clase A

Para calcular la Evapotranspiración de Referencia (ET_o), se empleó la fórmula 1.2, utilizando datos meteorológicos como la velocidad del viento (m/s), la humedad relativa (%) y la evaporación media diaria del tanque de evaporación (mm/día), los cuales se detallan en el anexo C, tablas C-7, C-4 y C-5 respectivamente. Se respetó la distancia de 100 metros en dirección barlovento, donde la cobertura vegetal circundante cambia en la estación Canaán. El coeficiente de tanque K_p se extrajo del anexo B, tabla B-1, con valores que oscilan entre 0.80 y 0.85. Con estos datos, se calculó la evapotranspiración de referencia correspondiente al año 2014, lo que permitió elaborar la tabla 8.

En la tabla 8 se exhiben los resultados de la evapotranspiración de referencia obtenidos mediante el uso del método del tanque evaporímetro clase A, el cual fue instalado en una superficie de cultivo para todos los meses del año 2013. La misma metodología se aplicó para calcular la ET_o para los años 2014-2021, lo que dio lugar a la creación de la tabla 9.

Tabla 8

*Evapotranspiración de referencia mensual con el método de taque evaporímetro
2013*

Mes	d Días	Ext- dist m	V m/s	HR %	Evaporación de Tanque		Kp	Eto	
					mm/día	mm/mes		mm/día	mm/mes
Ene	31	100	1.94	82.10	4.45	137.88	0.85	3.78	117.20
Feb	28	100	1.86	83.87	4.05	113.42	0.85	3.44	96.41
Mar	31	100	2.02	82.35	4.16	129.02	0.80	3.33	103.22
Abr	30	100	1.91	74.98	4.35	130.56	0.85	3.70	110.98
May	31	100	1.91	75.57	4.02	124.62	0.85	3.42	105.93
Jun	30	100	2.20	74.24	3.55	106.60	0.85	3.02	90.61
Jul	31	100	2.02	76.03	4.01	124.36	0.85	3.41	105.71
Ago	31	100	1.76	71.08	4.48	138.94	0.85	3.81	118.10
Set	30	100	2.26	67.81	5.17	155.02	0.80	4.13	124.02
Oct	31	100	2.15	74.15	4.78	148.10	0.80	3.82	118.48
Nov	30	100	2.78	71.47	5.34	160.16	0.80	4.27	128.13
Dic	31	100	2.00	79.80	5.14	159.24	0.80	4.11	127.39
ETo (mm/año)									1346.16

Tabla 9

Evapotranspiración de referencia del año 2013-2014 de tanque evaporímetro

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	3.78	3.23	2.65	3.66	2.98	3.38	3.30	3.58	3.57
Feb	3.44	3.49	2.99	3.24	3.30	3.39	3.07	2.97	3.51
Mar	3.33	3.10	2.86	3.24	3.09	3.29	3.22	2.87	3.27
Abr	3.70	3.19	3.37	3.43	3.35	3.24	3.24	2.89	3.63
May	3.42	3.41	3.20	3.42	3.33	3.50	3.46	3.05	3.66
Jun	3.02	3.29	3.40	3.02	3.42	3.56	3.98	4.50	3.71
Jul	3.41	3.04	3.76	3.41	3.56	3.40	3.41	4.40	3.93
Ago	3.81	3.70	3.14	3.67	3.57	3.21	4.32	4.43	3.85
Set	4.13	3.57	3.24	4.03	3.95	4.03	4.01	3.59	3.43
Oct	3.82	3.83	3.28	4.08	3.89	3.49	3.55	3.75	3.61
Nov	4.27	4.42	2.99	4.27	4.06	4.00	3.47	4.27	3.41
Dic	4.11	3.89	2.55	4.11	3.80	3.88	3.76	3.76	3.50
Prom	3.69	3.51	3.12	3.63	3.52	3.53	3.57	3.67	3.59

3.2 Estimación de evapotranspiración de referencia por modelos indirectos seleccionados

3.2.1 Estimación de evapotranspiración de referencia de los modelos con el software PETP V2.0.0

Se calcularon los resultados de evapotranspiración de referencia para el periodo de los meses de los años 2013 hasta 2021, con los modelos indirectos: FAO Penman Monteith con software CROPWAT. Método Hargreaves en base a la radiación solar, Hargreaves en base a la temperatura, Jensen – Haise, Makkink, Turc (1961), en base con datos registrados radiación solar, velocidad de viento, humedad relativa, temperatura máxima y mínima, para ello se utilizó el software PETP 2.0.0 desarrollado por el ingeniero agrícola César Vidal Gutiérrez Ninahuamán en el año 2016.

3.2.1.1 Estimación de evapotranspiración referencial método FAO Penman Monteith

Para calcular la ETo se manejó el software CROPWAT 8.0 utilizando los antecedentes meteorológicos de temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa, velocidad de viento y horas sol. En la tabla 10, se presentan estimaciones obtenidos de evapotranspiración de referencia por el modelo de FAO Penman Monteith, para el periodo de todos los meses de año 2013. Tomando la misma metodología se estimó la evapotranspiración para los años 2014-2021, los resultados se apresian en la tabla 11.

Tabla 10

Evapotranspiración de referencia mensual método FAO Penman Monteith-2013

Mes	d	Tmin	Tmax	HR	V	n	Rad	Eto	ETo
	Días	°C	°C	%	m/s	Horas	MJ/m ² /día	mm/día	mm/mes
Ene	31	10.30	24.20	82.00	1.90	6.20	19.90	3.91	121.21
Feb	28	11.80	23.00	84.00	1.90	4.90	17.80	3.47	97.16
Ma	31	11.20	23.90	82.00	2.00	5.90	18.50	3.62	112.22
Abr	30	9.20	25.50	75.00	1.90	7.90	19.80	3.93	117.90
May	31	8.90	24.10	76.00	1.90	7.40	17.10	3.31	102.61
Jun	30	8.40	23.30	74.00	2.20	7.80	16.50	3.18	95.40
Jul	31	7.00	22.50	76.00	2.00	7.60	16.80	3.07	95.17
Ago	31	7.50	24.30	71.00	1.80	8.00	18.90	3.60	111.60
Set	30	9.10	25.60	68.00	2.30	8.00	21.00	4.37	131.10

Oct	31	10.80	24.80	74.00	2.10	6.10	19.20	4.02	124.62
Nov	30	10.60	26.10	71.00	2.80	6.80	20.80	4.62	138.60
Dic	31	10.40	23.50	80.00	2.00	6.80	20.80	4.05	125.55
ETo (mm/año)									1373.14

Tabla 11

Evapotranspiración de referencia FAO Penman Monteith del año 2013-2021

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	3.91	3.79	3.79	4.31	3.75	3.81	4.70	4.23	4.08
Feb	3.47	3.69	3.86	3.37	3.82	3.84	4.30	4.32	3.97
Mar	3.62	3.33	3.62	3.41	3.11	3.78	3.91	4.11	3.56
Abr	3.93	3.31	3.45	3.61	3.47	3.41	4.04	3.98	3.44
May	3.31	3.35	3.31	3.45	3.23	3.44	3.60	3.29	2.99
Jun	3.18	3.16	3.08	3.15	3.12	3.06	3.23	3.15	3.11
Jul	3.07	2.89	3.16	3.21	3.26	3.08	3.47	3.22	3.01
Ago	3.60	3.54	3.48	3.61	3.61	3.47	3.94	3.78	3.57
Set	4.37	3.70	3.93	4.17	4.24	4.22	4.27	3.90	4.05
Oct	4.02	4.09	4.15	4.35	4.34	3.87	4.94	4.07	4.54
Nov	4.62	4.73	4.20	4.49	4.64	4.74	5.05	4.74	4.43
Dic	4.05	3.90	3.63	4.17	4.24	4.71	4.51	4.16	4.48
Prom	3.76	3.62	3.654	3.78	3.74	3.79	4.16	3.91	3.77

3.2.1.2 Estimación de evapotranspiración referencial método Hargreaves en base a la radiación solar

Para calcular ETo se utilizó software PETP V2.0.0, se utilizaron datos meteorológicos temperatura media (°C), horas sol (h), anexo C de las tablas C-3, C-8, respectivamente, para calcular la radiación solar se utilizó la ecuación 1.10, donde se estima los datos a partir de radiación extraterrestre (Ra) anexo B (Tabla B-2), con la relación entre las horas reales (n) y las horas máximas posibles (N) de fuerte insolación anexo B tabla B-3. De esta manera se construye la tabla 12, siguiendo la misma metodología se estimó para 2014 a 2021 se muestra en tabla 13.

Tabla 12

Evapotranspiración de referencia mensual método Hargreaves en base a la radiación solar-2013

Mes	d	Tm	n	TMF	Ra	N	Rs	Eto	Eto
	Días	°C	Horas	°F	mm/día	Horas	cal/cm2/día	mm/mes	mm/día
Ene	31	17.27	6.20	63.09	16.66	12.79	479.97	3.91	121.12
Feb	28	17.41	4.94	63.34	16.36	12.53	428.06	3.87	108.45
Mar	31	17.55	5.94	63.59	15.34	12.16	443.65	3.64	112.85
Abr	30	17.35	7.94	63.23	13.83	11.80	474.43	4.00	119.99
May	31	16.50	7.37	61.70	12.27	11.47	410.00	3.26	101.19
Jun	30	15.86	7.78	60.55	11.37	11.31	395.06	3.19	95.68
Jul	31	14.76	7.63	58.57	11.77	11.41	402.36	3.04	94.26
Ago	31	15.90	7.97	60.62	13.03	11.67	450.74	3.53	109.30
Set	30	17.38	8.03	63.28	14.58	12.00	498.87	4.21	126.28
Oct	31	17.77	6.07	63.99	15.80	12.43	456.95	3.77	116.95
Nov	30	18.35	6.80	65.03	16.46	12.73	498.07	4.32	129.56
Dic	31	16.96	6.80	62.53	16.56	12.89	497.82	4.02	124.51
ETo (mm/año)								1360.14	

Tabla 13

Evapotranspiración de referencia Hargreaves en base a la radiación solar del año 2013-2021

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	3.91	3.71	3.74	4.12	3.93	3.76	4.41	4.39	4.42
Feb	3.87	4.01	4.34	3.81	4.36	4.20	4.74	5.18	4.74
Mar	3.64	3.26	3.74	3.54	3.25	3.88	3.93	4.41	3.92
Abr	4.00	3.28	3.64	3.81	3.75	3.56	4.20	4.30	3.93
May	3.26	3.40	3.14	3.55	3.46	3.74	3.65	3.49	3.20
Jun	3.19	3.13	3.16	3.45	3.42	3.46	3.33	3.57	3.62
Jul	3.04	2.78	3.17	3.49	3.58	3.24	3.42	3.36	3.26
Ago	3.53	3.44	3.32	3.75	3.63	3.55	3.89	3.94	3.80
Set	4.21	3.88	3.87	4.18	4.47	4.38	4.31	4.14	4.30
Oct	3.77	3.90	4.11	4.23	4.12	3.87	4.64	4.22	4.20
Nov	4.32	4.52	4.18	4.30	4.81	4.88	4.90	5.03	4.51
Dic	4.02	3.76	3.55	4.10	4.17	4.58	4.39	4.36	4.53
Prom	3.73	3.59	3.66	3.86	3.91	3.93	4.15	4.20	4.04

3.2.1.3 Estimación de evapotranspiración referencial método Hargreaves en base a la temperatura

Para calcular la ETo se utilizó el software PETP V2.0.0, se utilizaron datos meteorológicos como: temperatura media (°C), humedad relativa (%), anexo C de las tablas C-3, C-4, respectivamente, el factor mensual de latitud (MF) se obtuvo, anexo B tabla B-4, para estimar elemento de corrección de la humedad relativa se usó la ecuación 1.8, y para factor de corrección para la altura o elevación se estimó con la fórmula 1.9, de esta forma se calculó la evapotranspiración de referencia para el año 2013, con lo cual se construyó la tabla 14, siguiendo la misma metodología se estimó para 2014 a 2021 que se muestra en la tabla 15.

Tabla 14

Evapotranspiración de referencia mensual método Hargreaves en base a la temperatura -2013

Mes	d	Tm	HR	MF	TMF	CH	CE	Eto	Eto
	Días	°C	%	mm/mes	°F			mm/día	mm/mes
Ene	31	17.27	82.10	2.66	63.09	0.70	1.06	4.00	124.15
Feb	28	17.41	83.87	2.31	63.34	0.67	1.06	3.67	102.75
Mar	31	17.55	82.35	2.34	63.59	0.70	1.06	3.54	109.64
Abr	30	17.35	74.98	1.98	63.23	0.83	1.06	3.65	109.49
May	31	16.50	75.57	1.76	61.70	0.82	1.06	3.03	94.04
Jun	30	15.86	74.24	1.57	60.55	0.84	1.06	2.81	84.26
Jul	31	14.76	76.03	1.68	58.57	0.81	1.06	2.72	84.24
Ago	31	15.90	71.08	1.92	60.62	0.89	1.06	3.53	109.44
Set	30	17.38	67.81	2.16	63.28	0.94	1.06	4.52	135.46
Oct	31	17.77	74.15	2.47	63.99	0.84	1.06	4.54	140.59
Nov	30	18.35	71.47	2.55	65.03	0.89	1.06	5.16	154.88
Dic	31	16.96	79.80	2.68	62.53	0.75	1.06	4.25	131.87
ETo (mm/año)								1380.81	

Tabla 15

Evapotranspiración de referencia Hargreaves en base a temperatura del año 2013-2021

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	4.00	4.06	3.91	4.29	3.29	4.19	4.93	3.89	3.23
Feb	3.67	3.90	3.48	2.99	3.44	4.08	3.91	3.66	3.10

Tabla 17*Evapotranspiración de referencia Jensen-Haise del año 2013-2021*

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	4.20	3.99	4.00	4.58	4.21	4.01	4.85	4.76	4.79
Feb	3.77	3.94	4.24	3.76	4.20	4.10	4.59	5.10	4.62
Mar	3.93	3.49	4.05	3.83	3.49	4.18	4.23	4.78	4.19
Abr	4.17	3.39	3.79	4.04	3.89	3.69	4.35	4.49	4.05
May	3.45	3.63	3.40	3.81	3.68	3.94	3.86	3.71	3.35
Jun	3.22	3.20	3.20	3.49	3.49	3.46	3.36	3.65	3.66
Jul	3.09	2.90	3.27	3.61	3.67	3.34	3.56	3.52	3.38
Ago	3.68	3.63	3.53	4.02	3.88	3.70	4.06	4.21	4.07
Set	4.39	4.00	4.08	4.41	4.71	4.61	4.48	4.28	4.50
Oct	4.09	4.22	4.50	4.63	4.50	4.22	5.05	4.54	4.67
Nov	4.59	4.85	4.48	4.61	5.14	5.26	5.22	5.42	4.79
Dic	4.29	4.12	3.86	4.49	4.55	4.98	4.77	4.75	4.97
Prom	3.91	3.78	3.87	4.11	4.12	4.12	4.37	4.43	4.25

3.2.1.5 Estimación de evapotranspiración referencial método Makkink

Para calcular la ETo se utilizó el software PETP V2.0.0, se utilizaron datos meteorológicos como: temperatura media (°C), horas sol (h), anexo C de las tablas C-3, C-8, respectivamente, para halla radiación solar se utilizó ecuación 1.10, donde se estima los datos a partir de radiación extraterrestre (Ra) (Tabla B-2), con la relación entre las horas reales (n) y las horas máximas posibles (N) de fuerte insolación anexo B tabla B-3, el constante psicrométrico se obtuvo con la ecuación 1.4.1 y tabla B-4, la pendiente de la curva de presión de vapor se obtuvo con la ecuación 1.4.2 y la tabla B-6 de esta forma calculando la evapotranspiración de referencia para 2017, con lo cual se construyó la tabla 18, siguiendo la misma metodología se estimó para 2014 a 2021 se muestra en tabla 19.

Tabla 18*Evapotranspiración de referencia mensual método Makink -2013*

Mes	d	Tm	n	Δ	Ra	N	Rs	Eto	Eto
	Días	°C	Horas	kPa/°C	mm/día	Horas	mm/día	mm/día	mm/mes
Ene	31	17.27	6.20	0.13	16.66	12.79	8.20	3.48	107.94
Feb	28	17.41	4.94	0.13	16.36	12.53	7.32	3.10	86.78
Mar	31	17.55	5.94	0.13	15.34	12.16	7.58	3.22	99.94

Abr	30	17.35	7.94	0.13	13.83	11.80	8.11	3.44	103.35
May	31	16.50	7.37	0.12	12.27	11.47	7.01	2.92	90.51
Jun	30	15.86	7.78	0.12	11.37	11.31	6.75	2.78	83.35
Jul	31	14.76	7.63	0.11	11.77	11.41	6.88	2.78	86.09
Ago	31	15.90	7.97	0.12	13.03	11.67	7.70	3.19	98.86
Set	30	17.38	8.03	0.13	14.58	12.00	8.53	3.63	108.91
Oct	31	17.77	6.07	0.13	15.80	12.43	7.81	3.34	103.41
Nov	30	18.35	6.80	0.13	16.46	12.73	8.51	3.68	110.38
Dic	31	16.96	6.80	0.12	16.56	12.89	8.51	3.60	111.53
ETo (mm/año)									1191.05

Tabla 19

Evapotranspiración de referencia Makink del año 2013-2021

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	3.48	3.30	3.35	3.59	3.50	3.37	3.89	3.90	3.94
Feb	3.10	3.19	3.48	3.02	3.52	3.37	3.83	4.15	3.81
Mar	3.22	2.89	3.32	3.13	2.89	3.45	3.50	3.93	3.50
Abr	3.44	2.81	3.12	3.23	3.23	3.06	3.63	3.70	3.40
May	2.92	3.03	2.76	3.16	3.10	3.36	3.27	3.11	2.89
Jun	2.78	2.70	2.75	3.01	2.97	3.04	2.91	3.10	3.17
Jul	2.78	2.49	2.88	3.17	3.27	2.94	3.10	3.02	2.95
Ago	3.19	3.08	2.97	3.34	3.23	3.22	3.53	3.52	3.39
Set	3.63	3.36	3.29	3.57	3.83	3.75	3.72	3.59	3.70
Oct	3.34	3.46	3.62	3.73	3.63	3.41	4.11	3.77	3.66
Nov	3.68	3.83	3.53	3.64	4.09	4.13	4.18	4.26	3.85
Dic	3.60	3.31	3.13	3.60	3.68	4.06	3.90	3.86	4.00
Prom	3.26	3.12	3.18	3.35	3.41	3.43	3.63	3.66	3.52

3.2.1.6 Estimación de evapotranspiración referencial método Turc

Para calcular la ETo se utilizó el software PETP V2.0.0, se utilizaron datos meteorológicos como: temperatura media ($^{\circ}\text{C}$), horas sol (h), humedad relativa (%), anexo C de las tablas C-3, C-4, C-8, respectivamente, ya que la humedad relativa es mayor a 50% el componente de enmendar de humedad es igual a 1, la radiación global incidente o radiación de onda corta que llega a la superficie de la tierra (cal/cm^2), se ha calculado en función a radiación extraterrestre (R_a) anexo A tabla A-2, multiplicado por horas de acaloramiento fuerte promedio del lugar (n) dividido por duración máxima diaria media fuerte de insolación (N) del anexo A tabla A-3, de esta forma se ha calculado la evapotranspiración de referencia para el año 2013, con lo cual se

construyó la tabla 20, siguiendo la misma metodología se estimó para 2014 a 2021 se muestra en tabla 21.

Tabla 20

Evapotranspiración de referencia mensual método Turc -2013

Mes	d	Tm	n	HR	Ra	N	Eto	Eto
	Días	°C	Horas	%	mm/día	Horas	mm/día	mm/mes
Ene	31	17.27	6.20	82.10	16.66	12.79	3.66	113.45
Feb	28	17.41	4.94	83.87	16.36	12.53	3.39	95.02
Mar	31	17.55	5.94	82.35	15.34	12.16	3.43	106.46
Abr	30	17.35	7.94	74.98	13.83	11.80	3.75	112.51
May	31	16.50	7.37	75.57	12.27	11.47	3.11	96.38
Jun	30	15.86	7.78	74.24	11.37	11.31	3.05	91.49
Jul	31	14.76	7.63	76.03	11.77	11.41	2.89	89.74
Ago	31	15.90	7.97	71.08	13.03	11.67	3.32	103.06
Set	30	17.38	8.03	67.81	14.58	12.00	3.93	117.84
Oct	31	17.77	6.07	74.15	15.80	12.43	3.55	109.96
Nov	30	18.35	6.80	71.47	16.46	12.73	4.02	120.62
Dic	31	16.96	6.80	79.80	16.56	12.89	3.75	116.28
ETo (mm/año)							1272.8	

Tabla 21

Evapotranspiración de referencia Turc del año 2013-2021

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	3.66	3.49	3.52	3.84	3.68	3.54	4.09	4.07	4.10
Feb	3.39	3.50	3.76	3.34	3.77	3.65	4.07	4.42	4.07
Mar	3.43	3.11	3.52	3.35	3.11	3.64	3.68	4.09	3.67
Abr	3.75	3.13	3.44	3.59	3.54	3.38	3.92	4.00	3.69
May	3.11	3.23	3.01	3.36	3.28	3.51	3.43	3.30	3.05
Jun	3.05	3.01	3.03	3.28	3.25	3.27	3.17	3.38	3.42
Jul	2.89	2.69	3.02	3.29	3.36	3.07	3.23	3.18	3.10
Ago	3.32	3.26	3.16	3.53	3.42	3.35	3.63	3.69	3.57
Set	3.93	3.65	3.64	3.90	4.15	4.07	4.01	3.87	4.01
Oct	3.55	3.66	3.83	3.93	3.84	3.63	4.28	3.93	3.90
Nov	4.02	4.19	3.90	4.00	4.44	4.49	4.51	4.62	4.18
Dic	3.75	3.54	3.36	3.82	3.88	4.23	4.07	4.04	4.19
Prom	3.49	3.37	3.43	3.60	3.64	3.65	3.84	3.88	3.75

Rondinel (2020), en su trabajo de investigación en INIA Canaán obtuvo similares resultados de evapotranspiración de referencia por el tanque evaporímetro clase A, promedio multianual (2013 a 2017) tanque evaporímetro clase A 1227.11 mm/año, FAO Penman Monteith 1344.72mm/año, Hargreaves en función a datos registrados de radiación solar 1361.03 mm/año y Hargreaves en base a la temperatura 1278.61 mm/año para el periodo 2013 al 2017.

Retamozo (2015), logró resultados similares en su presente trabajo de tesis, la evapotranspiración referencia por el tanque evaporímetro clase A, promedio multianual (2011 a 2014): tanque evaporímetro clase A 1295.41 mm/año, FAO Penman Monteith 1043.59 mm/año y Hargreaves en función a la temperatura 1369.66 mm/año.

En el actual trabajo de investigación obtuvo resultados: Tanque evaporímetro clase A 1305.88 mm/año, FAO Penman Monteith 1363.6 mm/año, Hargreaves en base a la radiación solar 1386.92 mm/mes, Hargreaves en base a la temperatura 1290.55 mm/mes, Jensen – Haise 1462.13mm/año, Makkink 1210.12 mm/año, Turc 1295.69mm/año.

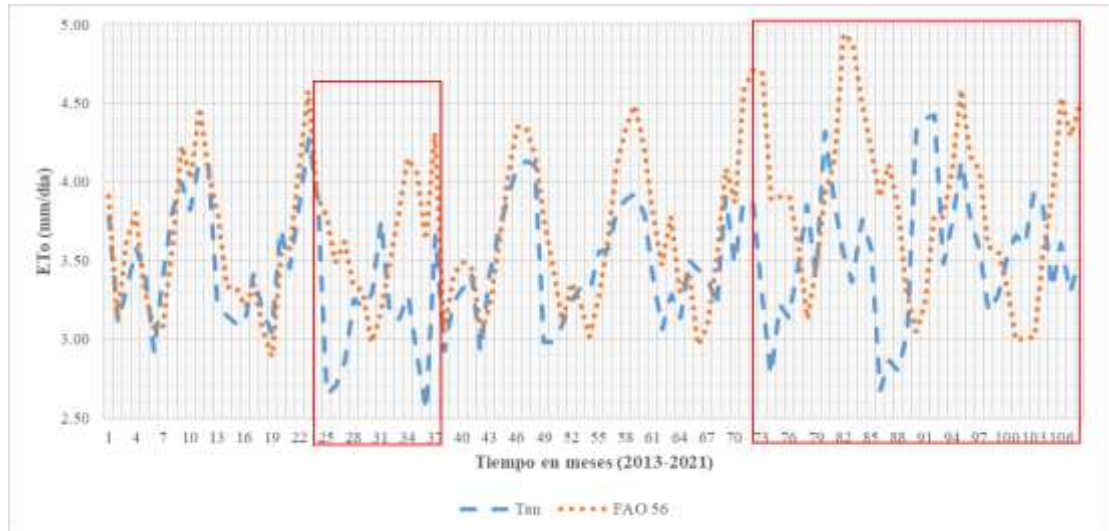
3.3 Comparación de modelos del año 2013 a 2021

Se realizó el balance de evapotranspiración de referencia diaria mensual con los métodos empíricos seleccionados FAO Penman Monteith, Hargreaves en base a la radiación solar, Hargreaves en base a la temperatura, Jensen – Haisen, Makkink y Turc con los valores de evapotranspiración de tanque evaporímetro clase A.

Mediante una comparación gráfica se verifica que los valores de evapotranspiración de referencia de tanque evaporímetro tiene una variación distinta a otros modelos para el mes 25 al 36 correspondiente al año 2015, lo mismo ocurre para el mes 73 hasta el mes 108 correspondientes al año 2019 al 2021 (Figura 16,17,18,19,21). Previa a este análisis visual se realizó gráficas de dispersión para los años mencionados, y se observó que la línea de tendencia para estos años es negativa y los coeficientes de correlación son bajos, por ende, la evapotranspiración del año 2015, 2019,2020 y2021 se obviarán en resto de los análisis.

Figura 16

Comparación gráfica de ETo con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Penman Monteith del año 2013-2021

**Figura 17**

Comparación gráfica de ETo con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Hargreaves en función a radiación solar del año 2013-2021

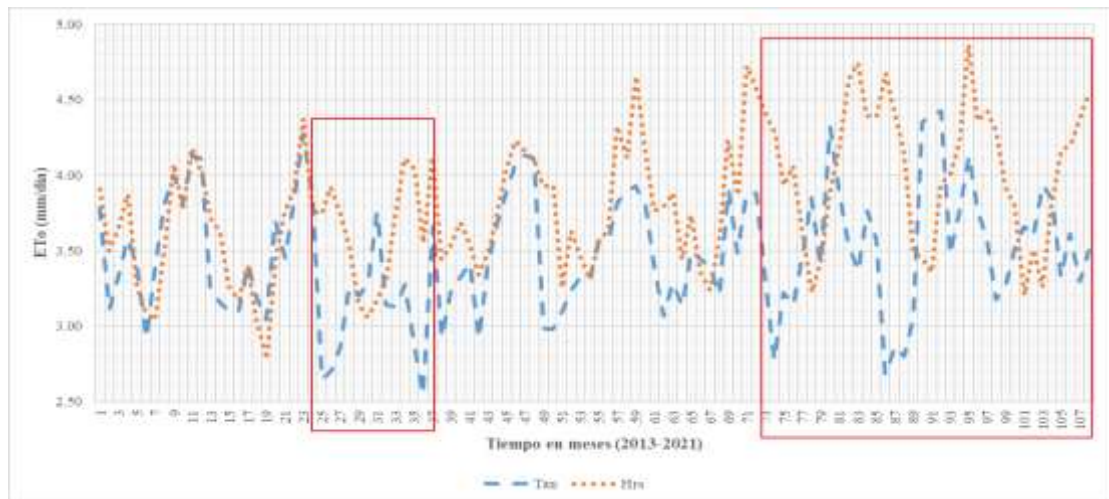
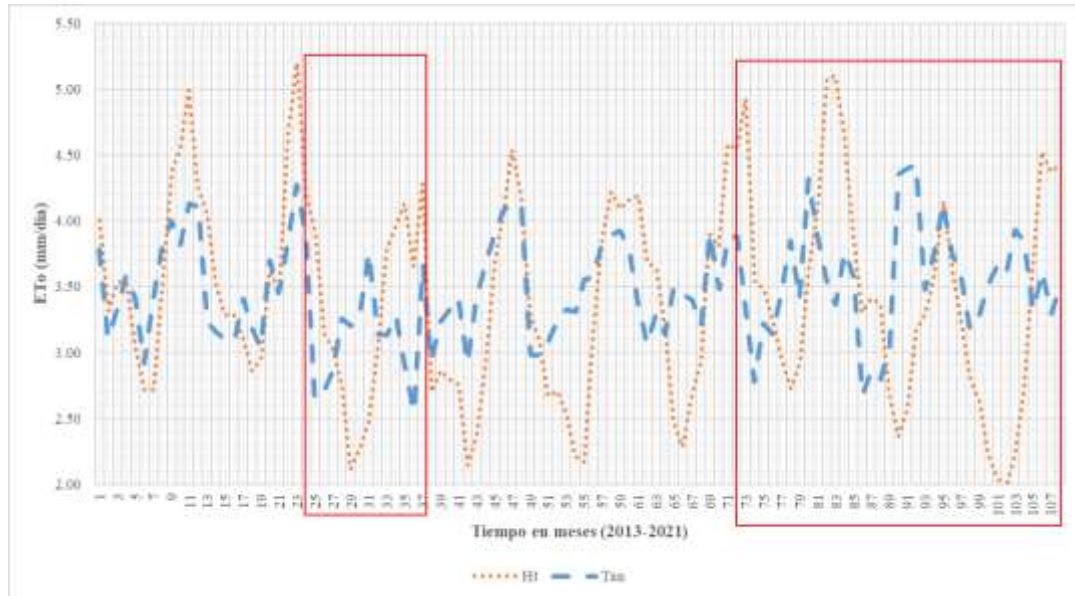


Figura 18

Comparación gráfica de ETo con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Hargreaves en función a la temperatura del año 2013-2021

**Figura 19**

Comparación gráfica de ETo con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Jensen – Haise del año 2013-2021

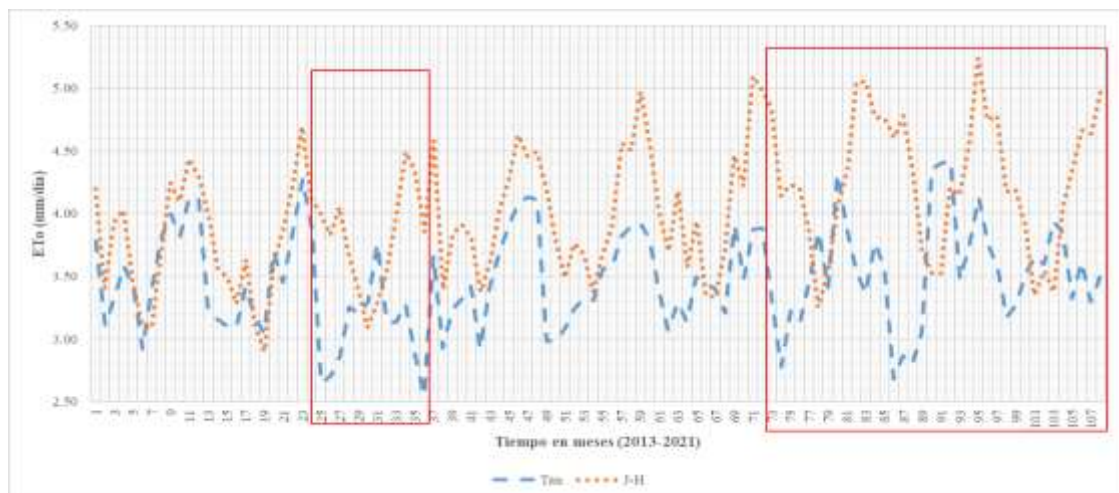
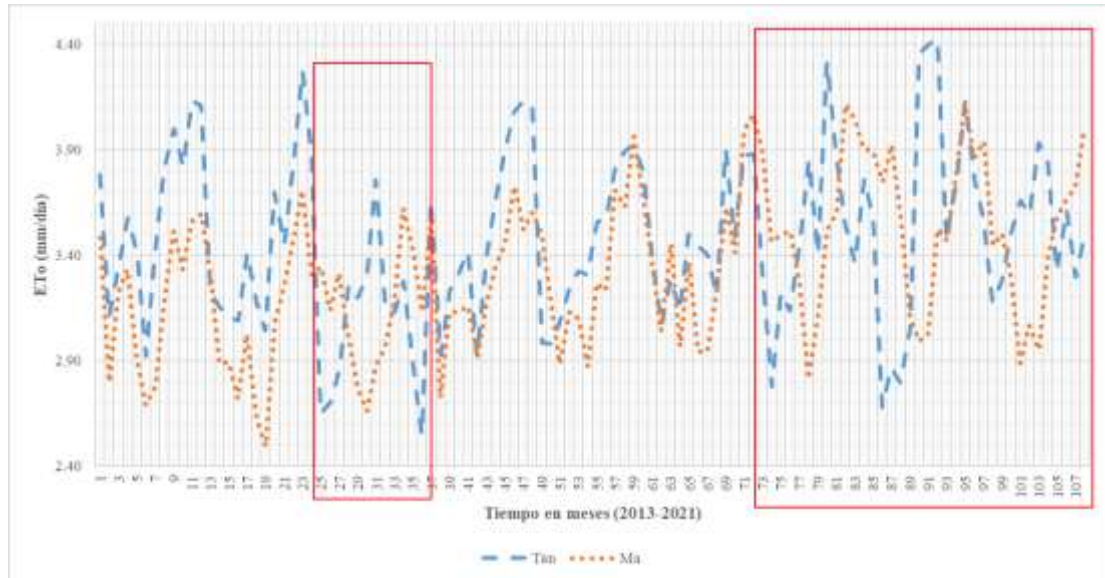
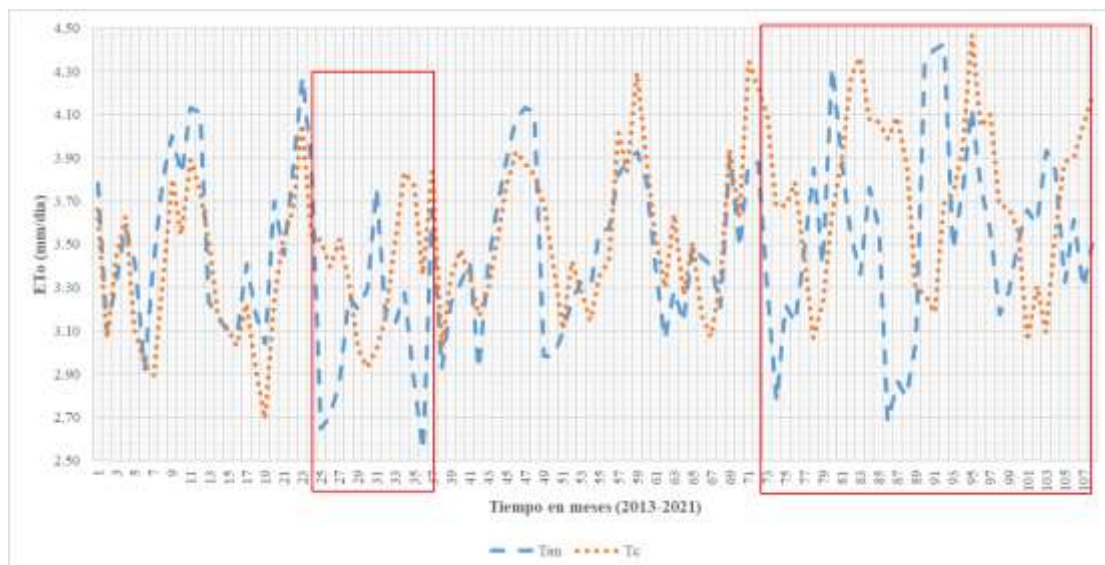


Figura 20

Comparación gráfica de ET_o con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Makkink del año 2013-2021

**Figura 21**

Comparación gráfica de ET_o con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Turc del año 2013-2021



Se realizó la cotejación de evapotranspiración de referencia diaria mensual con los métodos empíricos seleccionados FAO Penman Monteith, Hargreaves en función a la radiación solar, Hargreaves en función a temperatura, Jensen – Haisen, Makkink y Turc con los valores de evapotranspiración de tanque evaporímetro clase A, de los años 2013,2014, 2016, 2017, 2018.

Haciendo una comparación gráfica se muestra que el modelo Penman Monteith se aproxima a los valores esperados de evapotranspiración, el modelo Hargreaves en función a radiación solar del mes 1 hasta el mes 37 se aproxima a los valores esperados y del mes 38 hasta el mes 60 sobreestima, Hargreaves en base a la temperatura arroja resultados de subestimación, el modelo Jensen – Haise arroja resultados de sobreestimación, el modelo Makink arroja resultados de subestimación del mes 1 hasta el mes 46 y de mes 47 hasta el mes 60 se aproxima a los valores esperados, el modelo Turc arroja resultados de aproximación a los valores esperados de evapotranspiración de referencia (Figura 22, 23, 24, 25, 26,27, 28).

Figura 22

Comparación gráfica de ETo con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Penman Monteith del año 2013-2014,2016-2018

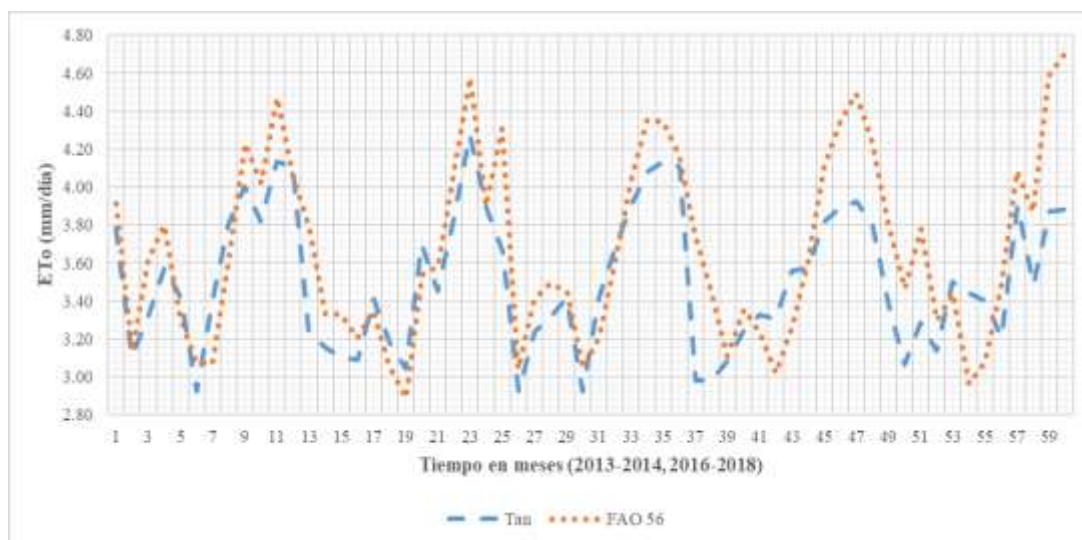
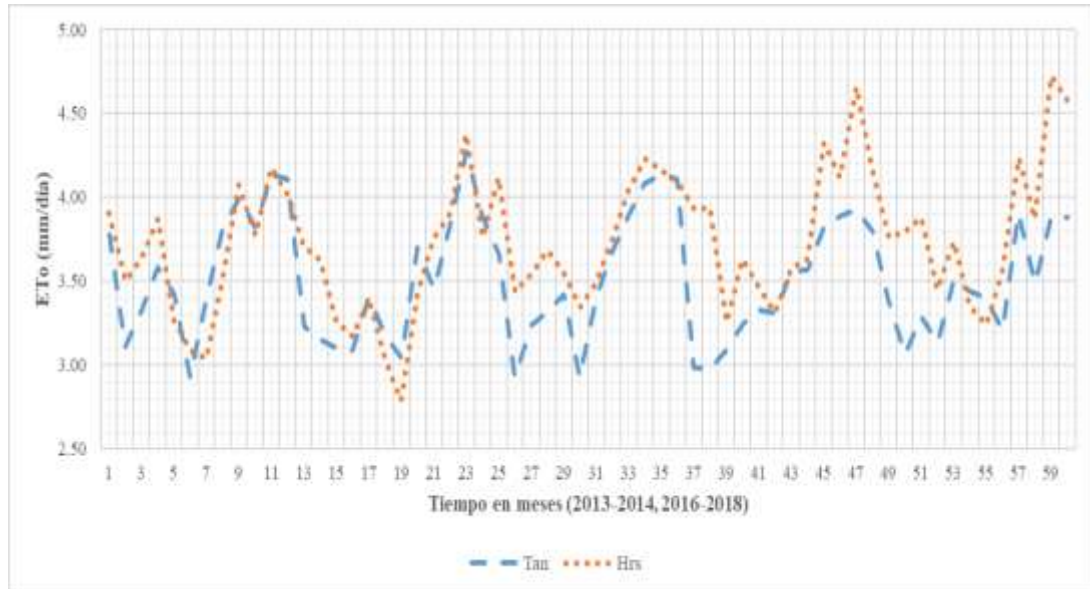


Figura 23

Comparación gráfica de ETo con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Hargreaves en función a radiación solar del año 2013-2014, 2016-2018

**Figura 24**

Comparación gráfica de ETo con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Hargreaves en función a temperatura del año 2013-2014, 2016-2018

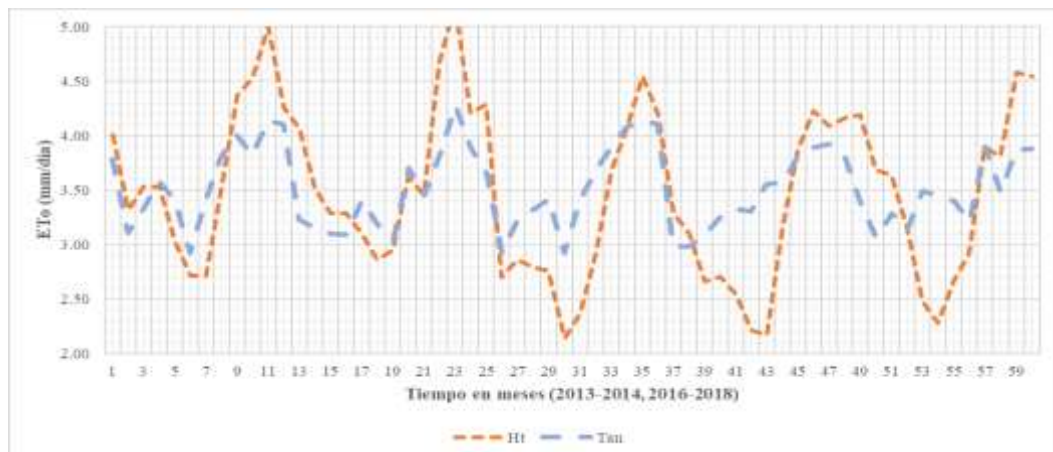
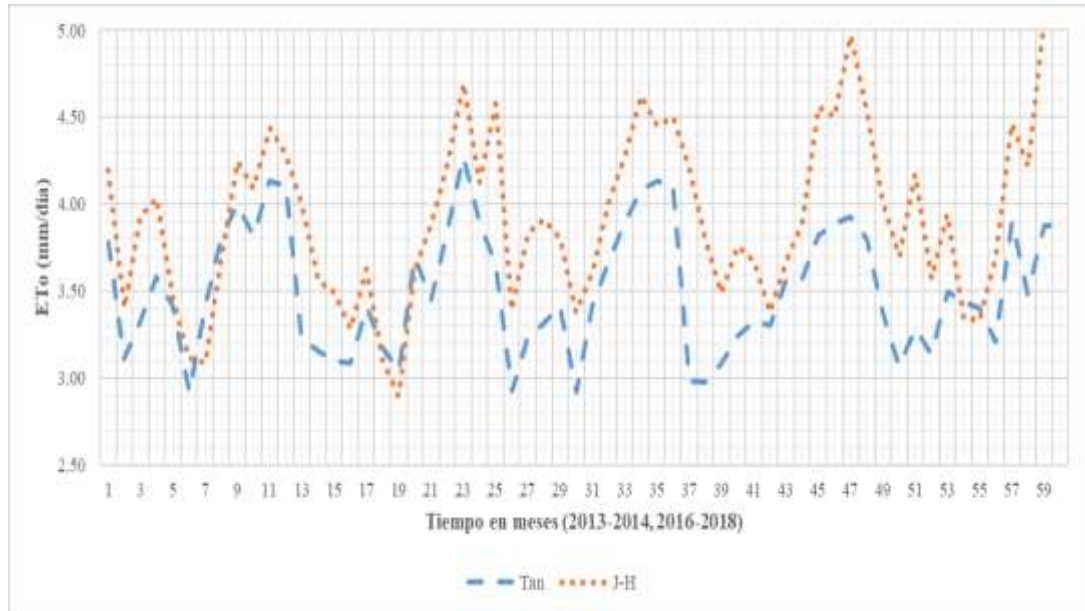


Figura 25

Comparación gráfica de E_{To} con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Jensen – Haise del año 2013-2014, 2016-2018

**Figura 26**

Comparación gráfica de E_{To} con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Makkink del año 2013-2014, 2016-2018

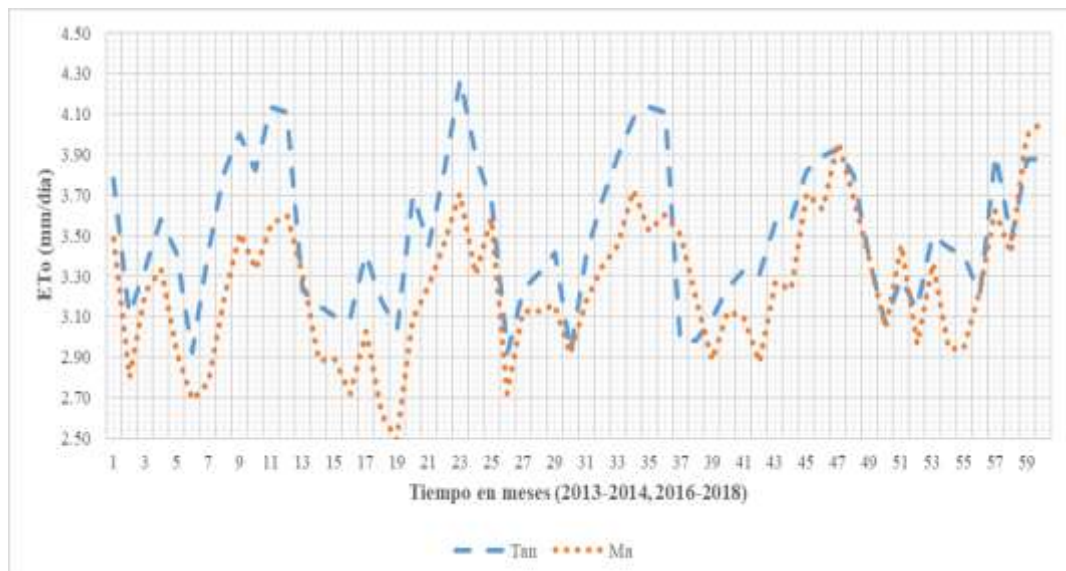
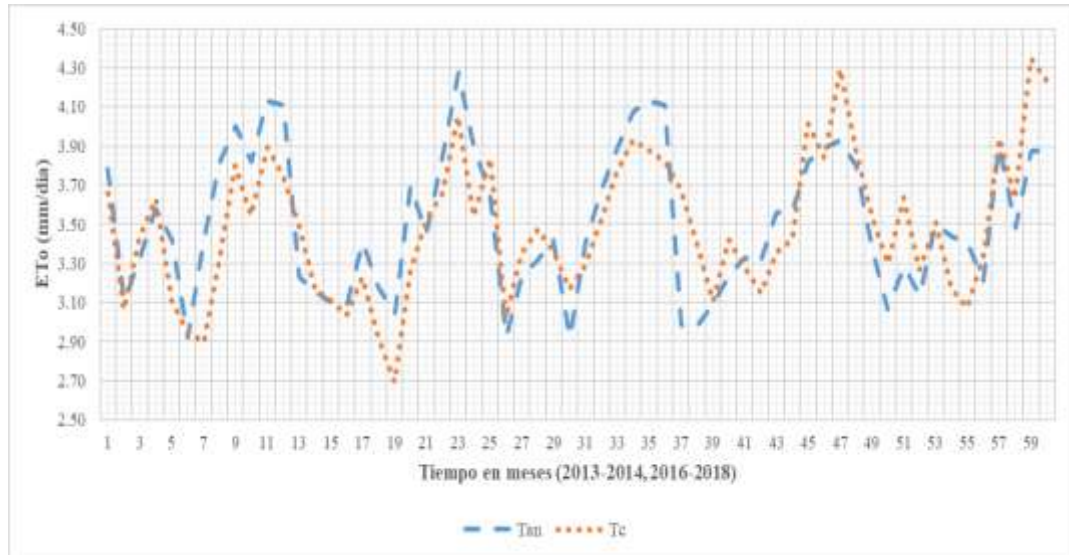
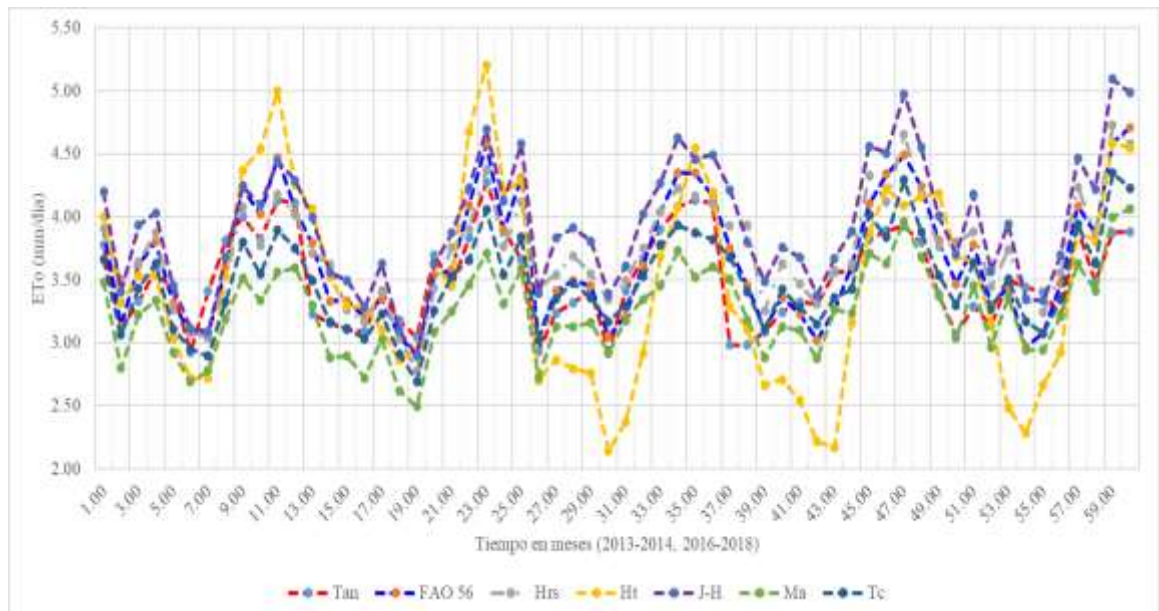


Figura 27

Comparación gráfica de ET_o con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Turc del año 2013-2014, 2016-2018

**Figura 28**

Comparación gráfica de ET_o con modelos empíricos Penman Monteith, Hargreaves en función a radiación solar, Hargreaves en función temperatura, Jensen – Haisen, Makkink y Turc con evapotranspiración de tanque evaporímetro clase A



3.4 Análisis estadística de evapotranspiración de referencia del método tanque evaporímetro clase A con métodos empíricos

Para el análisis de comparación por gráficas de dispersión de los modelos se utilizaron datos meteorológicos mensuales de los años 2013, 2014, 2016, 2017 y 2018. Cada uno de los modelos fueron comparados con la evapotranspiración de referencia de tanque evaporímetro clase A.

A través de las gráficas de regresión lineal de la figura 29, el modelo Penman Monteith presenta mejor comportamiento, sigue pendiente de la recta 1:1 a un eso tiene a presentar pequeñas sobreestimaciones y subestimaciones de los valores esperados. De la figura 30 se pudo observar que el modelo Hargreaves en base a la radiación solar tiende a sobreestimar con 4.72 mm/día y subestimar con 2.78 mm/día a los valores esperados, de la figura 31 se puede observar que el modelo Hargreaves en base a temperatura tiende a sobre estimar con 5.20 mm/día y subestimar con valores de 2.14 mm/día a los valores esperados, de la figura 32 se puede observar que el modelo Jensen – Haise tiende a sobreestimar con 5.09 mm/día y subestimar con 2.90 mm/día a los valores esperados, de la figura 33 se puede observar que el modelo Makink tiende a sobre estimar con un valor de 4.06 mm/día y subestimar con 2.49 mm/día, en la figura 34 se puede observar que el modelo Turc tiende a sobrestimar con un valor de 4.35 mm/día, y también presenta resultados muy próximos a los valores esperado aunque no sigue la deflexión de la recta 1:1.

Figura 29

Comparación de regresión lineal de Tanque evaporímetro clase A con Penman Monteith

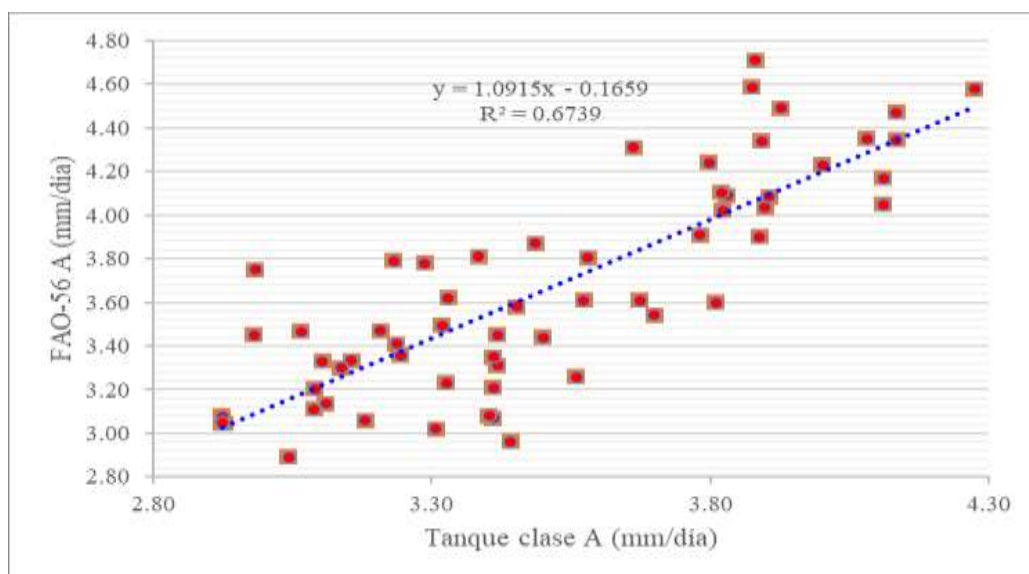
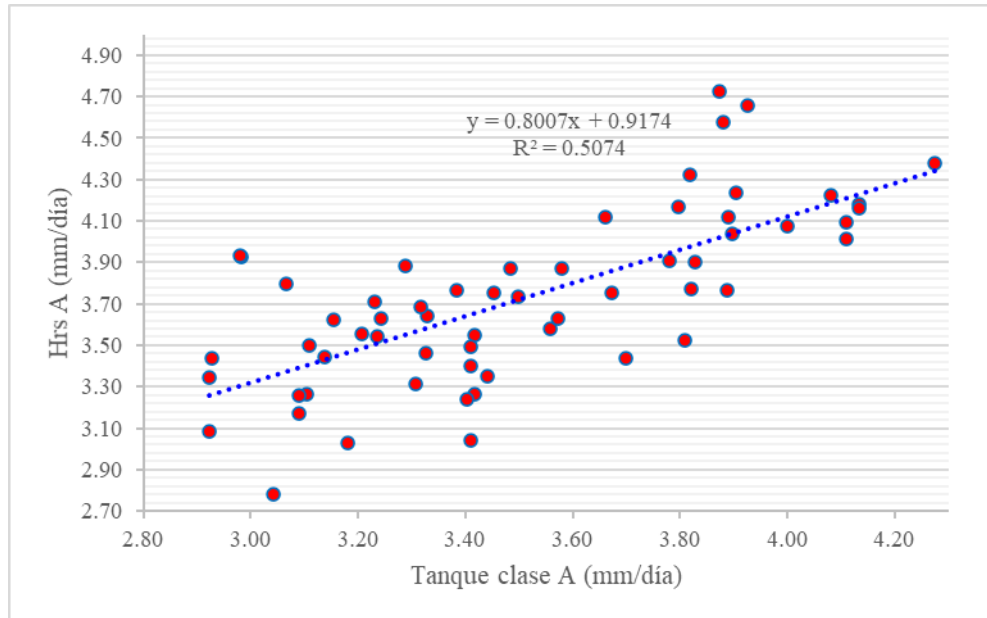


Figura 30

Comparación de regresión lineal de Tanque evaporímetro clase A con Hargreaves en base a la radiación solar

**Figura 31**

Comparación de regresión lineal de Tanque evaporímetro clase A con Hargreaves en base a la temperatura

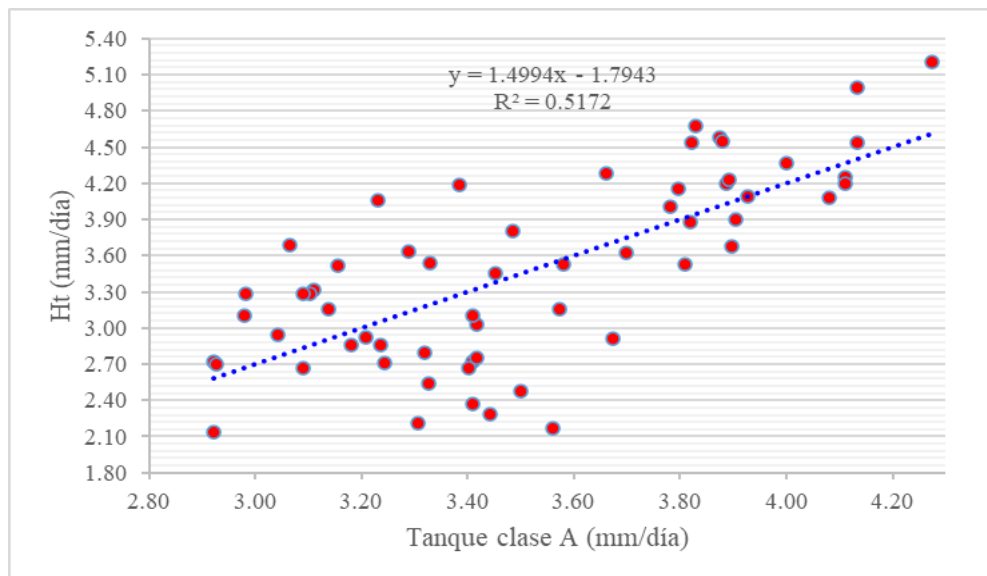
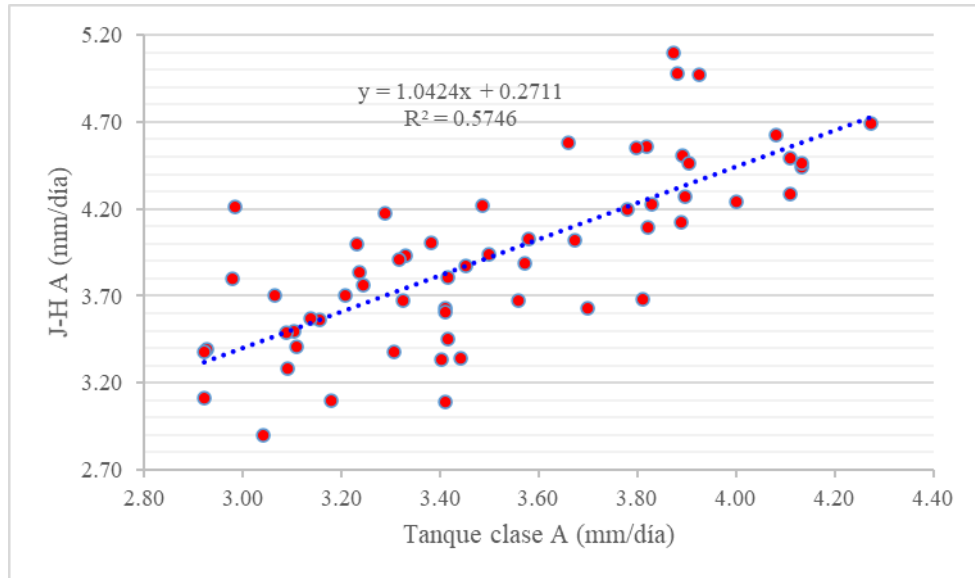


Figura 32

Comparación de regresión lineal de Tanque evaporímetro clase A con Jensen – Haise

**Figura 33**

Comparación de regresión lineal de Tanque evaporímetro clase A con Makink

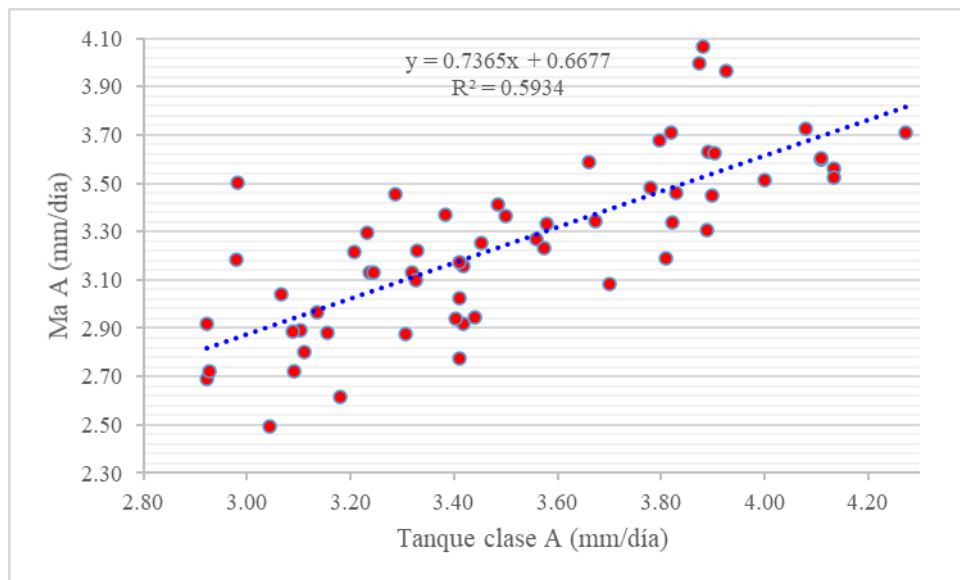
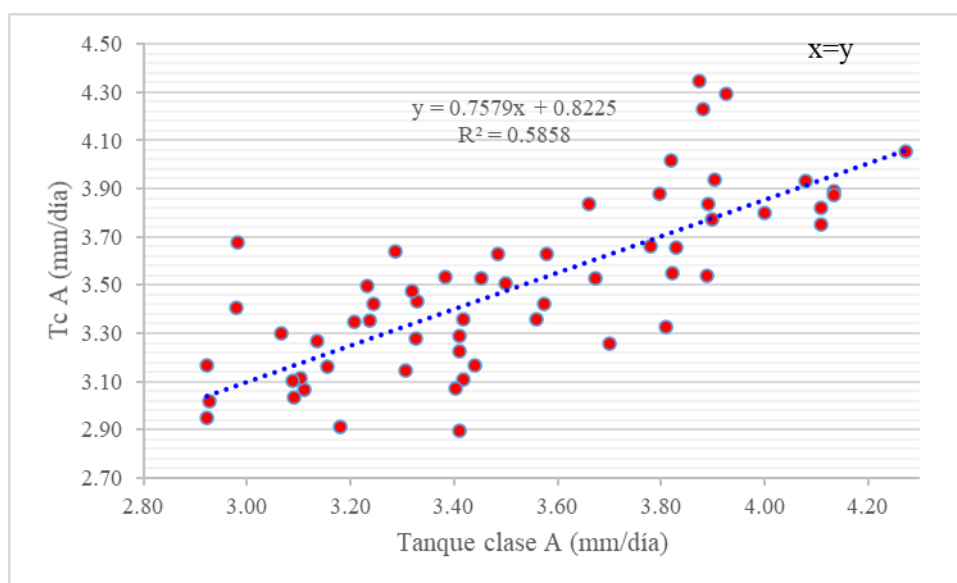


Figura 34

Comparación de regresión lineal de Tanque evaporímetro clase A con Turc



Al analizar los indicadores de ajuste, considerando análisis de regresión lineal y la comparación gráfica primero se puede apreciar que los resultados de RSME, índice de confiabilidad de los modelos Hargreaves en función radiación solar, Hargreaves en función temperatura, Jensen – Haise y Makink son producto de las sobreestimaciones y subestimaciones de los resultados de evapotranspiración de referencia, siendo modelos que más se alejan de los valores anhelados, mientras que los métodos de Penman Monteith, Turc muestran un RMSE más cercanos a cero y el índice de correlación más contiguos a la unidad y con índice de confiabilidad bueno, siendo el modelo Penman Monteith que presenta menores diferencias relativas respecto a la evapotranspiración de referencia de tanque evaporímetro Clase A.

Tabla 22

Indicadores estadísticos de ajuste.

	R^2	RMSE	PE	d	r	c	Desempeño
FAO 56	0.67	0.23	4.42	0.86	0.82	0.70	Bueno
Hrs	0.51	0.26	6.21	0.78	0.71	0.56	Tolerable
Ht	0.52	0.40	1.17	0.73	0.72	0.52	Tolerable
J-H	0.57	0.38	11.97	0.70	0.76	0.53	Tolerable
Ma	0.59	0.25	7.33	0.77	0.77	0.59	Tolerable
Tc	0.59	0.18	0.78	0.87	0.77	0.67	Bueno

El coeficiente de determinación nos proporciona información sobre qué modelo se ajusta mejor a sus datos en comparación con su línea de tendencia, al hacer una comparación del comportamiento de coeficiente de determinación el modelo Penman Monteith presenta mayor valor que otros modelos un valor de 0.67mm/día, como se aprecia en la figura 29 el modelo se ajusta a una correlación lineal a los valores de evapotranspiración de referencia observados y medidos, el error cuadrático medio y error porcentual nos indica cuando sus valores se aproximan a cero son óptimos el modelo obtuvo RMSE de 0.23 mm/día, PE de 4.42%, el índice de concordancia, el coeficiente de correlación y el índice de confiabilidad nos indica cuando los valores se aproximan a la unidad tiene un valor óptimo el modelo obtuvo d 0.86mm/día, r 0.82mm/día y c 0.70mm/día, según la metodología propuesto Camargo y Sentelhas en el año 1997 tabla 7, el modelo obtuvo un desempeño bueno por ello es recomendable para determinar la evapotranspiración de referencia en la zona de INIA.

El coeficiente de determinación nos menciona cuál modelo se aproxima mejor a sus datos en comparación con su línea de tendencia, el modelo Hargreaves en base a la radiación solar, no se ajusta a una correlación lineal a los valores de evapotranspiración de referencia observados y medidos, el error cuadrático medio y error porcentual nos indica cuando sus valores se aproximan a cero son óptimos el modelo obtuvo RMSE de 0.26 mm/día, PE de 6.21%, el índice de concordancia, el coeficiente de correlación y el índice de confiabilidad nos indica cuando los valores se aproximan a la unidad tiene un valor óptimo el modelo obtuvo d 0.78mm/día, r 0.71mm/día y c 0.56mm/día, según la metodología propuesto Camargo y Sentelhas en el año 1997 tabla 7, el modelo obtuvo un desempeño de tolerable por ello se descarta para determinar la evapotranspiración de referencia en la zona de INIA.

El coeficiente de determinación nos menciona cuál modelo se aproxima mejor a sus datos en comparación con su línea de tendencia, el modelo Hargreaves en base temperatura, no se ajusta a una correlación lineal a los resultados de evapotranspiración de referencia observados y medidos, el error cuadrático medio y error porcentual nos indica cuando sus valores se aproximan a cero son óptimos el modelo obtuvo RMSE de 0.40 mm/día, PE de 1.17%, el índice de concordancia, el coeficiente de correlación y el índice de confiabilidad nos indica cuando los valores se aproximan a la unidad tiene un valor óptimo el modelo obtuvo d 0.73mm/día, r 0.72

mm/día y c 0.52mm/día, según la metodología propuesta Camargo y Sentelhas en el año 1997 tabla 7, el modelo obtuvo un desempeño de tolerable por se descarta para estimar la evapotranspiración de referencia en la zona de INIA.

El coeficiente de determinación nos menciona cuál modelo se aproxima mejor a sus datos en comparación con su línea de tendencia, el modelo Jensen – Haise, no se ajusta a una correlación lineal a los valores de evapotranspiración de referencia observados y medidos, el error cuadrático medio y error porcentual nos indica cuando sus valores se aproximan a cero son óptimos el modelo obtuvo RMSE de 0.38 mm/día, PE de 11.97%, el índice de concordancia, el coeficiente de correlación y el índice de confiabilidad nos indica cuando los valores se aproximan a la unidad tiene un valor óptimo el modelo obtuvo d 0.0.70mm/día, r 0.76 mm/día y c 0.53mm/día, según la metodología propuesta Camargo y Sentelhas en el año 1997 tabla 7, el modelo obtuvo un desempeño de tolerable por ello se descarta para estimar la evapotranspiración de referencia en la zona de INIA.

El coeficiente de determinación menciona que la fórmula que mejor se aproxima a sus datos a su línea de tendencia es mejor, el modelo Makink, no se ajusta a una correlación lineal a los valores de evapotranspiración de referencia observados y medidos, el error cuadrático medio y error porcentual nos indica cuando sus valores se aproximan a cero son óptimos el modelo obtuvo RMSE de 0.25 mm/día, PE de 7.33%, el índice de concordancia, el coeficiente de correlación y el índice de confiabilidad nos indica cuando los valores se aproximan a la unidad tiene un valor óptimo el modelo obtuvo d 0.77mm/día, r 0.77mm/día y c 0.59mm/día, según la metodología propuesta Camargo y Sentelhas en el año 1997 tabla 7, el modelo obtuvo un valor de desempeño de tolerable por se descarta para determinar la evapotranspiración de referencia en la zona de INIA.

El coeficiente de determinación menciona que formula que mejor se aproxima a sus reseñas a su línea de tendencia es mejor, el modelo Tur, no se ajusta a una correlación lineal a los valores de evapotranspiración de referencia observados y medidos, el error cuadrático medio y error porcentual nos indica cuando sus valores se aproximan a cero son óptimos el modelo obtuvo RMSE de 0.18mm/día, PE de 0.78%, el índice de concordancia, el coeficiente de correlación y el índice de confiabilidad nos

indica cuando los valores se aproximan a la unidad tiene un valor óptimo el modelo obtuvo d 0.87mm/día, r 0.77mm/día y c 0.67mm/día, según la metodología propuesto Camargo y Sentelhas en el año 1997 tabla 7, el modelo obtuvo un desempeño bueno por ello es recomendable para determinar la evapotranspiración de referencia en la zona de INIA.

Rondinel (2020), comparó los resultados de tanque evaporímetro clase A, con método satelital calibrado obteniendo resultados que el modelo tiene un desempeño pésimo, con valores de RSME =0.452 mm/día, PE = 1.685 %, índice de concordancia (d) = 0.342, índice de determinación (R^2) = 0.002, índice de concordancia (r) = 0.047, y el índice de confiabilidad (c) de 0.016, para este trabajo primero se debió hacer un análisis previo de datos diarios de clima, y evapotranspiración de referencia para todos los meses y de cada año y se debió descartar el año 2015 ya que este año presenta distinta variación de evapotranspiración a los a otros modelos y se debió calibrar el modelo con datos medidos de tanque evaporímetro.

Retamozo (2015) comparo los resultados de tanque evaporímetro clase A, con MOD16A2 calibrado obteniendo resultados que el modelo tiene un desempeño pésimo, con valores de índice de determinación (R^2) = 0.55, índice de correlación de 0.74, índice de exactitud (Concordancia) (d) = 0.41, índice de confianza (c) = 0.30 con un desempeño pésimo, para que el ajuste de índice de confiabilidad sea bueno se debió calibrar el modelo con datos medidos de tanque evaporímetro.

CONCLUSIONES

1. Se estimó ETo de la estación meteorológica INIA-Canaán por método directo Tanque evaporímetro clase A, obteniendo el resultado promedio anual del año 2013 a 2021, de 1305.88 mm/año. Por métodos indirectos seleccionados FAO Penman Monteith 1363.6 mm/año, Hargreaves en base a la radiación solar 1386.92 mm/año, Hargreaves en base a la temperatura 1290.55 mm/año, Jensen-Haise 1462.13 mm/año, Makkink 1210.12 mm/año, Turc 1295.69 mm/año, a partir de datos meteorológicos de la estación INIA, para los años 2017 al 2021 en promedio.

2. Mediante la comparación gráfica, gráficas de dispersión de evapotranspiración de referencia de tanque evaporímetro clase A, con métodos empíricos de Penman Monteith, Hargreaves en base a la radiación solar, Hargreaves en base a la temperatura, Jensen-Haise, Makkink y Turc, para los años de 2013 hasta 2021, se descartó los años de 2015, 2019, 2020 y 2021 ya que estos presentan una variación distinta y los coeficientes de determinación no se ajustaron a la recta de regresión lineal, presentan pendientes negativas y sus coeficientes de correlación resultaron valores muy bajos.

3. se comparó los resultados de evapotranspiración de referencia, de los años 2013-2014, 2016-2018 mediante los índices estadísticos de los modelos Penman Monteith, Hargreaves en base a la radiación solar, Hargreaves en base a la temperatura, Jensen-Haise, Makkink y Turc, con resultados de evapotranspiración de referencia emanada de tanque evaporímetro clase A, los modelos Hargreaves en función a radiación solar, Hargreaves en función a temperatura, Jensen-Haise y Makkink presentaron un resultado de índice de confiabilidad tolerable, los modelos Penman Monteith y Turc presentaron un índice de confiabilidad bueno, estos modelos estuvieron los que alcanzaron mejores apreciaciones de los resultados de evapotranspiración de referencia para el lugar de INIA.

RECOMENDACIONES

1. Para la estimación de evapotranspiración de referencia se recomienda utilizar los modelos de Penman Monteith y Turc ya que estos modelos tienen un buen ajuste a los resultados medidos de evapotranspiración de referencia de tanque evaporímetro clase A, en la zona de estudio INIA.

2. Se recomienda al gobierno regional de Ayacucho especialmente a la Oficina de OPEMAN, que para la operación de los equipos de la estación meteorológica INIA, ponga un personal especialista en tema, para que los valores de datos meteorológicos sean confiables para cualquier estudio, ya que los datos de los años 2015, 2019, 2020 y 2021 no son datos confiables para realizar estudios.

3. Los softwares CROPWAT 8.0 hecho por Joss Swennenhuis para la Unidad de Fomento y Gestión de las Aguas de la FAO y PETP V.2.0.0. desarrollado por el Ingeniero Cesar Vidal Gutiérrez Ninahuamán, son de gran utilidad para la estimación de evapotranspiración de referencia, pues sus aplicaciones y eficiencias nos han permitido obtener la evapotranspiración de manera práctica.

4. Se recomienda tener mayor cantidad de serie de datos registrados, si es el caso la necesidad de completar los datos faltantes con métodos estadísticos, en este trabajo de investigación para la comparación de los modelos se utilizó datos de cinco años de 2013 hasta 2021 de la estación meteorológica INIA – Canaán.

5. Promover en las futuras investigaciones de este tema, tomando varias estaciones meteorológicas teniendo como referencia métodos directos, como tanque evaporímetro clase A, método lisímetro, como también el método de FAO Penman Monteith.

6. Se recomienda implementar la estación de meteorológica INIA – Canaán, con instrumentos adecuados y que consigan computar variables meteorológicas que accedan la aplicación inmediata del modelo FAO Penman Monteith, y también apertura estaciones meteorológicas cercanas en zona de estudio con fin de facilitar datos confiadas.

REFERENCIA - BIBLIOGRÁFICA

- Aroni. (2019). *Análisis comparativo de la evapotranspiración de referencia mediante la metodología del modelo SEBAL y Tanque evaporímetro en la cuenca de Huancané en la región puno*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano - Perú].
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Estudio FAO- Riego y drenaje 56. Evapotranspiración de cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: FAO56.
- Bochetti, M. (2010). *Análisis comparativo de la evapotranspiración obtenida mediante ecuaciones empíricas aplicadas en la zona Agrícola de Chillan* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santísima Concepción - Chile].
- Cahuana, A., Yugar, W. (2009). *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233*. [Trabajo Dirigido Por Adscripción, Presentado Para Optar al Diploma Académico de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Mayor de San Simón Cochabamba – Bolivia].
<https://docplayer.es/214749650-Universidad-mayor-de-san-simon.html>
- Camargo, A. y Sentelhas, P. (1997). Avaliacao do desempenho de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiracao potencial no estado de Sao Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorología*, 5(1),89-97.
https://www.researchgate.net/publication/284194031_Avaliacao_do_desempenho_de_diferentes_metodos_de_estimativa_da_evapotranspiracao_potencial_no_Estado_de_Sao_Paulo_Brasil
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. w. (2000). *Hidrología Aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: NOMOS S. A.
- Contreras, j. (2015). *Análisis comparativo de cuatro modelos de evapotranspiración de referencia en la microcuenca del río Quinuas* [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca Ecuador].
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/21725>

- Gutiérrez, C., (2018). *Manual del usuario PETP 2.0 evapotranspiración potencial*. Cartago, Costa Rica: MAXSOFT.
- Huaccoto, P. (2017). *Determinación del método más eficiente para calcular la evapotranspiración potencial para un modelo lluvia - escorrentía en la cuenca Huancané – Puno* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano - Puno]. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5872>
- Jaramillo, A. (2006). Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. *Cenicafé*, 57(4), 288-298. <https://docplayer.es/30742828-Evapotranspiracion-de-referencia-en-la-region-andina-de-colombia.html>
- López, J., Díaz, T., Watts, C., Cesar, J., Castellanos, A., Partida, L., Velásquez, T., (2015). Evapotranspiración y coeficiente de cultivo de Chile Bell en el Valle de Culiacán, México. *Terra latinoamericana*, 33(3), 209 – 219. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57341186003>
- Lujano, A., Quispe, J., Lujano, E (2019). Métodos alternativos de estimación de evapotranspiración de referencia en la estación de Yauri – Cusco, Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 21(3), 215-224. <https://doi.org/10.18271/ria.2019.479>
- Monsalve, G. (1999). *Hidráulica en la ingeniería*. (2^{da} ed). Editorial escuela Colombia de Ingeniería.
- Monterroso, A., Gómez, J., (2021). Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México. *Terra latinoamericana*, 39, 1-19. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.774>
- More, H. (2021). *Análisis comparativo entre métodos empíricos para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la región de Tumbes* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Tumbes]. Archivo digital. <http://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/20.500.12874/2569>
- Olarte, W. (1987). *Manual de riego por gravedad*. Lima - Perú: Comisión de Coordinación de Tecnología Andina (CCTA).

- Ortiz, R., Chile, M., (2020). Métodos de cálculo para estimar evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco. *Siembra*, 7(1), 070-079. <https://www.researchgate.net/publication/352062102>
- Retamozo, W. J. (2015). *Estimación de evapotranspiración potencial a partir de imágenes satelitales Modis aplicadas a la zona agrícola de Cannán (2756 m.s.n.m.) - Ayacucho 2015*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho - Perú].
- Rodríguez. V.H. (2021). Calibración y validación de la evapotranspiración de referencia mediante modelos de máxima verosimilitud en la cuenca del río Ramis. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano - Perú].
- Rondinel, H. A. (2020). *Estimación satelital, validación y distribución espacial de la evapotranspiración a través del clima en la cuenca Cachi – Ayacucho-2020*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho - Perú].
- Santana, L. y Peña. E. (2010). Obtención de modelos para la determinación de la evapotranspiración de referencia en condiciones de clima subhúmedo seco en las Tunas, Cuba. *Revista IDESIA (Chile)*, 28(1), 55-59. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34292010000100008&script=sci_abstract
- Senamhi. (2015). *Generación de una base de datos de evapotranspiración Grillada y de alta resolución a nivel nacional (1981-2014)*. dirección general de hidrología y recursos hídricos.
- Toro, M., Arteaga, R., Vázquez, A., Ibáñez, A. (2015) modelos para estimar la evapotranspiración de referencia en la zona norte bananera del Urabá antioqueño (Colombia). *ARTÍCULO en Agrociencia* 49, 821-836. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140531952015000800001
- Vásquez, A., Vásquez R, I., Vásquez R, C., & Cañamero, M. (2017). *Fundamentos de la ingeniería de riego*. Lima: Q&P Impresores S.R.L.

Villazón, J., Noris, P., Vásquez, R., Martines, G., Cobo, Y. (2021) Comparación de métodos empíricos para la estimación de la evapotranspiración de referencia en Holguín, Cuba. *IDESIA (Chile)* 39(3), 103-109. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.scielo.cl/pdf/idesia/v39n3/0718-3429-idesia-39-03-103.pdf>

Ortiz, R., Chile, M., (2020). Métodos de cálculo para estimar evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco. *Siembra*, 7(1), 070-079. <https://www.researchgate.net/publication/352062102>



ANEXO A
MATRIZ DE CONSISTENCIA



Anexo A Matriz de consistencia: Comparación de modelos alternativos para la estimación de evapotranspiración de referencia en la estación meteorológica de INIA - Ayacucho – 2022

FORMULACIÓN DE PROBLEMA	HIPÓTESIS	OBJETIVOS	VARIABLES			METODOLOGÍA
Problema general	Hipótesis general	Objetivo general	Variable independiente	Dimensiones	Indicadores	
¿Cómo es el comportamiento de modelos alternativos con evaporación de tanque evaporímetro Tipo A, en la estimación de evapotranspiración de referencia en la estación meteorológica INIA-Ayacucho?	Los modelos alternativos de evapotranspiración son una solución por escasez de datos meteorológicos que están directamente y significativamente relacionados para la estimación de evapotranspiración.	Comparar el comportamiento de diferentes modelos empíricos para estimar evapotranspiración de referencia con registros de evaporación de tanque evaporímetro clase “A”, en la estación meteorológica INIA-Ayacucho.	Modelos alternativos	-Tanque evaporímetro Clase A -FAO Penman Monteith - Hargreaves en base a la radiación solar - Hargreaves en base a la temperatura - Jensen – Haise - Makkink - Turc	Temperatura. (°C) Radiación solar. (MJ/m ² /d) Velocidad del viento. (m/s) Humedad relativa (%) evaporación de tanque	Tipo: •Según su objetivo de estudio (Propósito) Investigación Aplicativa •Según su Metodología o nivel de profundización Investigación descriptiva-Comparativa • Según el nivel de análisis de la información
Problemas específicos	Hipótesis específicas	Objetivos específicos	Variables dependientes	Dimensiones	Indicadores	

<p>¿Como es la estimación de evapotranspiración de referencia mediante modelos alternativos en comparación con registros de evaporación de tanque evaporímetro clase "A" en la estación meteorológica INIA-Ayacucho?</p> <p>¿Los resultados de modelos alternativos en la estimación de evapotranspiración se ajustarán al método tanque evaporímetro clase A en la estación INIA-Canaán?</p>	<p>Los modelos alternativos pueden ser evaluados, identificados y seleccionados para hacer una comparación con evaporación de tanque evaporímetro clase A</p> <p>Mediante la comparación estadística y grafica se obtiene los resultados más confiables.</p>	<p>Estimar la evapotranspiración de referencia empleando diferentes modelos alternativos para comparar con registros de evaporación de tanque evaporímetro clase "A" en la estación meteorológica INIA-Ayacucho.</p> <p>Comparar estadística y gráficamente los valores de las estimaciones evapotranspiración de referencia obtenidas por diferentes modelos con datos de evaporación Tanque Evaporímetro clase "A" en la estación meteorológica INIA-Ayacucho.</p>	<p>Evapotranspiración</p> <p>Índices estadísticos</p>	<p>Evaporación Transpiración</p> <p>Raíz del error cuadrático medio Error porcentual Índice de concordancia Coeficiente de correlación Índice de confianza</p>	<p>mm/día, o mm/mes</p>	<p>Investigación Cuantitativa</p> <p>•Según grado de manipulación de variables</p> <p>Investigación no experimental</p> <p>Métodos: Método Deductivo</p> <p>Diseño: No experimental – descriptivo correlacional</p> <p>Población y Muestra</p> <p>Población: Datos meteorológicos historial del año 2017-2021</p> <p>Muestra: conjunto de datos meteorológicos mensuales historial del año 2017-2021</p>
---	--	--	---	--	-------------------------	--

ANEXO B

**TABLAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA
EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA**

Tabla B-1

Los coeficientes de corrección del tanque evaporímetro (K_p) para tanques de Clase A varían según la ubicación y las condiciones ambientales de los tanques, así como diferentes valores de velocidad promedio del viento y humedad relativa (Fuente: Serie FAO Riego y Drenaje No. 24).

Tanque Clase A		Caso A: Tanque situado en una superficie cultivada			Caso B: Tanque situado en un suelo desnudo			
HR media		baja < 40	media 40-70	alta > 70				
Velocidad del viento (m/s)	Distancia del cultivo a barlovento (m)				Distancia del barbecho a barlovento (m)	baja < 40	media 40-70	alta > 70
Bajo < 2	1	0.55	0.65	0.75	1	0.70	0.80	0.85
	10	0.65	0.75	0.85	10	0.60	0.70	0.80
	100	0.70	0.80	0.85	100	0.55	0.65	0.75
	1,000	0.75	0.85	0.85	1,000	0.50	0.60	0.70
Moderada 2-5	1	0.50	0.60	0.65	1	0.65	0.75	0.80
	10	0.60	0.70	0.75	10	0.55	0.65	0.70
	100	0.65	0.75	0.80	100	0.50	0.60	0.65
	1,000	0.70	0.80	0.80	1,000	0.45	0.55	0.60
Alta 5-8	1	0.45	0.50	0.60	1	0.60	0.65	0.70
	10	0.55	0.60	0.65	10	0.50	0.55	0.65
	100	0.60	0.65	0.70	100	0.45	0.50	0.60
	1,000	0.65	0.70	0.75	1,000	0.40	0.45	0.55
Muy alta > 8	1	0.40	0.45	0.50	1	0.50	0.60	0.65
	10	0.45	0.55	0.60	10	0.45	0.50	0.55
	100	0.50	0.60	0.65	100	0.40	0.45	0.50
	1,000	0.55	0.60	0.65	1,000	0.35	0.40	0.45

Fuente: (Allen et al., 2006)

Tabla B-2

La radiación solar extraterrestre (Ra) se representa en términos de equivalente de evaporación (mm/día).

Hemisferio norte												Lat.	Hemisferio sur											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
3.8	6.1	9.4	12.7	15.8	17.1	16.4	14.1	10.9	7.4	4.5	3.2	50°	17.5	14.7	10.9	7.0	4.2	3.1	3.5	5.5	8.9	12.9	16.5	18.2
4.3	6.6	9.8	13.0	15.9	17.2	16.5	14.3	11.2	7.8	5.0	3.7	48°	17.6	14.9	11.2	7.5	4.7	3.5	4.0	6.0	9.3	13.2	16.6	18.2
4.9	7.1	10.2	13.3	16.0	17.2	16.6	14.5	11.5	8.3	5.5	4.3	46°	17.7	15.1	15.5	7.9	5.2	4.0	4.4	6.5	9.7	13.4	16.7	18.3
5.3	7.6	10.6	13.7	16.1	17.2	16.6	14.7	11.9	8.7	6.0	4.7	44°	17.8	15.3	11.9	8.4	7.5	4.4	4.9	6.9	10.2	13.7	16.7	18.3
5.9	8.1	11.0	14.0	16.2	17.3	16.7	15.0	12.2	9.1	6.5	5.2	42°	17.8	15.5	12.	8.8	6.1	4.9	5.4	7.4	10.6	14.0	16.8	18.3
6.4	8.6	11.4	14.3	16.4	17.3	16.7	15.2	12.5	9.6	7.0	5.7	40°	17.9	15.7	12.5	9.2	6.6	5.3	5.9	7.9	11.0	14.2	16.9	18.3
6.9	9.0	11.8	14.5	16.4	17.2	16.7	15.3	12.8	10.0	7.5	6.1	38°	17.9	15.8	12.8	9.6	7.1	5.8	6.3	8.3	11.4	14.4	17.0	18.3
7.4	9.4	12.1	14.7	16.4	17.2	16.7	15.4	13.1	10.6	8.0	6.6	36°	17.9	16.0	13.2	10.1	7.5	6.3	6.6	8.8	11.7	14.6	17.0	18.2
7.9	9.8	12.4	14.8	16.4	17.1	16.8	15.5	13.4	10.8	8.5	7.2	34°	17.8	16.1	13.5	10.5	8.0	6.8	7.2	9.2	12.0	14.9	17.1	18.2
8.3	10.2	12.8	15.0	16.5	17.0	16.8	15.6	13.6	11.2	9.0	7.8	32°	17.8	16.2	13.8	10.9	8.5	7.3	7.7	9.6	12.4	15.1	17.2	18.1
8.8	10.7	13.1	15.2	16.5	17.0	16.6	15.7	13.9	11.6	9.5	8.3	30°	17.8	16.4	14.0	11.3	8.9	7.8	8.1	10.1	12.7	15.3	17.3	18.1
9.3	11.1	13.4	15.3	16.5	16.8	16.7	15.7	14.1	12.0	9.9	8.8	28°	17.7	6.4	14.3	11.6	9.3	8.2	8.6	10.4	13.0	15.4	17.2	17.9
9.8	11.5	13.7	15.3	16.4	16.7	16.6	15.7	14.3	12.3	10.3	9.3	26°	17.6	16.4	14.4	12.0	9.7	8.7	9.1	10.9	13.2	15.5	17.2	17.8
10.2	11.9	13.9	15.4	16.4	16.6	16.5	15.8	14.5	12.6	10.7	9.7	24°	17.5	16.5	14.6	12.3	10.2	9.1	9.5	11.2	13.4	15.6	17.1	17.7
10.7	12.3	14.2	15.5	16.3	16.4	16.4	15.8	14.6	13.0	11.1	10.2	22°	17.4	16.5	14.8	12.6	10.6	9.6	10.0	11.6	13.7	15.7	17.0	17.5
11.2	12.7	14.4	15.6	16.3	16.4	16.3	15.9	14.8	13.3	11.6	10.7	20°	17.3	16.5	15.0	13.0	11.0	10.0	10.4	2.0	13.9	15.8	17.0	17.4
11.6	13.0	14.6	15.6	16.1	16.1	16.1	15.8	14.9	13.6	12.0	11.1	18°	17.1	16.5	15.1	13.2	11.4	10.4	10.8	12.3	14.1	15.8	16.8	17.1
12.0	13.3	14.7	15.6	16.0	15.9	15.9	15.7	15.0	13.9	12.4	11.6	16°	16.9	16.4	15.2	13.5	11.7	10.8	11.2	12.6	14.3	15.8	16.7	16.8
12.4	13.6	14.9	15.7	15.8	15.7	15.7	15.7	15.1	14.1	12.8	12.0	14°	16.7	16.4	15.3	13.7	12.1	11.2	11.6	12.9	14.5	15.8	16.5	16.6
12.8	13.9	15.1	15.7	15.7	15.5	15.5	15.6	15.2	14.4	13.3	12.5	12°	16.6	16.3	15.4	14.0	12.5	11.6	12.0	13.2	14.7	15.8	16.4	16.5
13.2	14.2	15.3	15.7	15.5	15.3	15.3	15.5	15.3	14.7	13.6	12.9	10°	16.4	16.3	15.5	14.2	12.8	12.0	12.4	13.5	14.8	15.9	12.2	16.2
13.6	14.5	15.3	15.6	15.3	15.3	15.1	15.4	15.3	14.8	13.9	13.3	8°	16.1	16.1	15.5	14.4	13.1	12.4	12.7	13.7	14.9	15.8	16.0	16.0
13.5	14.8	15.4	15.4	15.1	14.7	14.9	15.2	15.3	15.0	14.2	13.7	6°	15.8	16.0	15.6	14.7	13.4	12.8	13.1	14.0	15.0	15.7	15.8	15.7
14.3	15.0	15.5	15.5	14.9	14.4	14.6	15.1	15.3	15.1	14.5	14.1	4°	15.5	15.8	15.6	14.9	13.8	13.2	13.4	14.3	15.1	15.6	15.5	15.4

14.7	15.0	15.0	15.3	14.6	14.2	14.3	14.9	15.3	15.3	14.8	14.4	2°	15.3	15.7	15.7	15.1	14.1	13.5	13.7	14.5	15.2	15.5	15.3	15.1
15.0	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8	0°	15.0	15.2	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8

Fuente: (Vásquez et al, 2017)

Tabla B-3

Promedio diario máximo de la duración de la insolación en horas (N) varía según los meses y las latitudes.

Latitud Norte	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Latitud sur	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
50°	8.5	10.1	11.8	13.8	15.4	16.3	15.9	14.5	12.7	10.8	9.1	8.1
48°	8.8	10.2	11.8	13.6	15.2	16.0	15.6	14.3	12.6	10.9	9.3	8.3
46°	9.1	10.4	11.9	13.5	14.9	15.7	15.4	14.2	12.6	10.9	9.5	8.7
44°	9.3	10.5	11.9	13.4	14.7	15.4	15.2	14.0	12.6	11.0	9.7	8.9
42°	9.4	10.6	11.9	13.4	14.6	15.2	14.9	13.9	12.9	11.1	9.8	9.1
40°	9.6	10.7	11.9	13.3	14.4	15.0	14.7	13.7	12.5	11.2	10.1	9.3
35°	10.1	11.0	11.9	13.1	14.0	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8
30°	10.4	11.1	12.0	12.9	13.6	14.0	13.9	13.2	12.4	11.5	10.6	10.2
25°	10.7	11.3	12.0	12.7	13.3	13.7	13.5	13.0	12.3	11.6	10.9	10.6
20°	11.0	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
15°	11.3	11.6	12.0	12.5	12.3	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
10°	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5
5°	11.8	11.9	12.0	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12	11.9	11.8
0°	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1

Fuente: (Vásquez et al, 2017)

Tabla B-4

El factor de potencial de evapotranspiración (MF) se expresa en milímetros por mes.

Lat.	MESES											
	Sur	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov
1	2.788	2.117	2.354	2.197	2.137	1.990	2.091	2.216	2.256	2.358	2.234	2.265
2	2.371	2.136	2.357	2.182	2.108	1.956	2.050	2.194	2.251	2.372	2.263	2.301
3	2.353	2.154	2.360	2.167	2.079	1.922	2.026	2.172	2.246	2.386	2.290	2.337
4	2.385	2.172	2.362	2.151	2.050	1.888	1.995	2.150	2.240	2.398	2.318	2.372
5	2.416	2.189	2.363	2.134	2.020	1.854	1.960	2.126	2.234	2.411	2.345	2.407
6	2.447	2.050	2.363	2.117	1.980	1.820	1.976	2.103	2.226	2.422	2.371	2.442
7	2.478	2.221	2.363	2.099	1.959	1.785	1.893	2.078	2.218	2.233	2.397	2.476
8	2.508	2.237	2.362	2.081	1.927	1.750	1.858	2.054	2.210	2.443	2.423	2.510
9	2.538	2.251	2.360	2.062	1.896	1.715	1.824	2.028	2.201	2.453	2.448	2.544
10	2.567	2.266	2.357	2.043	1.864	1.679	1.789	2.003	2.191	2.462	2.473	2.577
11	2.596	2.279	2.354	2.023	1.832	1.644	1.754	1.976	2.180	2.470	2.497	2.610
12	2.625	2.292	2.350	2.002	1.799	1.608	1.719	1.950	2.169	2.477	2.520	2.643
13	2.652	2.305	2.345	1.981	1.767	1.572	1.684	1.922	2.157	2.464	2.543	2.675
14	2.680	2.317	2.340	1.959	1.733	1.536	1.648	1.895	2.144	2.490	2.566	2.706
15	2.707	2.326	2.334	2.937	1.700	1.500	1.612	1.867	2.131	2.496	2.588	2.738
16	2.734	2.339	2.317	1.914	1.666	1.464	1.576	1.838	2.117	2.500	2.610	2.769
17	2.760	2.349	2.319	1.891	1.632	1.427	1.540	1.809	2.103	2.504	2.631	2.799
18	2.785	2.359	2.311	1.867	1.598	1.391	1.504	1.780	2.068	2.508	2.651	2.830
19	2.811	2.368	2.302	1.843	1.564	1.354	1.467	1.750	2.072	2.510	2.671	2.859

Fuente: (Vásquez et al, 2017)

Tabla B-5*La constante psicrométrica (γ) varía según la altitud (z).*

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.665 + 10^{-3} \quad \text{Ec. 1.4.1}$$

z (m)	γ Kpa °C ⁻¹	z (m)	γ Kpa °C ⁻¹	z (m)	γ Kpa °C ⁻¹	z (m)	γ Kpa °C ⁻¹
0	0.067	1 000	0.060	2 000	0.053	3 000	0.047
100	0.067	1 100	0.059	2 100	0.052	3 100	0.046
200	0.066	1 200	0.058	2 200	0.052	3 200	0.046
300	0.065	1 300	0.058	2 300	0.051	3 300	0.045
400	0.064	1 400	0.057	2 400	0.051	3 400	0.045
500	0.064	1 500	0.056	2 500	0.050	3 500	0.044
600	0.063	1 600	0.056	2 600	0.049	3 600	0.043
700	0.062	1 700	0.055	2 700	0.049	3 700	0.043
800	0.061	1 800	0.054	2 800	0.048	3 800	0.042
900	0.061	1 900	0.054	2 900	0.047	3 900	0.042
1 000	0.060	2 000	0.053	3 000	0.047	4 000	0.041

Fuente: (Allen et al., 2006)

Tabla B-6

La pendiente de la curva de presión de vapor (Δ) cambia según la temperatura (T).

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 * \exp \left(\frac{17.27 * T}{T + 237.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad \text{Ec. 1.4.2}$$

T °C	Δ kPa/°C	T °C	Δ kPa/°C	T °C	Δ kPa/°C	T °C	Δ kPa/°C
1.0	0.047	13.0	0.098	25.0	0.189	37.0	0.342
1.5	0.049	13.5	0.101	25.5	0.194	37.5	0.350
2.0	0.050	14.0	0.104	26.0	0.199	38.0	0.358
2.5	0.052	14.5	0.107	26.5	0.204	38.5	0.367
3.0	0.054	15.0	0.110	27.0	0.209	39.0	0.375
3.5	0.055	15.5	0.113	27.5	0.215	39.5	0.384
4.0	0.057	16.0	0.116	28.0	0.220	40.0	0.393
4.5	0.059	16.5	0.119	28.5	0.226	40.5	0.402
5.0	0.061	17.0	0.123	29.0	0.231	41.0	0.412
5.5	0.063	17.5	0.126	29.5	0.237	41.5	0.421
6.0	0.065	18.0	0.130	30.0	0.243	42.0	0.431
6.5	0.067	18.5	0.133	30.5	0.249	42.5	0.441
7.0	0.069	19.0	0.137	31.0	0.256	43.0	0.451
7.5	0.071	19.5	0.141	31.5	0.262	43.5	0.461
8.0	0.073	20.0	0.145	32.0	0.269	44.0	0.471
8.5	0.075	20.5	0.149	32.5	0.275	44.5	0.782
9.0	0.078	21.0	0.153	33.0	0.282	45.0	0.493
9.5	0.080	21.5	0.157	33.5	0.289	45.5	0.504
10.0	0.082	22.0	0.161	34.0	0.296	46.0	0.515
10.5	0.085	22.5	0.165	34.5	0.303	46.5	0.526
11.0	0.087	23.0	0.170	35.0	0.311	47.0	0.538
11.5	0.090	23.5	0.174	35.5	0.318	47.5	0.550
12.0	0.092	24.0	0.179	36.0	0.326	48.0	0.560
12.5	0.095	24.5	0.184	36.5	0.334	48.5	0.574

Fuente: (Allen et al., 2006)


ANEXO C

DATOS METEOROLÓGICOS REQUERIDOS

PARA LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Tabla C-1


Registro mensual de temperatura mínima

 GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA RED HIDROMETEOROLÓGICA REGISTRO MENSUAL DE TEMPERATURA MÍNIMA (°C)												
ESTACIÓN		: INIA CANAAN		Latitud:		: 13° 10' 00.06" S		Dpto:		AYACUCHO		
PARÁMETRO:		TEMPERATURAS MÍNIMA		Longitud:		: 74° 12' 22.92" W		Prov:		HUAMANGA		
				Altitud:		: 2735		Dist:		AYACUCHO		
										CÓDIGO DE DATOS:		
										008-22		
AÑO	MES											
	ENE	FEB	MAR	ABRIL	MAY	JUN	JUL	AGOS	SET	OCT	NOV	DIC
2017	11.14	10.48	11.53	10.11	9.47	8.23	6.52	8.34	10.79	9.98	11.01	10.63
2018	11.00	11.06	11.39	10.10	8.14	7.42	7.44	8.01	9.65	11.22	11.21	9.88
2019	11.98	11.28	11.26	9.09	7.89	6.63	6.67	7.06	9.93	10.41	11.15	11.30
2020	11.09	11.75	11.34	9.83	8.84	8.03	7.34	8.65	9.89	10.30	11.17	11.47
2021	11.42	10.87	11.33	10.27	8.08	7.77	6.92	9.07	10.31	11.18	11.23	11.52
MEDIA	11.33	11.09	11.37	9.88	8.48	7.61	6.98	8.22	10.11	10.62	11.15	10.96

Fuente: OPEMAN-Gobierno Regional de Ayacucho - 2022

Tabla C-2


Registro mensual de temperatura máxima

 GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA RED HIDROMETEOROLÓGICA REGISTRO MENSUAL DE TEMPERATURA MÁXIMA (°C)												
ESTACIÓN	: INIA CANAAN		Latitud:	: 13° 10' 00.06" S	Dpto:	AYACUCHO	Longitud:	: 74° 12' 22.92" W	Prov:	HUAMANGA	CÓDIGO DE DATOS:	
PARÁMETRO:	TEMPERATURA MÁXIMA		Altitud:	: 2735	Dist:	AYACUCHO					008-22	
AÑO	MES											
	ENE	FEB	MAR	ABRIL	MAY	JUN	JUL	AGOS	SET	OCT	NOV	DIC
2017	23.26	23.46	22.76	24.09	23.88	24.49	23.90	25.85	25.16	26.42	26.33	25.54
2018	22.62	24.00	23.34	24.09	24.66	23.43	23.28	23.63	26.31	24.80	27.17	25.98
2019	24.78	23.01	23.49	25.21	25.27	25.19	24.83	24.86	24.73	25.55	25.85	24.21
2020	24.45	24.30	24.03	25.13	24.85	24.92	24.97	25.36	24.13	24.36	27.11	24.44
2021	23.81	24.12	22.76	23.38	23.78	24.13	24.30	25.07	24.81	26.95	25.46	25.14
MEDIA	23.78	23.78	23.28	24.38	24.49	24.43	24.26	24.95	25.03	25.62	26.38	25.06

Fuente: OPEMAN-Gobierno Regional de Ayacucho - 2022

Tabla C-3


Registro mensual de temperatura media

		 GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA RED HIDROMETEOROLÓGICA REGISTRO MENSUAL DE TEMPERATURA MEDIA (°C)											
		ESTACIÓN	PARÁMETRO:	Latitud:	Longitud:	Altitud:	Dpto:	Prov:	Dist:	CÓDIGO DE DATOS:			
		: INIA CANAAN		: 13° 10' 00.06" S	: 74° 12' 22.92" W	: 2735	AYACUCHO	HUAMANGA	AYACUCHO	008-22			
AÑO	MES												
	ENE	FEB	MAR	ABRIL	MAY	JUN	JUL	AGOS	SET	OCT	NOV	DIC	
2017	17.20	16.97	17.15	17.10	16.68	16.36	15.21	17.09	17.97	18.20	18.67	18.09	
2018	16.81	17.53	17.37	17.10	16.40	15.43	15.36	15.82	17.98	18.01	19.19	17.93	
2019	18.38	17.14	17.37	17.15	16.58	15.91	15.75	15.96	17.33	17.98	18.50	17.75	
2020	17.77	18.02	17.69	17.48	16.84	16.47	16.15	17.00	17.01	17.33	19.14	17.95	
2021	17.61	17.50	17.05	16.83	15.93	15.95	15.61	17.07	17.56	19.07	18.35	18.33	
MEDIA	17.55	17.43	17.32	17.13	16.49	16.02	15.62	16.59	17.57	18.12	18.77	18.01	

Fuente: OPEMAN-Gobierno Regional de Ayacucho - 2022

Tabla C-4


Registro mensual de humedad relativa

 GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA RED HIDROMETEOROLÓGICA REGISTRO MENSUAL DE HUMEDAD RELATIVA (%)												
ESTACIÓN	: INIA CANAAN		Latitud:	: 13° 10' 00.06" S	Dpto:	AYACUCHO	Longitud:	: 74° 12' 22.92" W	Prov:	HUAMANGA	CÓDIGO DE DATOS:	
PARÁMETRO:	HUMEDA RELATIVA		Altitud:	: 2735	Dist:	AYACUCHO					008-22	
AÑO	MES											
	ENE	FEB	MAR	ABRIL	MAY	JUN	JUL	AGOS	SET	OCT	NOV	DIC
2017	87.90	85.46	89.74	85.10	34.26	83.40	85.10	78.42	75.53	78.10	81.23	81.88
2018	79.90	80.21	81.13	79.67	83.55	81.33	77.77	80.10	75.23	82.03	77.07	78.16
2019	74.55	81.36	82.71	78.73	76.97	74.20	74.03	69.32	71.57	67.94	70.50	76.77
2020	83.58	84.52	83.74	77.33	81.26	81.23	80.32	77.97	81.30	83.42	81.17	86.13
2021	88.61	88.57	90.00	89.83	88.45	86.53	85.00	84.23	77.83	76.03	78.17	79.74
MEDIA	82.91	84.02	85.46	82.13	72.90	81.34	80.45	78.01	76.29	77.50	77.63	80.54

Fuente: OPEMAN-Gobierno Regional de Ayacucho - 2022

Tabla C-5


Registro mensual de tanque de evaporación

		GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA RED HIDROMETEOROLÓGICA			REGISTRO MENSUAL DE TANQUE DE EVAPORACIÓN (mm)								
		ESTACIÓN : INIA CANAAN			Latitud: : 13° 10' 00.06" S	Dpto: AYACUCHO	Longitud: : 74° 12' 22.92" W			Prov: HUAMANGA	CÓDIGO DE DATOS:		
PARÁMETRO: TANQUE DE EVAPORACIÓN		Altitud: : 2735			Dist: AYACUCHO			008-22					
AÑO	MES												
	ENE	FEB	MAR	ABRIL	MAY	JUN	JUL	AGOS	SET	OCT	NOV	DIC	
2017	96.80	94.00	119.70	113.30	132.30	128.60	131.80	138.30	133.30	130.90	141.20	138.50	
2018	131.10	101.80	118.90	114.40	127.60	143.50	138.10	117.00	142.40	127.10	141.30	141.50	
2019	126.25	105.65	117.50	114.45	126.15	140.50	124.20	157.50	141.60	137.50	130.30	145.80	
2020	138.60	103.80	104.50	102.00	111.20	158.80	160.50	161.40	126.80	136.70	150.60	137.00	
2021	138.50	123.00	126.90	128.10	133.50	131.10	143.50	140.30	121.20	140.00	127.80	135.70	
MEDIA	126.25	105.65	117.50	114.45	126.15	140.50	139.62	142.90	133.06	134.44	138.24	139.70	

Fuente: OPEMAN-Gobierno Regional de Ayacucho - 2022

Tabla C-7


Registro mensual de velocidad de viento

		 GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA RED HIDROMETEOROLÓGICA REGISTRO MENSUAL DE VELOCIDAD DE VIENTO (m/s)													
		ESTACIÓN	PARÁMETRO:	Latitud:	Longitud:	Altitud:	Dpto:	Prov:	Dist:	CÓDIGO DE DATOS:					
		: INIA CANAAN		: 13° 10' 00.06" S		Dpto: AYACUCHO		: 74° 12' 22.92" W		Prov: HUAMANGA		008-22			
		VIENTO		: 2735		Dist: AYACUCHO									
AÑO	MES														
	ENE	FEB	MAR	ABRIL	MAY	JUN	JUL	AGOS	SET	OCT	NOV	DIC			
2017	2.14	1.76	2.39	1.98	1.93	1.77	1.88	1.76	2.00	2.55	2.97	2.33			
2018	2.32	1.91	1.84	1.59	1.69	1.37	1.57	2.20	1.79	2.13	1.98	2.60			
2019	3.50	3.68	1.77	1.71	1.48	1.27	1.74	1.46	1.76	2.40	2.80	2.19			
2020	4.58	3.62	1.77	1.71	1.48	1.27	1.74	1.65	1.92	2.13	2.23	2.68			
2021	2.01	2.64	2.30	1.89	1.75	1.59	1.37	1.87	1.89	3.10	2.44	2.59			
MEDIA	2.91	2.72	2.01	1.78	1.67	1.45	1.66	1.79	1.87	2.46	2.49	2.48			

Fuente: OPEMAN-Gobierno Regional de Ayacucho - 2022

Tabla C-8

Registro mensual horas sol

		 GOBIERNO REGIONAL DE AYACUCHO GERENCIA REGIONAL DE INFRAESTRUCTURA RED HIDROMETEOROLÓGICA REGISTRO MENSUAL HORAS SOL											
		ESTACIÓN	PARÁMETRO:	Latitud:	Longitud:	Altitud:	Dpto:	Prov:	Dist:	CÓDIGO DE DATOS:			
		: INIA CANAAN		: 13° 10' 00.06" S	: 74° 12' 22.92" W	: 2735	AYACUCHO	HUAMANGA	AYACUCHO	008-22			
AÑO	MES												
	ENE	FEB	MAR	ABRIL	MAY	JUN	JUL	AGOS	SET	OCT	NOV	DIC	
2017	6.29	6.50	4.79	7.17	8.10	8.55	9.77	7.89	8.65	7.03	8.17	6.86	
2018	5.90	5.85	6.80	6.51	9.31	9.11	8.24	8.11	8.34	6.30	8.18	8.24	
2019	7.40	7.55	6.96	8.70	8.87	8.36	8.86	9.36	8.37	8.79	8.51	7.72	
2020	7.55	8.46	8.43	8.92	8.13	9.10	8.41	9.10	7.95	7.70	8.64	7.53	
2021	7.73	7.41	7.04	7.89	7.35	9.57	8.23	8.55	8.27	6.97	7.39	7.94	
MEDIA	6.97	7.15	6.80	7.84	8.35	8.94	8.70	8.60	8.32	7.36	8.18	7.66	

Fuente: OPEMAN-Gobierno Regional de Ayacucho - 2022

ANEXO D

HOJAS DE CÁLCULO DE

EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA DE

DIFERENTES MÉTODOS

Tabla D-1

Evapotranspiración de referencia media mensual Tanque evaporímetro Clase A del año 2014-2021.

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	3.78	3.23	2.65	3.66	2.98	3.38	3.30	3.58	3.57
Feb	3.44	3.49	2.99	3.24	3.30	3.39	3.07	2.97	3.51
Mar	3.33	3.10	2.86	3.24	3.09	3.29	3.22	2.87	3.27
Abr	3.70	3.19	3.37	3.43	3.35	3.24	3.24	2.89	3.63
May	3.42	3.41	3.20	3.42	3.33	3.50	3.46	3.05	3.66
Jun	3.02	3.29	3.40	3.02	3.42	3.56	3.98	4.50	3.71
Jul	3.41	3.04	3.76	3.41	3.56	3.40	3.41	4.40	3.93
Ago	3.81	3.70	3.14	3.67	3.57	3.21	4.32	4.43	3.85
Set	4.13	3.57	3.24	4.03	3.95	4.03	4.01	3.59	3.43
Oct	3.82	3.83	3.28	4.08	3.89	3.49	3.55	3.75	3.61
Nov	4.27	4.42	2.99	4.27	4.06	4.00	3.47	4.27	3.41
Dic	4.11	3.89	2.55	4.11	3.80	3.88	3.76	3.76	3.50
Prom	3.69	3.51	3.12	3.63	3.52	3.53	3.57	3.67	3.59

FUENTE: Elaborado por tesista

Tabla D-2

Evapotranspiración de referencia media mensual FAO Penman Monteith del año 2013-2021.

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	3.91	3.79	3.79	4.31	3.75	3.81	4.70	4.23	4.08
Feb	3.47	3.69	3.86	3.37	3.82	3.84	4.30	4.32	3.97
Mar	3.62	3.33	3.62	3.41	3.11	3.78	3.91	4.11	3.56
Abr	3.93	3.31	3.45	3.61	3.47	3.41	4.04	3.98	3.44
May	3.31	3.35	3.31	3.45	3.23	3.44	3.60	3.29	2.99
Jun	3.18	3.16	3.08	3.15	3.12	3.06	3.23	3.15	3.11
Jul	3.07	2.89	3.16	3.21	3.26	3.08	3.47	3.22	3.01
Ago	3.60	3.54	3.48	3.61	3.61	3.47	3.94	3.78	3.57
Set	4.37	3.70	3.93	4.17	4.24	4.22	4.27	3.90	4.05
Oct	4.02	4.09	4.15	4.35	4.34	3.87	4.94	4.07	4.54
Nov	4.62	4.73	4.20	4.49	4.64	4.74	5.05	4.74	4.43
Dic	4.05	3.90	3.63	4.17	4.24	4.71	4.51	4.16	4.48
Prom	3.76	3.62	3.64	3.78	3.74	3.79	4.16	3.91	3.77

FUENTE: Elaborado por tesista

Tabla D-3

Evapotranspiración de referencia media mensual Hargreaves en función a radiación solar del año 2017.

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	3.91	3.71	3.74	4.12	3.93	3.76	4.41	4.39	4.42
Feb	3.87	4.01	4.34	3.81	4.36	4.20	4.74	5.18	4.74
Mar	3.64	3.26	3.74	3.54	3.25	3.88	3.93	4.41	3.92
Abr	4.00	3.28	3.64	3.81	3.75	3.56	4.20	4.30	3.93
May	3.26	3.40	3.14	3.55	3.46	3.74	3.65	3.49	3.20
Jun	3.19	3.13	3.16	3.45	3.42	3.46	3.33	3.57	3.62
Jul	3.04	2.78	3.17	3.49	3.58	3.24	3.42	3.36	3.26
Ago	3.53	3.44	3.32	3.75	3.63	3.55	3.89	3.94	3.80
Set	4.21	3.88	3.87	4.18	4.47	4.38	4.31	4.14	4.30
Oct	3.77	3.90	4.11	4.23	4.12	3.87	4.64	4.22	4.20
Nov	4.32	4.52	4.18	4.30	4.81	4.88	4.90	5.03	4.51
Dic	4.02	3.76	3.55	4.10	4.17	4.58	4.39	4.36	4.53
Prom	3.73	3.59	3.66	3.86	3.91	3.93	4.15	4.20	4.04

FUENTE: Elaborado por tesista

Tabla D-4

Evapotranspiración de referencia media mensual Hargreaves en función a temperatura del año 2013-2021.

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	4.00	4.06	3.91	4.29	3.29	4.19	4.93	3.89	3.23
Feb	3.67	3.90	3.48	2.99	3.44	4.08	3.91	3.66	3.10
Mar	3.54	3.29	3.03	2.86	2.67	3.64	3.48	3.41	2.62
Abr	3.65	3.39	2.81	2.89	2.80	3.27	3.35	3.49	2.29
May	3.03	3.10	2.11	2.76	2.54	2.48	2.95	2.68	2.05
Jun	2.81	2.96	2.34	2.21	2.29	2.36	2.81	2.44	2.04
Jul	2.72	2.95	2.47	2.37	2.17	2.67	2.91	2.57	2.21
Ago	3.53	3.62	3.01	2.92	3.16	2.92	3.64	3.18	2.70
Set	4.52	3.57	3.90	3.80	4.00	4.03	4.24	3.41	3.77
Oct	4.54	4.67	3.95	4.08	4.22	3.81	5.08	3.59	4.53
Nov	5.16	5.38	4.27	4.69	4.22	4.74	5.27	4.29	4.52
Dic	4.25	4.20	3.66	4.20	4.16	4.55	4.67	3.63	4.43
Prom	3.79	3.76	3.25	3.34	3.25	3.56	3.94	3.35	3.12

FUENTE: Elaborado por tesista

Tabla D-5*Evapotranspiración de referencia media mensual Jensen – Haise del año 2013-2021.*

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	4.20	3.99	4.00	4.58	4.21	4.01	4.85	4.76	4.79
Feb	3.77	3.94	4.24	3.76	4.20	4.10	4.59	5.10	4.62
Mar	3.93	3.49	4.05	3.83	3.49	4.18	4.23	4.78	4.19
Abr	4.17	3.39	3.79	4.04	3.89	3.69	4.35	4.49	4.05
May	3.45	3.63	3.40	3.81	3.68	3.94	3.86	3.71	3.35
Jun	3.22	3.20	3.20	3.49	3.49	3.46	3.36	3.65	3.66
Jul	3.09	2.90	3.27	3.61	3.67	3.34	3.56	3.52	3.38
Ago	3.68	3.63	3.53	4.02	3.88	3.70	4.06	4.21	4.07
Set	4.39	4.00	4.08	4.41	4.71	4.61	4.48	4.28	4.50
Oct	4.09	4.22	4.50	4.63	4.50	4.22	5.05	4.54	4.67
Nov	4.59	4.85	4.48	4.61	5.14	5.26	5.22	5.42	4.79
Dic	4.29	4.12	3.86	4.49	4.55	4.98	4.77	4.75	4.97
Prom	3.91	3.78	3.87	4.11	4.12	4.12	4.37	4.43	4.25

FUENTE: Elaborado por tesista

Tabla D-6*Evapotranspiración de referencia media mensual Makkink del año 2013-2021.*

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	3.48	3.30	3.35	3.59	3.50	3.37	3.89	3.90	3.94
Feb	3.10	3.19	3.48	3.02	3.52	3.37	3.83	4.15	3.81
Mar	3.22	2.89	3.32	3.13	2.89	3.45	3.50	3.93	3.50
Abr	3.44	2.81	3.12	3.23	3.23	3.06	3.63	3.70	3.40
May	2.92	3.03	2.76	3.16	3.10	3.36	3.27	3.11	2.89
Jun	2.78	2.70	2.75	3.01	2.97	3.04	2.91	3.10	3.17
Jul	2.78	2.49	2.88	3.17	3.27	2.94	3.10	3.02	2.95
Ago	3.19	3.08	2.97	3.34	3.23	3.22	3.53	3.52	3.39
Set	3.63	3.36	3.29	3.57	3.83	3.75	3.72	3.59	3.70
Oct	3.34	3.46	3.62	3.73	3.63	3.41	4.11	3.77	3.66
Nov	3.68	3.83	3.53	3.64	4.09	4.13	4.18	4.26	3.85
Dic	3.60	3.31	3.13	3.60	3.68	4.06	3.90	3.86	4.00
Prom	3.26	3.12	3.18	3.35	3.41	3.43	3.63	3.66	3.52

FUENTE: Elaborado por tesista

Tabla D-7*Evapotranspiración de referencia media mensual Turc del año 2013-2021.*

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	3.66	3.49	3.52	3.84	3.68	3.54	4.09	4.07	4.10
Feb	3.39	3.50	3.76	3.34	3.77	3.65	4.07	4.42	4.07
Mar	3.43	3.11	3.52	3.35	3.11	3.64	3.68	4.09	3.67
Abr	3.75	3.13	3.44	3.59	3.54	3.38	3.92	4.00	3.69
May	3.11	3.23	3.01	3.36	3.28	3.51	3.43	3.30	3.05
Jun	3.05	3.01	3.03	3.28	3.25	3.27	3.17	3.38	3.42
Jul	2.89	2.69	3.02	3.29	3.36	3.07	3.23	3.18	3.10
Ago	3.32	3.26	3.16	3.53	3.42	3.35	3.63	3.69	3.57
Set	3.93	3.65	3.64	3.90	4.15	4.07	4.01	3.87	4.01
Oct	3.55	3.66	3.83	3.93	3.84	3.63	4.28	3.93	3.90
Nov	4.02	4.19	3.90	4.00	4.44	4.49	4.51	4.62	4.18
Dic	3.75	3.54	3.36	3.82	3.88	4.23	4.07	4.04	4.19
Prom	3.49	3.37	3.43	3.60	3.64	3.65	3.84	3.88	3.75

FUENTE: Elaborado por tesista

ANEXO E

HOJAS DE CÁLCULO PARA LOS ÍNDICES

ESTADÍSTICOS

Tabla E-1

Hoja de cálculo Raíz del error cuadrático medio (RSME), Con Tanque Evaporímetro Clase A.

Mes	O_i		$(P_i - O_i)^2$	O_i		$(P_i - O_i)^2$	O_i		
	Tan	FAO 56		Tan	Hrs		Tan	Ht	
	mm/día	mm/día		mm/día	mm/día		mm/día	mm/día	
Ene	3.78	3.91	0.017	3.78	3.91	0.016	3.78	4.00	0.050
Feb	3.11	3.13	0.001	3.11	3.50	0.151	3.11	3.31	0.042
Mar	3.33	3.62	0.084	3.33	3.64	0.097	3.33	3.54	0.043
Abr	3.58	3.80	0.050	3.58	3.87	0.085	3.58	3.53	0.002
May	3.42	3.31	0.011	3.42	3.26	0.023	3.42	3.03	0.147
Jun	2.92	3.08	0.024	2.92	3.09	0.027	2.92	2.72	0.042
Jul	3.41	3.07	0.116	3.41	3.04	0.136	3.41	2.72	0.479
Ago	3.81	3.60	0.044	3.81	3.53	0.081	3.81	3.53	0.078
Set	4.00	4.23	0.052	4.00	4.07	0.005	4.00	4.37	0.136
Oct	3.82	4.02	0.039	3.82	3.77	0.002	3.82	4.54	0.509
Nov	4.13	4.47	0.114	4.13	4.18	0.002	4.13	5.00	0.745
Dic	4.11	4.05	0.004	4.11	4.02	0.009	4.11	4.25	0.021
Ene	3.23	3.79	0.312	3.23	3.71	0.231	3.23	4.06	0.691
Feb	3.16	3.33	0.032	3.16	3.62	0.219	3.16	3.52	0.132
Mar	3.10	3.33	0.051	3.10	3.26	0.025	3.10	3.29	0.034
Abr	3.09	3.20	0.013	3.09	3.17	0.006	3.09	3.28	0.038
May	3.41	3.35	0.004	3.41	3.40	0.000	3.41	3.10	0.094
Jun	3.18	3.06	0.015	3.18	3.03	0.022	3.18	2.86	0.102
Jul	3.04	2.89	0.023	3.04	2.78	0.067	3.04	2.95	0.009
Ago	3.70	3.54	0.025	3.70	3.44	0.069	3.70	3.62	0.006
Set	3.45	3.58	0.017	3.45	3.75	0.091	3.45	3.46	0.000
Oct	3.83	4.09	0.068	3.83	3.90	0.005	3.83	4.67	0.715
Nov	4.27	4.58	0.092	4.27	4.38	0.010	4.27	5.20	0.867
Dic	3.89	3.90	0.000	3.89	3.76	0.015	3.89	4.20	0.099
Ene	3.66	4.31	0.421	3.66	4.12	0.209	3.66	4.29	0.389
Feb	2.93	3.04	0.014	2.93	3.44	0.262	2.93	2.70	0.052
Mar	3.24	3.41	0.030	3.24	3.54	0.093	3.24	2.86	0.138
Abr	3.32	3.49	0.031	3.32	3.69	0.136	3.32	2.80	0.273
May	3.42	3.45	0.001	3.42	3.55	0.018	3.42	2.76	0.436
Jun	2.92	3.05	0.016	2.92	3.34	0.176	2.92	2.14	0.610
Jul	3.41	3.21	0.040	3.41	3.49	0.007	3.41	2.37	1.080
Ago	3.67	3.61	0.004	3.67	3.75	0.006	3.67	2.92	0.570
Set	3.90	4.04	0.019	3.90	4.04	0.021	3.90	3.68	0.047
Oct	4.08	4.35	0.073	4.08	4.23	0.021	4.08	4.08	0.000

Nov	4.13	4.35	0.045	4.13	4.16	0.001	4.13	4.54	0.167
Dic	4.11	4.17	0.004	4.11	4.10	0.000	4.11	4.20	0.008
Ene	2.98	3.75	0.588	2.98	3.93	0.891	2.98	3.29	0.092
Feb	2.98	3.45	0.221	2.98	3.94	0.913	2.98	3.11	0.016
Mar	3.09	3.11	0.000	3.09	3.25	0.027	3.09	2.67	0.179
Abr	3.24	3.36	0.013	3.24	3.63	0.149	3.24	2.71	0.289
May	3.33	3.23	0.009	3.33	3.46	0.019	3.33	2.54	0.612
Jun	3.31	3.02	0.083	3.31	3.31	0.000	3.31	2.21	1.194
Jul	3.56	3.26	0.089	3.56	3.58	0.000	3.56	2.17	1.923
Ago	3.57	3.61	0.001	3.57	3.63	0.003	3.57	3.16	0.172
Set	3.82	4.10	0.080	3.82	4.33	0.256	3.82	3.87	0.003
Oct	3.89	4.34	0.202	3.89	4.12	0.051	3.89	4.22	0.112
Nov	3.93	4.49	0.318	3.93	4.66	0.531	3.93	4.09	0.026
Dic	3.80	4.24	0.196	3.80	4.17	0.136	3.80	4.16	0.131
Ene	3.38	3.81	0.182	3.38	3.76	0.145	3.38	4.19	0.648
Feb	3.07	3.47	0.162	3.07	3.80	0.533	3.07	3.68	0.382
Mar	3.29	3.78	0.242	3.29	3.88	0.352	3.29	3.64	0.123
Abr	3.14	3.30	0.027	3.14	3.45	0.096	3.14	3.16	0.001
May	3.50	3.44	0.003	3.50	3.74	0.057	3.50	2.48	1.034
Jun	3.44	2.96	0.230	3.44	3.35	0.009	3.44	2.28	1.338
Jul	3.40	3.08	0.104	3.40	3.24	0.027	3.40	2.67	0.544
Ago	3.21	3.47	0.069	3.21	3.55	0.119	3.21	2.92	0.082
Set	3.90	4.08	0.032	3.90	4.23	0.109	3.90	3.90	0.000
Oct	3.49	3.87	0.148	3.49	3.87	0.148	3.49	3.81	0.104
Nov	3.87	4.59	0.508	3.87	4.72	0.723	3.87	4.58	0.502
Dic	3.88	4.71	0.689	3.88	4.58	0.487	3.88	4.55	0.445
Σ=	210.63	219.94	6.103	210.63	223.70	8.123	210.63	208.15	18.804
N=	120			N=	120		N=	120	
RMSE=	0.23			RMSE=	0.26		RMSE=	0.40	

Mes	O_i			$(P_i - O_i)^2$			O_i			$(P_i - O_i)^2$		
	Tan	J-H		Tan	Ma		Tan	Tc		Tan	Tc	
	mm/día	mm/día		mm/día	mm/día		mm/día	mm/día		mm/día	mm/día	
Ene	3.78	4.20	0.17	3.78	3.48	0.09	3.78	3.66	0.01	3.78	3.66	0.01
Feb	3.11	3.40	0.09	3.11	2.80	0.10	3.11	3.07	0.00	3.11	3.07	0.00
Mar	3.33	3.93	0.36	3.33	3.22	0.01	3.33	3.43	0.01	3.33	3.43	0.01
Abr	3.58	4.03	0.20	3.58	3.33	0.06	3.58	3.63	0.00	3.58	3.63	0.00
May	3.42	3.45	0.00	3.42	2.92	0.25	3.42	3.11	0.09	3.42	3.11	0.09
Jun	2.92	3.11	0.04	2.92	2.69	0.05	2.92	2.95	0.00	2.92	2.95	0.00
Jul	3.41	3.09	0.10	3.41	2.78	0.40	3.41	2.89	0.27	3.41	2.89	0.27
Ago	3.81	3.68	0.02	3.81	3.19	0.39	3.81	3.32	0.24	3.81	3.32	0.24
Set	4.00	4.24	0.06	4.00	3.51	0.24	4.00	3.80	0.04	4.00	3.80	0.04
Oct	3.82	4.09	0.07	3.82	3.34	0.24	3.82	3.55	0.08	3.82	3.55	0.08
Nov	4.13	4.44	0.09	4.13	3.56	0.33	4.13	3.89	0.06	4.13	3.89	0.06

Dic	4.11	4.29	0.03	4.11	3.60	0.26	4.11	3.75	0.13
Ene	3.23	3.99	0.58	3.23	3.30	0.00	3.23	3.49	0.07
Feb	3.16	3.56	0.16	3.16	2.88	0.07	3.16	3.16	0.00
Mar	3.10	3.49	0.15	3.10	2.89	0.04	3.10	3.11	0.00
Abr	3.09	3.28	0.04	3.09	2.72	0.14	3.09	3.03	0.00
May	3.41	3.63	0.05	3.41	3.03	0.15	3.41	3.23	0.03
Jun	3.18	3.10	0.01	3.18	2.62	0.32	3.18	2.91	0.07
Jul	3.04	2.90	0.02	3.04	2.49	0.30	3.04	2.69	0.12
Ago	3.70	3.63	0.01	3.70	3.08	0.38	3.70	3.26	0.20
Set	3.45	3.87	0.18	3.45	3.25	0.04	3.45	3.53	0.01
Oct	3.83	4.22	0.16	3.83	3.46	0.14	3.83	3.66	0.03
Nov	4.27	4.69	0.18	4.27	3.71	0.32	4.27	4.06	0.05
Dic	3.89	4.12	0.05	3.89	3.31	0.34	3.89	3.54	0.12
Ene	3.66	4.58	0.85	3.66	3.59	0.01	3.66	3.84	0.03
Feb	2.93	3.39	0.22	2.93	2.72	0.04	2.93	3.02	0.01
Mar	3.24	3.83	0.36	3.24	3.13	0.01	3.24	3.35	0.01
Abr	3.32	3.91	0.35	3.32	3.13	0.04	3.32	3.47	0.02
May	3.42	3.81	0.15	3.42	3.16	0.07	3.42	3.36	0.00
Jun	2.92	3.38	0.21	2.92	2.92	0.00	2.92	3.17	0.06
Jul	3.41	3.61	0.04	3.41	3.17	0.06	3.41	3.29	0.01
Ago	3.67	4.02	0.12	3.67	3.34	0.11	3.67	3.53	0.02
Set	3.90	4.27	0.14	3.90	3.45	0.20	3.90	3.77	0.02
Oct	4.08	4.63	0.30	4.08	3.73	0.12	4.08	3.93	0.02
Nov	4.13	4.46	0.11	4.13	3.52	0.37	4.13	3.87	0.07
Dic	4.11	4.49	0.15	4.11	3.60	0.26	4.11	3.82	0.08
Ene	2.98	4.21	1.51	2.98	3.50	0.27	2.98	3.68	0.48
Feb	2.98	3.80	0.66	2.98	3.18	0.04	2.98	3.41	0.18
Mar	3.09	3.49	0.16	3.09	2.89	0.04	3.09	3.11	0.00
Abr	3.24	3.76	0.27	3.24	3.13	0.01	3.24	3.42	0.03
May	3.33	3.68	0.12	3.33	3.10	0.05	3.33	3.28	0.00
Jun	3.31	3.38	0.01	3.31	2.87	0.19	3.31	3.15	0.03
Jul	3.56	3.67	0.01	3.56	3.27	0.08	3.56	3.36	0.04
Ago	3.57	3.88	0.10	3.57	3.23	0.12	3.57	3.42	0.02
Set	3.82	4.56	0.55	3.82	3.71	0.01	3.82	4.02	0.04
Oct	3.89	4.50	0.38	3.89	3.63	0.07	3.89	3.84	0.00
Nov	3.93	4.97	1.09	3.93	3.96	0.00	3.93	4.29	0.13
Dic	3.80	4.55	0.56	3.80	3.68	0.01	3.80	3.88	0.01
Ene	3.38	4.01	0.39	3.38	3.37	0.00	3.38	3.54	0.02
Feb	3.07	3.70	0.41	3.07	3.04	0.00	3.07	3.30	0.05
Mar	3.29	4.18	0.79	3.29	3.45	0.03	3.29	3.64	0.12
Abr	3.14	3.57	0.19	3.14	2.97	0.03	3.14	3.27	0.02
May	3.50	3.94	0.20	3.50	3.36	0.02	3.50	3.51	0.00
Jun	3.44	3.34	0.01	3.44	2.94	0.25	3.44	3.17	0.07
Jul	3.40	3.34	0.00	3.40	2.94	0.21	3.40	3.07	0.11
Ago	3.21	3.70	0.24	3.21	3.22	0.00	3.21	3.35	0.02
Set	3.90	4.46	0.31	3.90	3.63	0.08	3.90	3.94	0.00
Oct	3.49	4.22	0.54	3.49	3.41	0.01	3.49	3.63	0.02

Nov	3.87	5.09	1.49	3.87	4.00	0.01	3.87	4.35	0.22
Dic	3.88	4.98	1.22	3.88	4.06	0.03	3.88	4.23	0.12
Σ =	210.63	235.83	17.01	210.63	195.18	7.49	210.63	208.98	3.75
	N=	120		N=	120		N=	120	
	RMSE=	0.38		RMSE=	0.25		RMSE=	0.18	

Tabla E-4

Hojas de cálculo de Error Porcentual (PE)

Mes	<i>O_i</i>		<i>O_i O_i</i>		<i>O_i</i>	
	Tan mm/dia	FAO 56 mm/dia	Tan mm/dia	Hrs mm/dia	Tan mm/dia	Ht mm/dia
Ene	3.78	3.91	3.78	3.91	3.78	4.00
Feb	3.11	3.13	3.11	3.50	3.11	3.31
Mar	3.33	3.62	3.33	3.64	3.33	3.54
Abr	3.58	3.80	3.58	3.87	3.58	3.53
May	3.42	3.31	3.42	3.26	3.42	3.03
Jun	2.92	3.08	2.92	3.09	2.92	2.72
Jul	3.41	3.07	3.41	3.04	3.41	2.72
Ago	3.81	3.60	3.81	3.53	3.81	3.53
Set	4.00	4.23	4.00	4.07	4.00	4.37
Oct	3.82	4.02	3.82	3.77	3.82	4.54
Nov	4.13	4.47	4.13	4.18	4.13	5.00
Dic	4.11	4.05	4.11	4.02	4.11	4.25
Ene	3.23	3.79	3.23	3.71	3.23	4.06
Feb	3.16	3.33	3.16	3.62	3.16	3.52
Mar	3.10	3.33	3.10	3.26	3.10	3.29
Abr	3.09	3.20	3.09	3.17	3.09	3.28
May	3.41	3.35	3.41	3.40	3.41	3.10
Jun	3.18	3.06	3.18	3.03	3.18	2.86
Jul	3.04	2.89	3.04	2.78	3.04	2.95
Ago	3.70	3.54	3.70	3.44	3.70	3.62
Set	3.45	3.58	3.45	3.75	3.45	3.46
Oct	3.83	4.09	3.83	3.90	3.83	4.67
Nov	4.27	4.58	4.27	4.38	4.27	5.20
Dic	3.89	3.90	3.89	3.76	3.89	4.20
Ene	3.66	4.31	3.66	4.12	3.66	4.29
Feb	2.93	3.04	2.93	3.44	2.93	2.70
Mar	3.24	3.41	3.24	3.54	3.24	2.86
Abr	3.32	3.49	3.32	3.69	3.32	2.80
May	3.42	3.45	3.42	3.55	3.42	2.76
Jun	2.92	3.05	2.92	3.34	2.92	2.14

Jul	3.41	3.21	3.41	3.49	3.41	2.37
Ago	3.67	3.61	3.67	3.75	3.67	2.92
Set	3.90	4.04	3.90	4.04	3.90	3.68
Oct	4.08	4.35	4.08	4.23	4.08	4.08
Nov	4.13	4.35	4.13	4.16	4.13	4.54
Dic	4.11	4.17	4.11	4.10	4.11	4.20
Ene	2.98	3.75	2.98	3.93	2.98	3.29
Feb	2.98	3.45	2.98	3.94	2.98	3.11
Mar	3.09	3.11	3.09	3.25	3.09	2.67
Abr	3.24	3.36	3.24	3.63	3.24	2.71
May	3.33	3.23	3.33	3.46	3.33	2.54
Jun	3.31	3.02	3.31	3.31	3.31	2.21
Jul	3.56	3.26	3.56	3.58	3.56	2.17
Ago	3.57	3.61	3.57	3.63	3.57	3.16
Set	3.82	4.10	3.82	4.33	3.82	3.87
Oct	3.89	4.34	3.89	4.12	3.89	4.22
Nov	3.93	4.49	3.93	4.66	3.93	4.09
Dic	3.80	4.24	3.80	4.17	3.80	4.16
Ene	3.38	3.81	3.38	3.76	3.38	4.19
Feb	3.07	3.47	3.07	3.80	3.07	3.68
Mar	3.29	3.78	3.29	3.88	3.29	3.64
Abr	3.14	3.30	3.14	3.45	3.14	3.16
May	3.50	3.44	3.50	3.74	3.50	2.48
Jun	3.44	2.96	3.44	3.35	3.44	2.28
Jul	3.40	3.08	3.40	3.24	3.40	2.67
Ago	3.21	3.47	3.21	3.55	3.21	2.92
Set	3.90	4.08	3.90	4.23	3.90	3.90
Oct	3.49	3.87	3.49	3.87	3.49	3.81
Nov	3.87	4.59	3.87	4.72	3.87	4.58
Dic	3.88	4.71	3.88	4.58	3.88	4.55
Σ=	210.63	219.94	210.63	223.70	210.63	208.15
MEDIA	3.51	3.67	3.51	3.73	3.51	3.47
PE=	4.42		PE=	6.21	PE=	1.17

Mes	<i>O_i</i>		<i>O_i</i>		<i>O_i</i>	
	Tan	J- H	Tan	M	Tan	T
	mm/dia	mm/dia	mm/dia	mm/dia	mm/dia	mm/dia
Ene	3.78	4.20	3.78	3.48	3.78	3.66
Feb	3.11	3.40	3.11	2.80	3.11	3.07
Mar	3.33	3.93	3.33	3.22	3.33	3.43
Abr	3.58	4.03	3.58	3.33	3.58	3.63
May	3.42	3.45	3.42	2.92	3.42	3.11
Jun	2.92	3.11	2.92	2.69	2.92	2.95
Jul	3.41	3.09	3.41	2.78	3.41	2.89
Ago	3.81	3.68	3.81	3.19	3.81	3.32

Set	4.00	4.24	4.00	3.51	4.00	3.80
Oct	3.82	4.09	3.82	3.34	3.82	3.55
Nov	4.13	4.44	4.13	3.56	4.13	3.89
Dic	4.11	4.29	4.11	3.60	4.11	3.75
Ene	3.23	3.99	3.23	3.30	3.23	3.49
Feb	3.16	3.56	3.16	2.88	3.16	3.16
Mar	3.10	3.49	3.10	2.89	3.10	3.11
Abr	3.09	3.28	3.09	2.72	3.09	3.03
May	3.41	3.63	3.41	3.03	3.41	3.23
Jun	3.18	3.10	3.18	2.62	3.18	2.91
Jul	3.04	2.90	3.04	2.49	3.04	2.69
Ago	3.70	3.63	3.70	3.08	3.70	3.26
Set	3.45	3.87	3.45	3.25	3.45	3.53
Oct	3.83	4.22	3.83	3.46	3.83	3.66
Nov	4.27	4.69	4.27	3.71	4.27	4.06
Dic	3.89	4.12	3.89	3.31	3.89	3.54
Ene	3.66	4.58	3.66	3.59	3.66	3.84
Feb	2.93	3.39	2.93	2.72	2.93	3.02
Mar	3.24	3.83	3.24	3.13	3.24	3.35
Abr	3.32	3.91	3.32	3.13	3.32	3.47
May	3.42	3.81	3.42	3.16	3.42	3.36
Jun	2.92	3.38	2.92	2.92	2.92	3.17
Jul	3.41	3.61	3.41	3.17	3.41	3.29
Ago	3.67	4.02	3.67	3.34	3.67	3.53
Set	3.90	4.27	3.90	3.45	3.90	3.77
Oct	4.08	4.63	4.08	3.73	4.08	3.93
Nov	4.13	4.46	4.13	3.52	4.13	3.87
Dic	4.11	4.49	4.11	3.60	4.11	3.82
Ene	2.98	4.21	2.98	3.50	2.98	3.68
Feb	2.98	3.80	2.98	3.18	2.98	3.41
Mar	3.09	3.49	3.09	2.89	3.09	3.11
Abr	3.24	3.76	3.24	3.13	3.24	3.42
May	3.33	3.68	3.33	3.10	3.33	3.28
Jun	3.31	3.38	3.31	2.87	3.31	3.15
Jul	3.56	3.67	3.56	3.27	3.56	3.36
Ago	3.57	3.88	3.57	3.23	3.57	3.42
Set	3.82	4.56	3.82	3.71	3.82	4.02
Oct	3.89	4.50	3.89	3.63	3.89	3.84
Nov	3.93	4.97	3.93	3.96	3.93	4.29
Dic	3.80	4.55	3.80	3.68	3.80	3.88
Ene	3.38	4.01	3.38	3.37	3.38	3.54
Feb	3.07	3.70	3.07	3.04	3.07	3.30
Mar	3.29	4.18	3.29	3.45	3.29	3.64
Abr	3.14	3.57	3.14	2.97	3.14	3.27
May	3.50	3.94	3.50	3.36	3.50	3.51
Jun	3.44	3.34	3.44	2.94	3.44	3.17
Jul	3.40	3.34	3.40	2.94	3.40	3.07

Ago	3.21	3.70	3.21	3.22	3.21	3.35
Set	3.90	4.46	3.90	3.63	3.90	3.94
Oct	3.49	4.22	3.49	3.41	3.49	3.63
Nov	3.87	5.09	3.87	4.00	3.87	4.35
Dic	3.88	4.98	3.88	4.06	3.88	4.23
$\Sigma=$	210.63	235.83	210.63	195.18	210.63	208.98
MEDIA	3.51	3.93	3.51	3.25	3.51	3.48
PE=	11.97		7.33		0.78	

Tabla E-5

Hojas de cálculo de índice de concordancia (d), índice de correlación (r), índice de confianza (c), con Tanque Evaporímetro Clase A

Mes	O_i		$\frac{O_i}{(P_i - O_i + 2)}$		$\frac{O_i}{(O_i - O_i)}$		$\frac{(P_i - O_i + 2O_i)}{ O_i - O_i }$					
	Tan mm/día	FAO 56 mm/día	Tan mm/día	Hrs mm/día	Tan mm/día	Hrs mm/día	Tan mm/día	Ht mm/día				
Ene	3.78	3.91	2	0.45	3.78	3.91	0.02	0.44	3.78	4.00	0.05	0.58
Feb	3.11	3.13	0	0.60	3.11	3.50	0.15	0.17	3.11	3.31	0.04	0.36
Mar	3.33	3.62	8	0.08	3.33	3.64	0.10	0.10	3.33	3.54	0.04	0.04
Abr	3.58	3.80	5	0.13	3.58	3.87	0.08	0.18	3.58	3.53	0.00	0.01
May	3.42	3.31	1	0.09	3.42	3.26	0.02	0.12	3.42	3.03	0.15	0.33
Jun	2.92	3.08	2	1.04	2.92	3.09	0.03	1.02	2.92	2.72	0.04	1.90
Jul	3.41	3.07	2	0.29	3.41	3.04	0.14	0.33	3.41	2.72	0.48	0.80
Ago	3.81	3.60	4	0.15	3.81	3.53	0.08	0.10	3.81	3.53	0.08	0.10
Set	4.00	4.23	5	1.46	4.00	4.07	0.01	1.11	4.00	4.37	0.14	1.82
Oct	3.82	4.02	4	0.67	3.82	3.77	0.00	0.33	3.82	4.54	0.51	1.79
Nov	4.13	4.47	1	2.51	4.13	4.18	0.00	1.67	4.13	5.00	0.74	4.45
Dic	4.11	4.05	0	1.30	4.11	4.02	0.01	1.22	4.11	4.25	0.02	1.80
Ene	3.23	3.79	1	0.31	3.23	3.71	0.23	0.23	3.23	4.06	0.69	0.69
Feb	3.16	3.33	3	0.28	3.16	3.62	0.22	0.22	3.16	3.52	0.13	0.13
Mar	3.10	3.33	5	0.35	3.10	3.26	0.03	0.43	3.10	3.29	0.03	0.40
Abr	3.09	3.20	1	0.53	3.09	3.17	0.01	0.58	3.09	3.28	0.04	0.42
May	3.41	3.35	0	0.07	3.41	3.40	0.00	0.04	3.41	3.10	0.09	0.26

			0.0										
Jun	3.18	3.06	1	0.61	3.18	3.03	0.02	0.66	3.18	2.86	0.10	0.96	
			0.0										
Jul	3.04	2.89	2	1.18	3.04	2.78	0.07	1.43	3.04	2.95	0.01	1.06	
			0.0										
Ago	3.70	3.54	3	0.05	3.70	3.44	0.07	0.07	3.70	3.62	0.01	0.09	
			0.0										
Set	3.45	3.58	2	0.02	3.45	3.75	0.09	0.09	3.45	3.46	0.00	0.01	
			0.0										
Oct	3.83	4.09	7	0.81	3.83	3.90	0.01	0.50	3.83	4.67	0.71	2.20	
			0.0										
Nov	4.27	4.58	9	3.35	4.27	4.38	0.01	2.65	4.27	5.20	0.87	6.04	
			0.0										
Dic	3.89	3.90	0	0.59	3.89	3.76	0.02	0.40	3.89	4.20	0.10	1.14	
			0.4										
Ene	3.66	4.31	2	0.90	3.66	4.12	0.21	0.58	3.66	4.29	0.39	0.86	
			0.0										
Feb	2.93	3.04	1	1.10	2.93	3.44	0.26	0.43	2.93	2.70	0.05	1.94	
			0.0										
Mar	3.24	3.41	3	0.14	3.24	3.54	0.09	0.09	3.24	2.86	0.14	0.85	
			0.0										
Abr	3.32	3.49	3	0.04	3.32	3.69	0.14	0.14	3.32	2.80	0.27	0.82	
			0.0										
May	3.42	3.45	0	0.02	3.42	3.55	0.02	0.02	3.42	2.76	0.44	0.72	
			0.0										
Jun	2.92	3.05	2	1.10	2.92	3.34	0.18	0.57	2.92	2.14	0.61	3.83	
			0.0										
Jul	3.41	3.21	4	0.16	3.41	3.49	0.01	0.01	3.41	2.37	1.08	1.54	
			0.0										
Ago	3.67	3.61	0	0.07	3.67	3.75	0.01	0.16	3.67	2.92	0.57	0.57	
			0.0										
Set	3.90	4.04	2	0.83	3.90	4.04	0.02	0.84	3.90	3.68	0.05	0.31	
			0.0										
Oct	4.08	4.35	7	1.99	4.08	4.23	0.02	1.65	4.08	4.08	0.00	1.29	
			0.0										
Nov	4.13	4.35	4	2.12	4.13	4.16	0.00	1.62	4.13	4.54	0.17	2.74	
			0.0										
Dic	4.11	4.17	0	1.58	4.11	4.10	0.00	1.40	4.11	4.20	0.01	1.66	
			0.5										
Ene	2.98	3.75	9	0.59	2.98	3.93	0.89	0.89	2.98	3.29	0.09	0.56	
			0.2										
Feb	2.98	3.45	2	0.35	2.98	3.94	0.91	0.91	2.98	3.11	0.02	0.87	
			0.0										
Mar	3.09	3.11	0	0.68	3.09	3.25	0.03	0.46	3.09	2.67	0.18	1.60	
			0.0										
Abr	3.24	3.36	1	0.18	3.24	3.63	0.15	0.15	3.24	2.71	0.29	1.15	
			0.0										
May	3.33	3.23	1	0.22	3.33	3.46	0.02	0.05	3.33	2.54	0.61	1.32	
			0.0										
Jun	3.31	3.02	8	0.48	3.31	3.31	0.00	0.16	3.31	2.21	1.19	2.25	
			0.0										
Jul	3.56	3.26	9	0.09	3.56	3.58	0.00	0.01	3.56	2.17	1.92	1.92	
			0.0										
Ago	3.57	3.61	0	0.03	3.57	3.63	0.00	0.03	3.57	3.16	0.17	0.17	
			0.0										
Set	3.82	4.10	8	0.81	3.82	4.33	0.26	1.26	3.82	3.87	0.00	0.45	

Oct	3.89	4.34	0	1.46	3.89	4.12	0.05	0.97	3.89	4.22	0.11	1.20
Nov	3.93	4.49	2	1.95	3.93	4.66	0.53	2.44	3.93	4.09	0.03	0.99
Dic	3.80	4.24	0	1.03	3.80	4.17	0.14	0.89	3.80	4.16	0.13	0.88
Ene	3.38	3.81	8	0.18	3.38	3.76	0.14	0.14	3.38	4.19	0.65	0.65
Feb	3.07	3.47	6	0.24	3.07	3.80	0.53	0.53	3.07	3.68	0.38	0.38
Mar	3.29	3.78	4	0.24	3.29	3.88	0.35	0.35	3.29	3.64	0.12	0.12
Abr	3.14	3.30	3	0.34	3.14	3.45	0.10	0.19	3.14	3.16	0.00	0.52
May	3.50	3.44	0	0.01	3.50	3.74	0.06	0.06	3.50	2.48	1.03	1.08
Jun	3.44	2.96	3	0.38	3.44	3.35	0.01	0.05	3.44	2.28	1.34	1.68
Jul	3.40	3.08	0	0.29	3.40	3.24	0.03	0.14	3.40	2.67	0.54	0.91
Ago	3.21	3.47	7	0.12	3.21	3.55	0.12	0.12	3.21	2.92	0.08	0.79
Set	3.90	4.08	3	0.94	3.90	4.23	0.11	1.25	3.90	3.90	0.00	0.61
Oct	3.49	3.87	5	0.15	3.49	3.87	0.15	0.15	3.49	3.81	0.10	0.10
Nov	3.87	4.59	1	2.08	3.87	4.72	0.72	2.49	3.87	4.58	0.50	2.06
Dic	3.88	4.71	9	2.46	3.88	4.58	0.49	2.06	3.88	4.55	0.44	1.98
Σ =	210.63	219.94	6.10	42.27	210.63	223.70	8.12	9	210.63	208.15	0	68.7
Medi												
a	3.51	3.67			3.51	3.73			3.51	3.47		
d	=	0.86			=	0.78			=	0.73		
R²	=	0.67			=	0.51			=	0.52		
r	=	0.82			=	0.71			=	0.72		
c	=	0.70			=	0.56			=	0.52		

Mes	O_i				O_i				O_i				$(P_i - O +^2 O_i - O)$
	Tan mm/dí a	J-H mm/d ía	$(P_i - O_i)^2$		Tan mm/d ía	Ma mm/d ía	$(P_i - O_i)^2$		Tan mm/d ía	Tc mm/d ía	$(P_i - O_i)^2$		
Ene	3.78	4.20	0.17	0.9	3.78	3.48	0.09	0.0	3.78	3.66	0.01	0.1	
Feb	3.11	3.40	0.09	0.2	3.11	2.80	0.10	1.2	3.11	3.07	0.00	0.7	
Mar	3.33	3.93	0.36	0.3	3.33	3.22	0.01	0.2	3.33	3.43	0.01	0.0	

				0.3					0.0					0.0
Abr	3.58	4.03	0.20	5		3.58	3.33	0.06	6		3.58	3.63	0.00	4
				0.0					0.4					0.2
May	3.42	3.45	0.00	2		3.42	2.92	0.25	7		3.42	3.11	0.09	4
				0.9					1.9					1.3
Jun	2.92	3.11	0.04	7		2.92	2.69	0.05	9		2.92	2.95	0.00	1
				0.2					0.7					0.5
Jul	3.41	3.09	0.10	7		3.41	2.78	0.40	0		3.41	2.89	0.27	1
				0.2					0.3					0.2
Ago	3.81	3.68	0.02	2		3.81	3.19	0.39	9		3.81	3.32	0.24	4
				1.5					0.2					0.6
Set	4.00	4.24	0.06	0		4.00	3.51	0.24	4		4.00	3.80	0.04	1
				0.8					0.2					0.1
Oct	3.82	4.09	0.07	0		3.82	3.34	0.24	4		3.82	3.55	0.08	2
				2.4					0.4					1.0
Nov	4.13	4.44	0.09	0		4.13	3.56	0.33	5		4.13	3.89	0.06	1
				1.8					0.4					0.7
Dic	4.11	4.29	0.03	9		4.11	3.60	0.26	7		4.11	3.75	0.13	0
				0.5					0.2					0.0
Ene	3.23	3.99	0.58	8		3.23	3.30	0.00	4		3.23	3.49	0.07	9
				0.1					0.9					0.4
Feb	3.16	3.56	0.16	6		3.16	2.88	0.07	6		3.16	3.16	0.00	9
				0.1					1.0					0.6
Mar	3.10	3.49	0.15	8		3.10	2.89	0.04	5		3.10	3.11	0.00	5
				0.4					1.4					0.8
Abr	3.09	3.28	0.04	2		3.09	2.72	0.14	7		3.09	3.03	0.00	1
				0.0					0.3					0.1
May	3.41	3.63	0.05	5		3.41	3.03	0.15	4		3.41	3.23	0.03	5
				0.5					1.5					0.8
Jun	3.18	3.10	0.01	5		3.18	2.62	0.32	0		3.18	2.91	0.07	6
				1.1					2.2					1.6
Jul	3.04	2.90	0.02	6		3.04	2.49	0.30	0		3.04	2.69	0.12	5
				0.0					0.3					0.2
Ago	3.70	3.63	0.01	9		3.70	3.08	0.38	8		3.70	3.26	0.20	0
				0.1					0.1					0.0
Set	3.45	3.87	0.18	8		3.45	3.25	0.04	0		3.45	3.53	0.01	1
				1.0					0.1					0.2
Oct	3.83	4.22	0.16	7		3.83	3.46	0.14	4		3.83	3.66	0.03	2
				3.7					0.9					1.7
Nov	4.27	4.69	0.18	8		4.27	3.71	0.32	2		4.27	4.06	0.05	1
				0.9					0.3					0.1
Dic	3.89	4.12	0.05	8		3.89	3.31	0.34	4		3.89	3.54	0.12	7
				1.4					0.0					0.2
Ene	3.66	4.58	0.85	9		3.66	3.59	0.01	5		3.66	3.84	0.03	3
				0.4					1.8					1.1
Feb	2.93	3.39	0.22	9		2.93	2.72	0.04	8		2.93	3.02	0.01	5
				0.3					0.4					0.1
Mar	3.24	3.83	0.36	6		3.24	3.13	0.01	3		3.24	3.35	0.01	9
				0.3					0.3					0.0
Abr	3.32	3.91	0.35	5		3.32	3.13	0.04	3		3.32	3.47	0.02	5
				0.1					0.2					0.0
May	3.42	3.81	0.15	5		3.42	3.16	0.07	0		3.42	3.36	0.00	6
				0.5					1.3					0.8
Jun	2.92	3.38	0.21	2		2.92	2.92	0.00	9		2.92	3.17	0.06	6
				0.0					0.1					0.1
Jul	3.41	3.61	0.04	4		3.41	3.17	0.06	9		3.41	3.29	0.01	0

				0.4					0.1				0.0	
Ago	3.67	4.02	0.12	6		3.67	3.34	0.11	1		3.67	3.53	0.02	3
				1.3					0.2					0.4
Set	3.90	4.27	0.14	1		3.90	3.45	0.20	0		3.90	3.77	0.02	2
				2.8					0.6					0.9
Oct	4.08	4.63	0.30	4		4.08	3.73	0.12	2		4.08	3.93	0.02	8
				2.4					0.4					0.9
Nov	4.13	4.46	0.11	7		4.13	3.52	0.37	0		4.13	3.87	0.07	7
				2.5					0.4					0.8
Dic	4.11	4.49	0.15	0		4.11	3.60	0.26	8		4.11	3.82	0.08	3
				1.5					0.2					0.4
Ene	2.98	4.21	1.51	1		2.98	3.50	0.27	8		2.98	3.68	0.48	8
				0.6					0.7					0.4
Feb	2.98	3.80	0.66	6		2.98	3.18	0.04	4		2.98	3.41	0.18	0
				0.2					1.1					0.6
Mar	3.09	3.49	0.16	0		3.09	2.89	0.04	0		3.09	3.11	0.00	8
				0.2					0.4					0.1
Abr	3.24	3.76	0.27	7		3.24	3.13	0.01	2		3.24	3.42	0.03	3
				0.1					0.3					0.1
May	3.33	3.68	0.12	2		3.33	3.10	0.05	6		3.33	3.28	0.00	7
				0.1					0.7					0.3
Jun	3.31	3.38	0.01	1		3.31	2.87	0.19	1		3.31	3.15	0.03	2
				0.0					0.0					0.0
Jul	3.56	3.67	0.01	4		3.56	3.27	0.08	8		3.56	3.36	0.04	4
				0.1					0.1					0.0
Ago	3.57	3.88	0.10	9		3.57	3.23	0.12	2		3.57	3.42	0.02	2
				1.8					0.2					0.6
Set	3.82	4.56	0.55	4		3.82	3.71	0.01	6		3.82	4.02	0.04	6
				1.8					0.2					0.5
Oct	3.89	4.50	0.38	9		3.89	3.63	0.07	5		3.89	3.84	0.00	0
				3.5					0.7					1.4
Nov	3.93	4.97	1.09	3		3.93	3.96	0.00	5		3.93	4.29	0.13	3
				1.7					0.2					0.4
Dic	3.80	4.55	0.56	6		3.80	3.68	0.01	1		3.80	3.88	0.01	3
				0.3					0.0					0.0
Ene	3.38	4.01	0.39	9		3.38	3.37	0.00	7		3.38	3.54	0.02	2
				0.4					0.8					0.4
Feb	3.07	3.70	0.41	1		3.07	3.04	0.00	4		3.07	3.30	0.05	3
				0.7					0.0					0.1
Mar	3.29	4.18	0.79	9		3.29	3.45	0.03	8		3.29	3.64	0.12	2
				0.1					0.8					0.3
Abr	3.14	3.57	0.19	9		3.14	2.97	0.03	4		3.14	3.27	0.02	8
				0.2					0.0					0.0
May	3.50	3.94	0.20	0		3.50	3.36	0.02	3		3.50	3.51	0.00	0
				0.0					0.4					0.1
Jun	3.44	3.34	0.01	6		3.44	2.94	0.25	0		3.44	3.17	0.07	7
				0.0					0.4					0.3
Jul	3.40	3.34	0.00	8		3.40	2.94	0.21	6		3.40	3.07	0.11	0
				0.2					0.3					0.2
Ago	3.21	3.70	0.24	4		3.21	3.22	0.00	5		3.21	3.35	0.02	2
				1.8					0.2					0.6
Set	3.90	4.46	0.31	2		3.90	3.63	0.08	6		3.90	3.94	0.00	8
				0.5					0.0					0.0
Oct	3.49	4.22	0.54	4		3.49	3.41	0.01	2		3.49	3.63	0.02	2
				3.7					0.7					1.4
Nov	3.87	5.09	1.49	9		3.87	4.00	0.01	2		3.87	4.35	0.22	4

Dic	3.88	4.98	1.22	3.3 9	3.88	4.06	0.03	0.8 5	3.88	4.23	0.12	1.1 8
Σ =	210.63	235.83	17.01	56.1 6	210.63	195.18	7.49	32.6 5	210.63	208.98	3.75	28.8 6
Med ia	3.51	3.93			3.51	3.25			3.51	3.48		
d	=	0.70			=	0.77			=	0.87		
R²	=	0.57			=	0.59			=	0.59		
r	=	0.76			=	0.77			=	0.77		
c	=	0.53			=	0.59			=	0.67		



ANEXO F
PANEL FOTOGRAFICO



Figura F-1

Cartel de estación meteorológica de INIA - Canaán.



Figura F-2

Vista panorámica de estación meteorológica INIA - Canaán.



Figura F-3

Termómetro y psicrómetro de la estación meteorológica del INIA - Canaán



Figura F-4

Tanque evaporímetro Clase A de la estación meteorológica del INIA - Canaán



Figura F-5

Heliógrafo de la estación meteorológica del INIA - Canaán



Figura F-6

Pluviógrafo de la estación meteorológica del INIA - Canaán



Figura F-7

Placa recordatoria del Gobierno Regional de Ayacucho en la estación meteorológica de INIA - Canaán





ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Bach. YONATAN AYALA PRADO

R.D. N° 016-2024-UNSCH-FCA-D

En la ciudad de Ayacucho a los dos días del mes de febrero del año dos mil veinticuatro, siendo las dieciocho horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia del Dr. Felipe Escobar Ramírez Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias, los miembros del jurado conformado por la Ph.D. Sandra Del Águila Ríos, Ing. Efraín Chuchón Prado, como asesor, Mtro. Richard Alex Oscco Peceros y MSc. Eleazar Chuchón Angulo; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulada: **Comparación de modelos alternativos para la estimación de evapotranspiración de referencia en la estación meteorológica de INIA - Ayacucho - 2022.** para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agrícola presentado por el Bachiller **YONATAN AYALA PRADO.**

El señor Decano, previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, aclaraciones y/o observaciones correspondientes. Luego se invito a los miembros del jurado pasar a otra aula para la deliberacion y calificación del trabajo de tesis, teniendo el siguiente resultado:

Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
Ph.D. Sandra Del Águila Ríos	14	14	14	14
Ing. Efraín Chuchón Prado	16	15	14	15
Mtro. Richard Alex Oscco Peceros	16	16	16	16
MSc. Eleazar Chuchón Angulo	11	11	11	11
PROMEDIO GENERAL				14

Acto seguido se invita al sustentante y publico en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.

Ph.D. Sandra Del Águila Ríos
Presidente

Ing. Efraín Chuchón Prado
Asesor

Mtro. Richard Alex Oscco Peceros
Jurado

MSc. Eleazar Chuchón Angulo
Jurado

Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Secretario Docente



UNSCH

FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS

CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe coordinador responsable de la valoración y verificación de originalidad de los trabajos de investigación y de tesis de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, designado mediante la RCF N° 005-2024-UNSCH-FCA-CF; hace constar que el trabajo de tesis titulado;

Comparación de modelos alternativos para la estimación de evapotranspiración de referencia en la estación meteorológica de INIA-Ayacucho-2022

Autor : Yonatan Ayala Prado
Asesor : Efraín Chuchón Prado

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de investigación, aprobado mediante RCU N° 039-2021-UNSCH-CU, y RCU N° 1530-2023-UNSCH-CU, emitiendo un resultado de **dieciséis por ciento (16 %)** de índice de similitud, realizado con **depósito de trabajos estándar**.

En consecuencia, se otorga la presente Constancia de Originalidad para los fines pertinentes.

Nota: Se adjunta el resultado con Identificador de la entrega: 2315290352

Ayacucho, 08 de marzo de 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ciencias Agrarias

Dr. Yuri Gálvez Gasteji
Coordinador de Control de Originalidad de
trabajo de investigación y tesis - FCA

Comparación de modelos alternativos para la estimación de evapotranspiración de referencia en la estación meteorológica de INIA- Ayacucho-2022

por YONATAN AYALA PRADO

Fecha de entrega: 08-mar-2024 12:00p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2315290352

Nombre del archivo:

Comparación_de_modelos_alternativos_para_la_estimación_de_evapotranspiración_de_referencia_en_la_estación_meteorológica_de_INIA-Ayacucho-2022.docx (14.1M)

Total de palabras: 27564

Total de caracteres: 141296

Comparación de modelos alternativos para la estimación de evapotranspiración de referencia en la estación meteorológica de INIA-Ayacucho-2022

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%

INDICE DE SIMILITUD

17%

FUENTES DE INTERNET

7%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	2%
2	www.scribd.com Fuente de Internet	1%
3	pdfcoffee.com Fuente de Internet	1%
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
5	pdfs.semanticscholar.org Fuente de Internet	1%
6	es.scribd.com Fuente de Internet	1%
7	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	1%
8	repositorio.untumbes.edu.pe Fuente de Internet	1%

9	www.bcrp.gob.pe Fuente de Internet	1 %
10	repositorio.unasam.edu.pe Fuente de Internet	1 %
11	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
12	biblioteca.uajms.edu.bo Fuente de Internet	<1 %
13	es.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
14	www.scielo.org.mx Fuente de Internet	<1 %
15	portal.amelica.org Fuente de Internet	<1 %
16	repositorio.uho.edu.cu Fuente de Internet	<1 %
17	ECO-TEC CONSULTORIA TECNOLOGICA Y AMBIENTAL E.I.R.L.. "DIA del Proyecto Construcción de Represa YuraccanCHA y Afianzamiento Hídrico Subcuenca Tambo Quemado-IGA0013719", R.D.G. N° 058-12-AG-DVM-DGAAA, 2021 Publicación	<1 %
18	1library.co Fuente de Internet	<1 %

19	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
20	repositorio.uis.edu.co Fuente de Internet	<1 %
21	bibliotecadigital.univalle.edu.co Fuente de Internet	<1 %
22	moam.info Fuente de Internet	<1 %
23	pt.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
24	Submitted to utec Trabajo del estudiante	<1 %
25	vsip.info Fuente de Internet	<1 %
26	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
27	biblioteca.itson.mx Fuente de Internet	<1 %
28	dspace.ucuenca.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
29	repositorio.umsa.bo Fuente de Internet	<1 %
30	CONSULCONT SAC. "Plan de Cierre de Minas de la Unidad Minera María Teresa-	<1 %

IGA0003633", R.D. N° 388-2009-MEM-AAM,
2020

Publicación

31 repositorio.ujcm.edu.pe <1 %
Fuente de Internet

32 renati.sunedu.gob.pe <1 %
Fuente de Internet

33 www.meteorologica.org.ar <1 %
Fuente de Internet

34 Submitted to Universidad Nacional de San
Cristóbal de Huamanga <1 %
Trabajo del estudiante

35 WALSH PERU S.A. INGENIEROS Y
CIENTIFICOS CONSULTORES. "EIA para el
Proyecto de Explotación de la Concesión
Minera No Metálica Dunas 3 Segunda-
IGA0007037", R.D. N°005-2016-
PRODUCE/DVMYPE-I/DIGGAM, 2020 <1 %
Publicación

36 dspace.esPOCH.edu.ec <1 %
Fuente de Internet

37 repositorio.imta.mx <1 %
Fuente de Internet

38 Submitted to CONACYT <1 %
Trabajo del estudiante

cia.uagraria.edu.ec

39

Fuente de Internet

<1 %

40

web2.senamhi.gob.pe

Fuente de Internet

<1 %

41

idoc.pub

Fuente de Internet

<1 %

42

repositorio.lamolina.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

43

Submitted to Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO) - Sede Ecuador

Trabajo del estudiante

<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo

Comparación de modelos alternativos para la estimación de evapotranspiración de referencia en la estación meteorológica de INIA-Ayacucho-2022

Yonatan Ayala Prado¹ yonatan.ayala.21@unsch.edu.pe

Ing. Chichón Prado Efraín² efrain.chuchon@unsch.edu.pe

Área de investigación: Medio Ambiente

Línea de investigación: Hidrología, Hidráulica, Saneamiento, energía y cambio climático, Riego y drenaje.

Resumen

La comparación de modelos alternativos para la estimación de evapotranspiración de referencia en la estación meteorológica de INIA-Ayacucho-2022, su objetivo principal fue comparar ETo de los métodos empíricos con resultados de evapotranspiración de tanque evaporímetro, los resultados obtenidos de evapotranspiración de referencia, Tanque evaporímetro clase A, 1305.88 mm/año, FAO Penman Monteith 1363.6 mm/año, Hargreaves en base a la radiación solar 1386.92 mm/año, Hargreaves en base a la temperatura 1290.55 mm/año, Jensen – Haise 1462.13mm/año, Makkink 1210.12 mm/año, Turc 1295.69 mm/año, se comparó los resultados de evapotranspiración de referencia, mediante los índices estadísticos con valores de evapotranspiración de tanque evaporímetro, los modelos Hargreaves en base a la radiación solar, Hargreaves en base a la temperatura, Jensen-Haise y Makkink presentaron un resultado de índice de confiabilidad tolerable, los modelos Penman Monteith y Turc presentaron un índice de confiabilidad bueno, estos modelos fueron los que lograron mejores estimaciones de valores de evapotranspiración de referencia para la zona de INIA y se recomienda utilizar.

Palabra clave: Evaporación, evapotranspiración de referencia e índices estadísticos.

Abstract

Comparison of alternative models for reference evapotranspiration estimation at INIA-Ayacucho meteorological station-2022, its main objective was to compare ETo of empirical methods with evapotranspiration results from evaporimeter tank, the results obtained from reference evapotranspiration, Evaporimeter tank class A, 1305.88 mm/year, FAO Penman Monteith 1363.6 mm/year, Hargreaves based on solar radiation 1386.92 mm/year, Hargreaves based on temperature 1290.55 mm/year, Jensen - Haise 1462.13mm/year, Makkink 1210.12 mm/year, Turc 1295.69 mm/year, the reference evapotranspiration results were compared, using statistical indices with evapotranspiration values of evaporimeter tank, the Hargreaves models based on solar radiation, Hargreaves based on temperature, Jensen-Haise and Makkink presented a tolerable reliability index result, the Penman Monteith and Turc models presented a good reliability index, these models were the ones that achieved better estimates of reference evapotranspiration values for the INIA area and it is recommended to use.

Keywords: Evaporation, reference evapotranspiration and statistical indices

1. INTRODUCCIÓN

La evapotranspiración de referencia es un indicador importante para la planificación de la agricultura y gestión de recursos hídricos, los estudios de investigación deben de considerar el impacto de cambio climático en la evapotranspiración, la gran parte de la agricultura y la ganadería depende en gran medida del clima, por lo que el cambio climático afecta a la agricultura generando las necesidades hídricas del cultivo. (Monterroso & Gómez, 2021, p.1)

La estimación de la evaporación es compleja y costosa, requiere equipos especializados para distribuir en todo el país. Dado que la evaporación es un parámetro climático, generalmente se calcula a partir de datos obtenidos de estaciones meteorológicas, existen muchos métodos de estimación basados en la temperatura y otros basados en radiación física y atmosférica. Los métodos basados en la temperatura requieren sólo información de temperatura y se basan en la suposición generalmente confiable, la temperatura es un indicador principal de evaporación, aunque estos métodos pueden resultar útiles cuando no se dispone de datos sobre otros parámetros meteorológicos (por ejemplo, humedad relativa, luz solar), radiación y velocidad del viento se ha observado que los cálculos basados en la temperatura no son del todo fiables para estudiar la demanda evaporativa a largo plazo. (Monterroso & Gómez, 2021, p. 2)

La estimación de evapotranspiración es un parámetro importante para satisfacer necesidades hídricas de cultivos, ya que es la base del diseño agronómico de todos los sistemas de riego y se utiliza para determinar las dimensiones de canales, redes de tuberías y embalses, etc. En conjunto,

esto facilita la planificación y operación de los sistemas de riego y gestión de los recursos hídricos en la cuenca. La sobreestimación de evapotranspiración de referencia puede llevar a proyectos demasiado grandes y mayores costos (construcción y mantenimiento), mientras que subestimar proyectos pequeños puede subestimar requerimiento de agua de cultivos. Para la estimación del agua de riego, la ETo se sobreestima en 1,0 mm, y cada consumo de agua aumentará en $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, lo que incrementa los costos de producción y crea condiciones favorables para el desarrollo de enfermedades fúngicas. La estimación precisa de la ETo es esencial para mejorar el uso del agua de riego. (Ortiz & Chile, 2020, p.71)

El objetivo principal de este trabajo de investigación consistió en estimar y comparar la evapotranspiración de referencia por método directo Tanque evaporímetro clase A, con métodos empíricos en la estación meteorológica INIA

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 área de estudio

El área de estudio para el presente trabajo de investigación se estableció en centro experimental INIA, se utilizaron datos meteorológicos de la estación meteorológica INIA, pertenecientes a Gobierno regional de Ayacucho, Oficina de OPEMAN, localizada a una altura de 2735 msnm, $13^{\circ} 10' 00.06''$ latitud sur y $74^{\circ} 12' 22.92''$ longitud oeste, serie de datos históricos de 2017 hasta 2022.

2.2 Climatología

Según la Estación Meteorológica del INIA, que representa la zona del proyecto, se tiene una temperatura del aire media mensual de 18.77°C , con medias máximas de 26.38°C en

noviembre y medias mínimas de 6.98 °C en julio, habiendo un período "frío" de mayo a agosto y un período "caliente" de setiembre a abril. La precipitación promedio anual, para el período 2017 - 2021 es de 515.68 mm; a nivel mensual, varía de 1.78 mm en junio a 99.68 mm en febrero, siendo los meses de mayor precipitación, diciembre, enero, febrero y marzo. La evaporación medida en el

tanque evaporímetro presenta valores medios anuales de 142.90 mm; a nivel mensual varía de 105.65 mm en febrero a 142.90 mm en noviembre, la velocidad de viento máxima registrada en el mes de enero con 2.91m/s y la mínima en el mes de junio con 1.45 m/s, mayor número horas luz en junio con 8.94h/d, y mes con menor número horas luz marzo con 6.80 h/d (Tabla 1).

Tabla 1
Información climatológica promedio 2013-2021

MES	HR %	T max °C	T min °C	T media °C	Precipitación mm	Viento m/s	Horas sol h/día
Enero	82.91	23.78	11.33	17.55	84.58	2.91	6.97
Febrero	84.02	23.78	11.09	17.43	99.68	2.72	7.15
Marzo	85.46	23.28	11.37	17.32	92.30	2.01	6.80
Abril	82.13	24.38	9.88	17.13	48.94	1.78	7.84
Mayo	72.90	24.49	8.48	16.49	13.94	1.67	8.35
Junio	81.34	24.43	7.61	16.02	1.78	1.45	8.94
Julio	80.45	24.26	6.98	15.62	9.78	1.66	8.70
Agosto	78.01	24.95	8.22	16.59	8.64	1.79	8.60
Setiembre	76.29	25.03	10.11	17.57	13.78	1.87	8.32
Octubre	77.50	25.62	10.62	18.12	32.62	2.46	7.36
Noviembre	77.63	26.38	11.15	18.77	31.20	2.49	8.18
Diciembre	80.54	25.06	10.96	18.01	78.44	2.48	7.66

2.3 Métodos empíricos para estimar evapotranspiración de referencia

Tanque evaporímetro (Allen et al., 2006)

$$ET_o = K_p E_{pan} \dots \dots \dots 1$$

$$K_p = 0.5321 - 3 \times 10^{-4} x U + 0.0249 * Ln(F) + 0.0025 x HR$$

Donde: ET_o evapotranspiración de referencia (mm/día), K_p coeficiente del tanque evaporímetro, E_{pan} evaporación del tanque evaporímetro (mm/día), U velocidad de viento (m/s), F Distancia que existe entre el tanque evaporímetro y el área del cultivo (m), HR humedad relativa (%).

Método FAO Penman-Monteith (Allen et al., 2006)

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

Donde: ET_o evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹), R_n radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹), R_a radiación extraterrestre (mm día⁻¹), G flujo de calor del suelo (MJ m⁻² día⁻¹), T temperatura media del aire (°C), u₂ velocidad del viento a 2 m de altura (m s⁻¹), e_s presión de vapor de saturación (kPa), e_a presión de vapor (kPa), (e_s-e_a) déficit de presión de vapor (Kpa), Δ = pendiente de la curva de presión de vapor

(k Pa °C⁻¹), γ constante psicrométrica (KPa °C⁻¹).

Método Hargreaves en base a la radiación solar (Vásquez et al., 2017)

$$ET_o = 0.004 * TMF * RS \dots 4$$

Donde: ETo evapotranspiración de referencia (mm mes⁻¹), RS radiación solar media mensual (cal/cm²/día), TMF temperatura media mensual en grados Fahrenheit (°F).

Método Hargreaves en base a la temperatura (Vásquez et al., 2017)

$$ET_o = MF * TMF * CH * CE \dots 5$$

Donde: ETo evapotranspiración de referencia (mm mes⁻¹), MF factor mensual de latitud, TMF temperatura media mensual (°F), CH factor de corrección para la humedad relativa, CE factor de corrección para la altura o elevación del lugar.

$$CH = 0.166(100 - HR)^{0.5} \dots 6$$

Donde: HR humedad relativa media mensual (%), medida, HR > 64%, se emplea la fórmula anterior, en caso HR < 64%

$$E = 1 + 0.04 * \frac{E}{2000} \dots 7$$

E latitud o elevación del lugar (msnm)

Obtención de la radiación solar incidente (Rs)

$$Rs = \left(0.25 + 0.50 * \frac{n}{N}\right) * Ra \dots 8$$

Donde: n/N = relación entre las horas reales (n) y las horas máximas posibles (N) de fuerte insolación, Ra radiación extraterrestre que se recibe antes de llegar a la atmósfera. Se expresa equivalente de evaporación de agua (mm/día), los valores de n se obtienen de

la lectura de heliógrafos en las estaciones meteorológicas.

Método Jensen – Haise (Bochetti; 2010)

$$ET_o = Rs(0.025T + 0.08) \dots 9$$

Donde: ETo evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹), T temperatura media (°C), Rs = radiación solar que llega al nivel de suelo mm/día.

Método Makkink (Ortiz & Chile; 2020)

$$ET_o = 0.61 * \frac{Rs}{\lambda} \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right) - 0.12 \dots 10$$

Donde: ETo evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹), Δ pendiente de la curva de variación de la presión (kPa °C⁻¹), λ calor latente de vaporización (MJ kg⁻¹), γ constante psicrométrica (kPa °C⁻¹), Rs radiación solar que llega al nivel de suelo mm/día.

Método de Turc (Huaccoto, 2017)

$$ET_o = CiKi \left(\frac{t_{med}}{t_{med} + 15}\right) (R_i + 50) \dots 11$$

Donde: Ci es un factor de corrección para zonas áridas, que depende de la humedad relativa del mes, si la humedad relativa es mayor a 50%, el valor de Ci es igual a 1. En el caso contrario.

$$Ci = \left(\frac{1 + 50 - HR}{70}\right) \dots 12$$

ETo evapotranspiración de referencia (mm mes⁻¹), HR humedad relativa media mensual en porcentaje, Ki factor de corrección mensual y sus valores son: 0.40 para meses de 30 y 31 días, 0.37 para febrero y 0.13 para períodos de 10 días, Tmed temperatura media mensual del aire expresada en °C, Ri radiación global incidente o radiación

de onda corta que alcanza la superficie de la tierra, expresada en cal/cm²día.

Abreviaciones: la evapotranspiración de referencia a través del método Tanque evaporímetro de define como **T** Evap, método FAO Penman-Monteith como **FAO PM**, método Hargreaves en base a la radiación solar como **HRS**, método Hargreaves en base a la temperatura como **HT**, método Jensen – Haise como **J-H**, Método Makkink como **M**, método de Turc como **T**.

2.4 Métodos estadísticos para comparación de resultados

Para la comparación de resultados con gráficos de dispersión y estadístico tomando como base Tanque evaporímetro clase A, se evaluaron los siguientes índices estadísticos.

Raíz del error cuadrático medio (RMSE mm/mes), tantea el desliz que existe entre dos conjuntos de datos. RMSE es la desviación estándar de los residuales y es un indicador de la fiabilidad de la predicción (Ortiz & Chile, 2020, p.74).

El error porcentual (PE), es la manifestación de un error relativo en términos porcentuales. En otras palabras, permite conocer la diferencia que existe entre el valor estimado y el valor real (Ortiz & Chile, 2020, p.74).

Índice de concordancia (d), mide la precisión de los resultados obtenidos por el método al predecir las observaciones. Si el índice de consistencia tiende a 1, se considera que el método tiene mayor precisión (Ortiz & Chile, 2020, p.74).

El coeficiente de correlación de Pearson (r), es un parámetro estadístico que tiene por finalidad hallar la relación entre dos variables en un nivel por intervalos o de razón, en la que r mide el grado de asociación lineal entre dos variables X e Y. Esta prueba no evalúa causalidad, por lo tanto, no considera a una como independiente y a otra como dependiente (Ortiz & Chile, 2020, p.74).

Coficiente de confiabilidad o índice de confianza (C), establece la exactitud de los resultados se calcula, con el producto del coeficiente de determinación y el coeficiente de correlación (Ortiz & Chile, 2020, p.74).

Tabla 2

Indicadores estadísticos utilizados para la comparación de los métodos de ETo

Indicadores estadísticos	Ecuación	Valor óptimo
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}}$	0
Error porcentual (PE)	$PE = \left \frac{P - O}{O} \right * 100$	0
Índice de concordancia (d)	$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - O + O_i - O)^2} \right]$	1
Coficiente de correlación (r)	$r = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - O)(P_i - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - O)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - P)^2}}$	1
Índice de confianza (c)	$c = r \cdot d$	1

Nota: Variables: Donde: Pi es el valor estimado; P es la media de los valores estimados; Oi es el valor observado; y O es la media de los valores observados. (Camargo y Sentelhas, 1997).

Tabla 3

Valores de interpretación de índice de confiabilidad

Valor de c	Desempeño
> 0.85	Óptimo
0.75 a 0.85	Muy bueno
0.66 a 0.75	Bueno
0.61 a 0.66	Mediano
0.51 a 0.60	Tolerable
0.41 a 0.50	Malo
≤ 0.40	Pésimo

Nota: valores de índice de confiabilidad. (Camargo & Sentelhas, 1997)

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La estimación de evapotranspiración de referencia del método directo Tanque evaporímetro clase A y los métodos empíricos con

Se realizó la comparación de evapotranspiración de referencia diaria mensual con los métodos empíricos seleccionados FAO Penman Monteith, Hargreaves en base a la radiación solar, Hargreaves en base a la temperatura, Jensen – Haisen, Makkink y Turc con los valores de evapotranspiración de tanque evaporímetro clase A.

Mediante una comparación gráfica se observa que los valores de evapotranspiración de referencia de tanque evaporímetro tiene una variación

datos de estación meteorológica INIA se presenta en las siguientes tablas y figuras.

3.1 Comparación de modelos de evapotranspiración del año 2013-2021

distinta a otros modelos para el mes 25 al 36 correspondiente al año 2015, lo mismo ocurre para el mes 73 hasta el mes 108 correspondientes al año 2019 al 2021 (Figura 1,2,3,4,5,6). Previa a este análisis visual se realizó gráficas de dispersión para los años mencionados, y se observó que la línea de tendencia para estos años es negativa y los coeficientes de correlación son bajos, por ende, la evapotranspiración del año 2015, 2019,2020 y2021 se obviaran en resto de los análisis.

Tabla 4

Evapotranspiración de referencia del año 2013-2014 de tanque evaporímetro

Año mes	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	3.78	3.23	2.65	3.66	2.98	3.38	3.30	3.58	3.57
Feb	3.44	3.49	2.99	3.24	3.30	3.39	3.07	2.97	3.51
Mar	3.33	3.10	2.86	3.24	3.09	3.29	3.22	2.87	3.27

Abr	3.70	3.19	3.37	3.43	3.35	3.24	3.24	2.89	3.63
May	3.42	3.41	3.20	3.42	3.33	3.50	3.46	3.05	3.66
Jun	3.02	3.29	3.40	3.02	3.42	3.56	3.98	4.50	3.71
Jul	3.41	3.04	3.76	3.41	3.56	3.40	3.41	4.40	3.93
Ago	3.81	3.70	3.14	3.67	3.57	3.21	4.32	4.43	3.85
Set	4.13	3.57	3.24	4.03	3.95	4.03	4.01	3.59	3.43
Oct	3.82	3.83	3.28	4.08	3.89	3.49	3.55	3.75	3.61
Nov	4.27	4.42	2.99	4.27	4.06	4.00	3.47	4.27	3.41
Dic	4.11	3.89	2.55	4.11	3.80	3.88	3.76	3.76	3.50
Prom	3.69	3.51	3.12	3.63	3.52	3.53	3.57	3.67	3.59

Figura 1

Comparación gráfica de evapotranspiración de referencia con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Penman Monteith del año 2013-2021

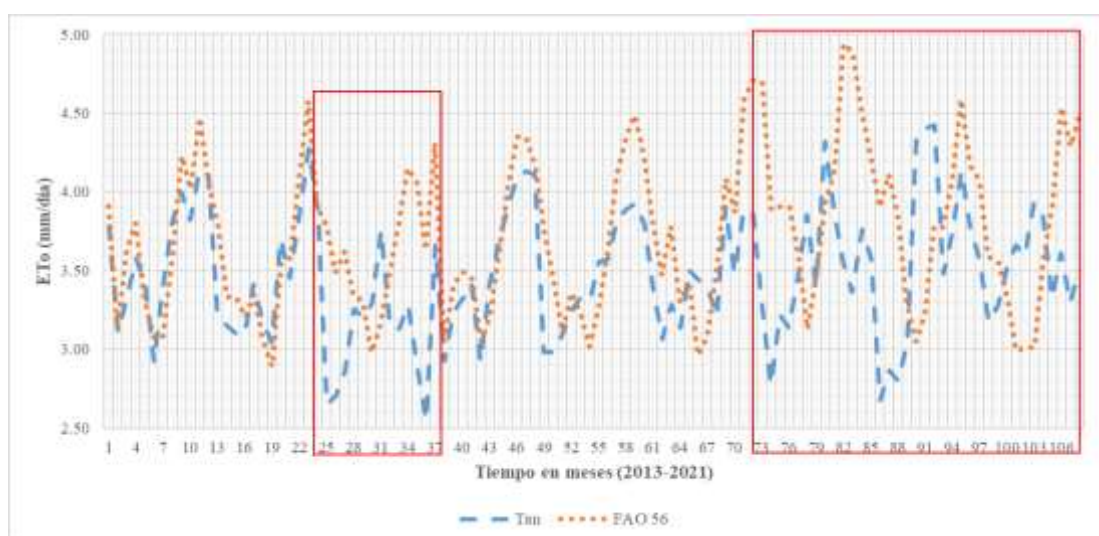


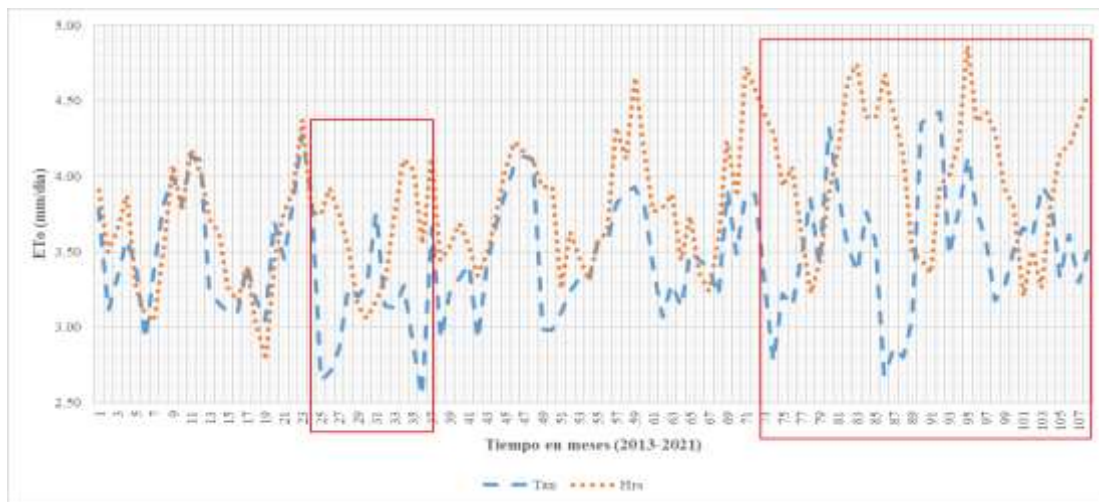
Tabla 5

Evapotranspiración de referencia FAO Penman Monteith del año 2013-2021

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	3.91	3.79	3.79	4.31	3.75	3.81	4.70	4.23	4.08
Feb	3.47	3.69	3.86	3.37	3.82	3.84	4.30	4.32	3.97
Mar	3.62	3.33	3.62	3.41	3.11	3.78	3.91	4.11	3.56
Abr	3.93	3.31	3.45	3.61	3.47	3.41	4.04	3.98	3.44
May	3.31	3.35	3.31	3.45	3.23	3.44	3.60	3.29	2.99
Jun	3.18	3.16	3.08	3.15	3.12	3.06	3.23	3.15	3.11
Jul	3.07	2.89	3.16	3.21	3.26	3.08	3.47	3.22	3.01
Ago	3.60	3.54	3.48	3.61	3.61	3.47	3.94	3.78	3.57
Set	4.37	3.70	3.93	4.17	4.24	4.22	4.27	3.90	4.05
Oct	4.02	4.09	4.15	4.35	4.34	3.87	4.94	4.07	4.54
Nov	4.62	4.73	4.20	4.49	4.64	4.74	5.05	4.74	4.43
Dic	4.05	3.90	3.63	4.17	4.24	4.71	4.51	4.16	4.48
Prom	3.76	3.62	3.64	3.78	3.74	3.79	4.16	3.91	3.77

Figura 2

Comparación gráfica de evapotranspiración de referencia con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Hargreaves en base a la radiación solar del año 2013-2021

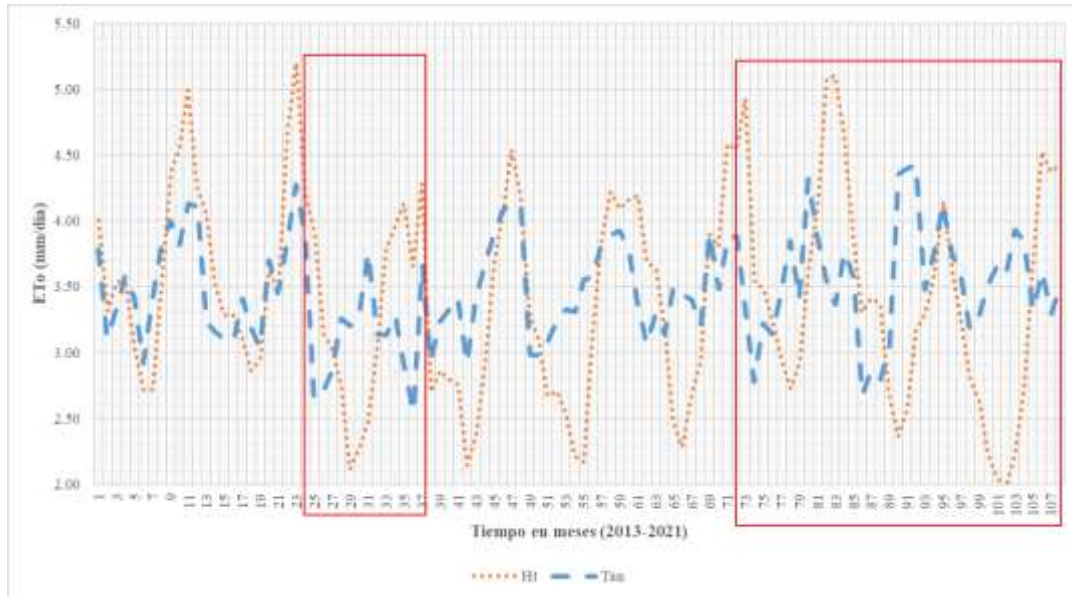
**Tabla 6**

Evapotranspiración de referencia Hargreaves en base a la radiación solar del año 2013-2021

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	3.91	3.71	3.74	4.12	3.93	3.76	4.41	4.39	4.42
Feb	3.87	4.01	4.34	3.81	4.36	4.20	4.74	5.18	4.74
Mar	3.64	3.26	3.74	3.54	3.25	3.88	3.93	4.41	3.92
Abr	4.00	3.28	3.64	3.81	3.75	3.56	4.20	4.30	3.93
May	3.26	3.40	3.14	3.55	3.46	3.74	3.65	3.49	3.20
Jun	3.19	3.13	3.16	3.45	3.42	3.46	3.33	3.57	3.62
Jul	3.04	2.78	3.17	3.49	3.58	3.24	3.42	3.36	3.26
Ago	3.53	3.44	3.32	3.75	3.63	3.55	3.89	3.94	3.80
Set	4.21	3.88	3.87	4.18	4.47	4.38	4.31	4.14	4.30
Oct	3.77	3.90	4.11	4.23	4.12	3.87	4.64	4.22	4.20
Nov	4.32	4.52	4.18	4.30	4.81	4.88	4.90	5.03	4.51
Dic	4.02	3.76	3.55	4.10	4.17	4.58	4.39	4.36	4.53
Prom	3.73	3.59	3.66	3.86	3.91	3.93	4.15	4.20	4.04

Figura 3

Comparación gráfica de evapotranspiración de referencia con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Hargreaves en base a la temperatura del año 2013-2021

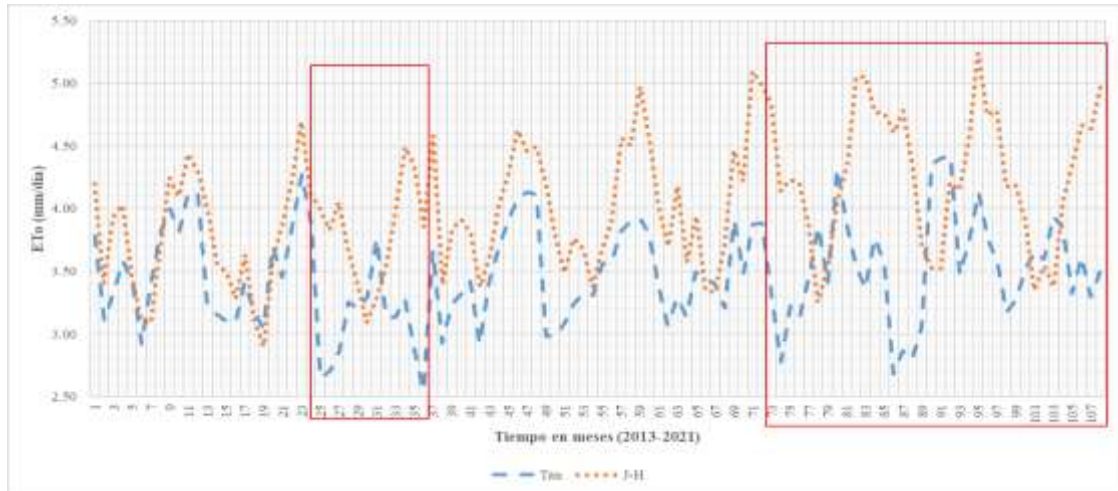
**Tabla 7**

Evapotranspiración de referencia Hargreaves en base a temperatura del año 2013-2021

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	4.00	4.06	3.91	4.29	3.29	4.19	4.93	3.89	3.23
Feb	3.67	3.90	3.48	2.99	3.44	4.08	3.91	3.66	3.10
Mar	3.54	3.29	3.03	2.86	2.67	3.64	3.48	3.41	2.62
Abr	3.65	3.39	2.81	2.89	2.80	3.27	3.35	3.49	2.29
May	3.03	3.10	2.11	2.76	2.54	2.48	2.95	2.68	2.05
Jun	2.81	2.96	2.34	2.21	2.29	2.36	2.81	2.44	2.04
Jul	2.72	2.95	2.47	2.37	2.17	2.67	2.91	2.57	2.21
Ago	3.53	3.62	3.01	2.92	3.16	2.92	3.64	3.18	2.70
Set	4.52	3.57	3.90	3.80	4.00	4.03	4.24	3.41	3.77
Oct	4.54	4.67	3.95	4.08	4.22	3.81	5.08	3.59	4.53
Nov	5.16	5.38	4.27	4.69	4.22	4.74	5.27	4.29	4.52
Dic	4.25	4.20	3.66	4.20	4.16	4.55	4.67	3.63	4.43
Prom	3.79	3.76	3.25	3.34	3.25	3.56	3.94	3.35	3.12

Figura 4

Comparación gráfica de evapotranspiración de referencia con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Jensen – Haise del año 2013-2021

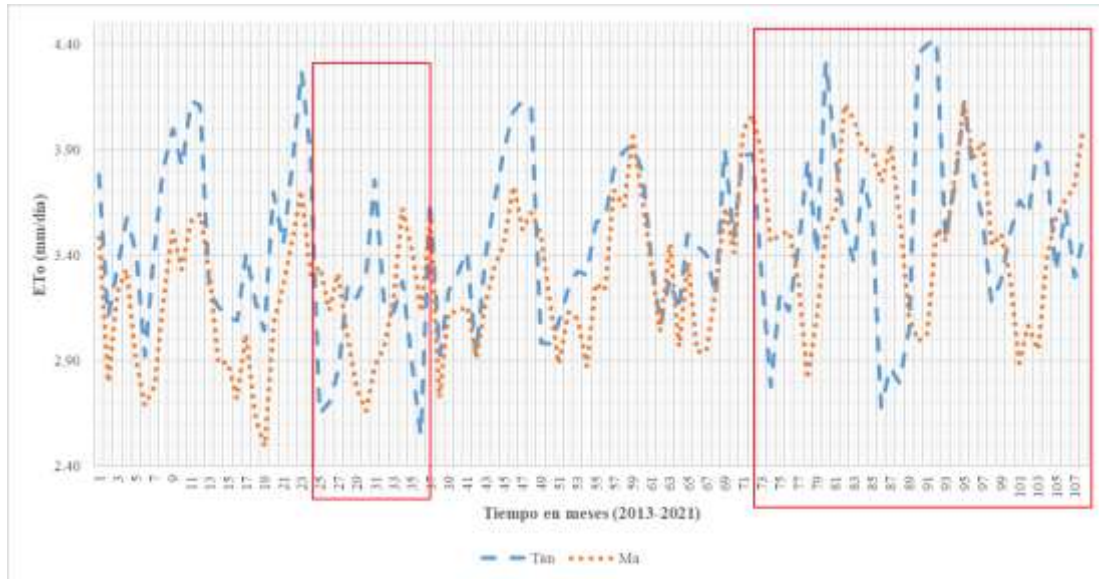
**Tabla 8**

Evapotranspiración de referencia Jensen-Haise del año 2013-2021

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	4.20	3.99	4.00	4.58	4.21	4.01	4.85	4.76	4.79
Feb	3.77	3.94	4.24	3.76	4.20	4.10	4.59	5.10	4.62
Mar	3.93	3.49	4.05	3.83	3.49	4.18	4.23	4.78	4.19
Abr	4.17	3.39	3.79	4.04	3.89	3.69	4.35	4.49	4.05
May	3.45	3.63	3.40	3.81	3.68	3.94	3.86	3.71	3.35
Jun	3.22	3.20	3.20	3.49	3.49	3.46	3.36	3.65	3.66
Jul	3.09	2.90	3.27	3.61	3.67	3.34	3.56	3.52	3.38
Ago	3.68	3.63	3.53	4.02	3.88	3.70	4.06	4.21	4.07
Set	4.39	4.00	4.08	4.41	4.71	4.61	4.48	4.28	4.50
Oct	4.09	4.22	4.50	4.63	4.50	4.22	5.05	4.54	4.67
Nov	4.59	4.85	4.48	4.61	5.14	5.26	5.22	5.42	4.79
Dic	4.29	4.12	3.86	4.49	4.55	4.98	4.77	4.75	4.97
Prom	3.91	3.78	3.87	4.11	4.12	4.12	4.37	4.43	4.25

Figura 5

Comparación gráfica de evapotranspiración de referencia con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Makkink del año 2013-2021

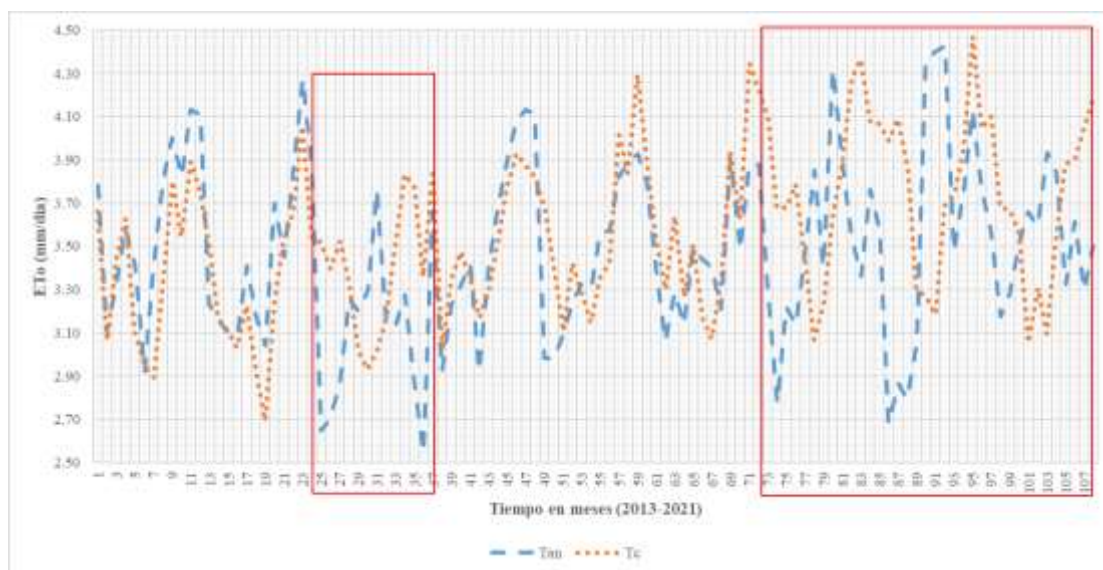
**Tabla 9**

Evapotranspiración de referencia Makink del año 2013-2021

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	3.48	3.30	3.35	3.59	3.50	3.37	3.89	3.90	3.94
Feb	3.10	3.19	3.48	3.02	3.52	3.37	3.83	4.15	3.81
Mar	3.22	2.89	3.32	3.13	2.89	3.45	3.50	3.93	3.50
Abr	3.44	2.81	3.12	3.23	3.23	3.06	3.63	3.70	3.40
May	2.92	3.03	2.76	3.16	3.10	3.36	3.27	3.11	2.89
Jun	2.78	2.70	2.75	3.01	2.97	3.04	2.91	3.10	3.17
Jul	2.78	2.49	2.88	3.17	3.27	2.94	3.10	3.02	2.95
Ago	3.19	3.08	2.97	3.34	3.23	3.22	3.53	3.52	3.39
Set	3.63	3.36	3.29	3.57	3.83	3.75	3.72	3.59	3.70
Oct	3.34	3.46	3.62	3.73	3.63	3.41	4.11	3.77	3.66
Nov	3.68	3.83	3.53	3.64	4.09	4.13	4.18	4.26	3.85
Dic	3.60	3.31	3.13	3.60	3.68	4.06	3.90	3.86	4.00
Prom	3.26	3.12	3.18	3.35	3.41	3.43	3.63	3.66	3.52

Figura 6

Comparación gráfica de evapotranspiración de referencia con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Turc del año 2013-2021

**Tabla 10**

Evapotranspiración de referencia Turc del año 2013-2021

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
mes	Evapotranspiración de referencia en (mm/día)								
Ene	3.66	3.49	3.52	3.84	3.68	3.54	4.09	4.07	4.10
Feb	3.39	3.50	3.76	3.34	3.77	3.65	4.07	4.42	4.07
Mar	3.43	3.11	3.52	3.35	3.11	3.64	3.68	4.09	3.67
Abr	3.75	3.13	3.44	3.59	3.54	3.38	3.92	4.00	3.69
May	3.11	3.23	3.01	3.36	3.28	3.51	3.43	3.30	3.05
Jun	3.05	3.01	3.03	3.28	3.25	3.27	3.17	3.38	3.42
Jul	2.89	2.69	3.02	3.29	3.36	3.07	3.23	3.18	3.10
Ago	3.32	3.26	3.16	3.53	3.42	3.35	3.63	3.69	3.57
Set	3.93	3.65	3.64	3.90	4.15	4.07	4.01	3.87	4.01
Oct	3.55	3.66	3.83	3.93	3.84	3.63	4.28	3.93	3.90
Nov	4.02	4.19	3.90	4.00	4.44	4.49	4.51	4.62	4.18
Dic	3.75	3.54	3.36	3.82	3.88	4.23	4.07	4.04	4.19
Prom	3.49	3.37	3.43	3.60	3.64	3.65	3.84	3.88	3.75

Se realizó la comparación de evapotranspiración de referencia diaria mensual con los métodos empíricos seleccionados FAO Penman Monteith, Hargreaves en base a la radiación solar, Hargreaves en base a la temperatura, Jensen – Haisen, Makkink y Turc con los valores de evapotranspiración de tanque

evaporímetro clase A, de los años 2013,2014, 2016, 2017, 2018.

Haciendo una comparación gráfica se muestra que el modelo Penman Monteith se aproxima a los valores esperados de evapotranspiración, el modelo Hargreaves en base a la radiación solar del mes 1 hasta el mes 37 se aproxima a los valores esperados y del

mes 38 hasta el mes 60 sobreestima, el modelo Hargreaves en base a la temperatura arroja resultados de subestimación, el modelo Jensen – Haise arroja resultados de sobreestimación, el modelo Makink arroja resultados de

subestimación del mes 1 hasta el mes 46 y de mes 47 hasta el mes 60 se aproxima a los valores esperados, el modelo Turc arroja resultados de aproximación a los valores esperados de evapotranspiración de referencia (Figura 7,8,9,10,11,12,13).

Figura 7

Comparación gráfica de evapotranspiración de referencia con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Penman Monteith del año 2013-2014,2016-2018

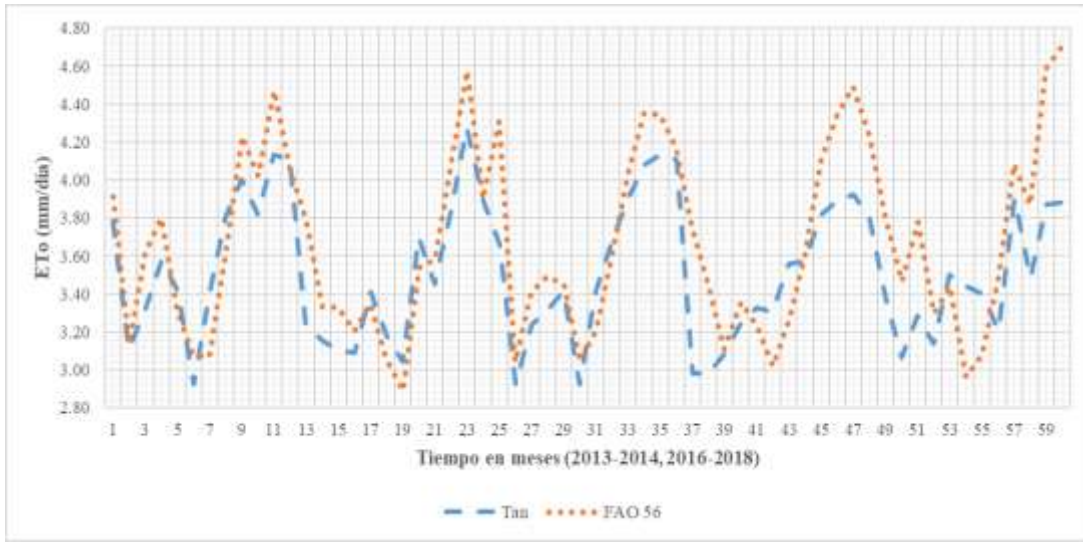


Figura 8

Comparación gráfica de evapotranspiración de referencia con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Hargreaves en base a la radiación solar del año 2013-2014, 2016-2018

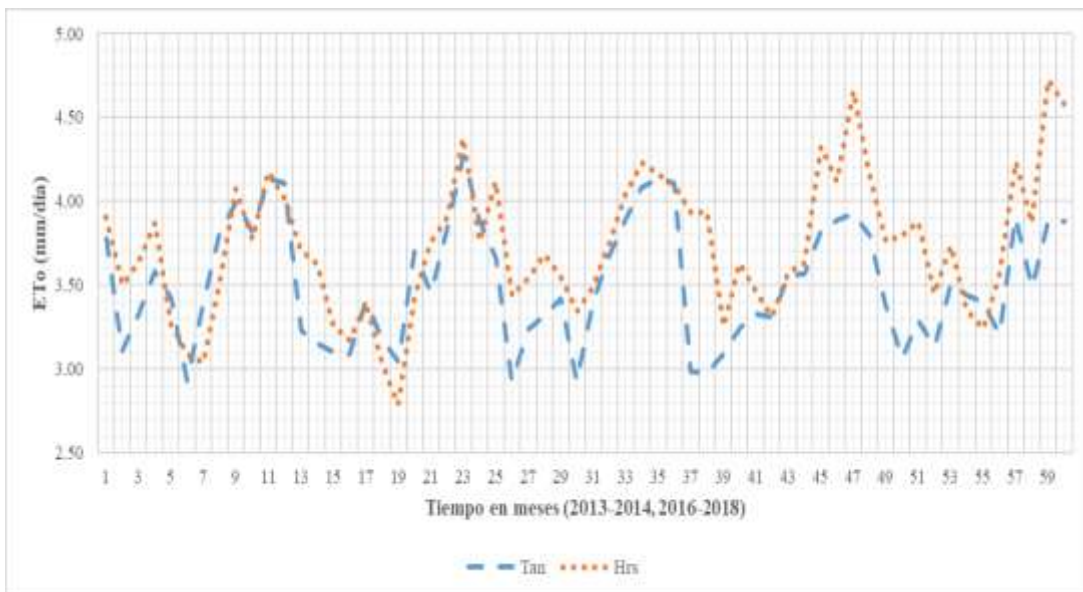


Figura 9

Comparación gráfica de evapotranspiración de referencia con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Hargreaves en base a la temperatura del año 2013-2014,2016-2018

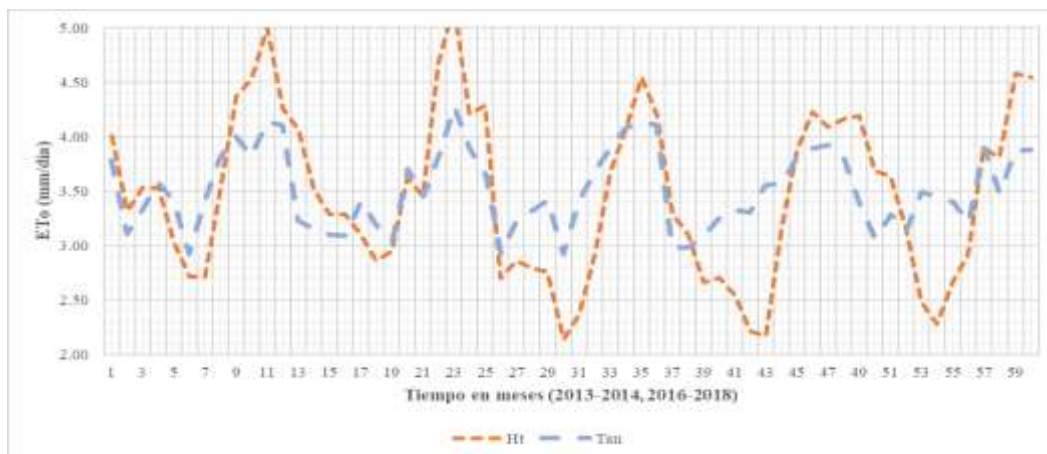


Figura 10

Comparación gráfica de evapotranspiración de referencia con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Jensen – Haise del año 2013-2014, 2016-2018

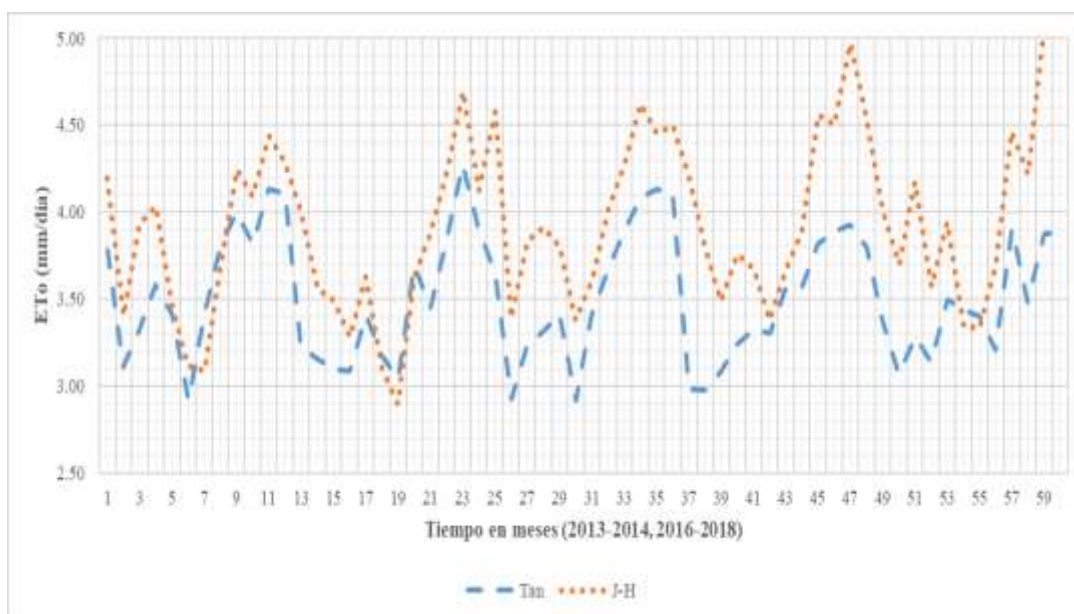


Figura 11

Comparación gráfica de evapotranspiración de referencia con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Makkink del año 2013-2014, 2016-2018

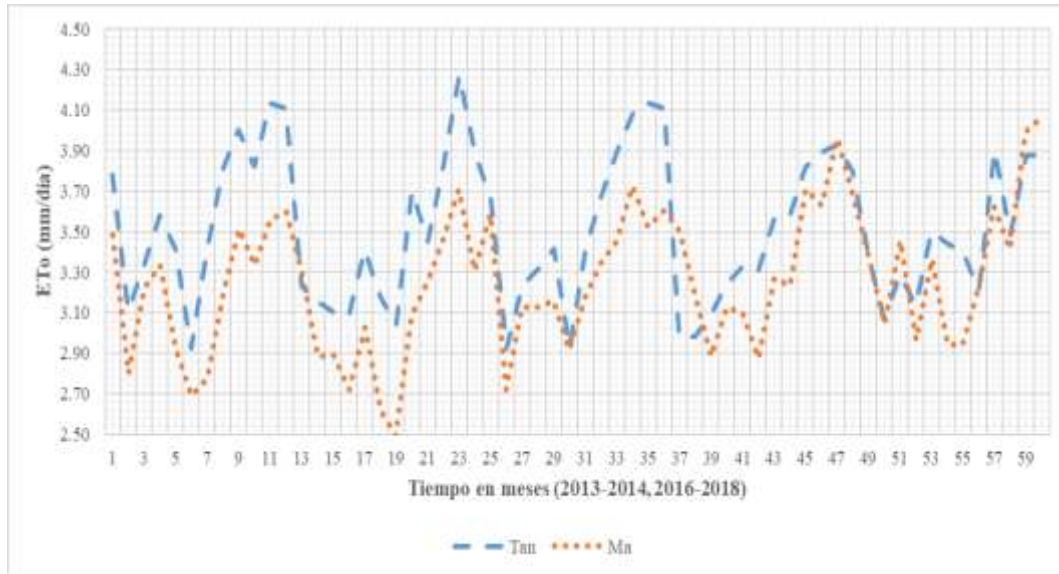


Figura 12

Comparación gráfica de evapotranspiración de referencia con evaporación de tanque evaporímetro clase A con Turc del año 2013-2014, 2016-2018

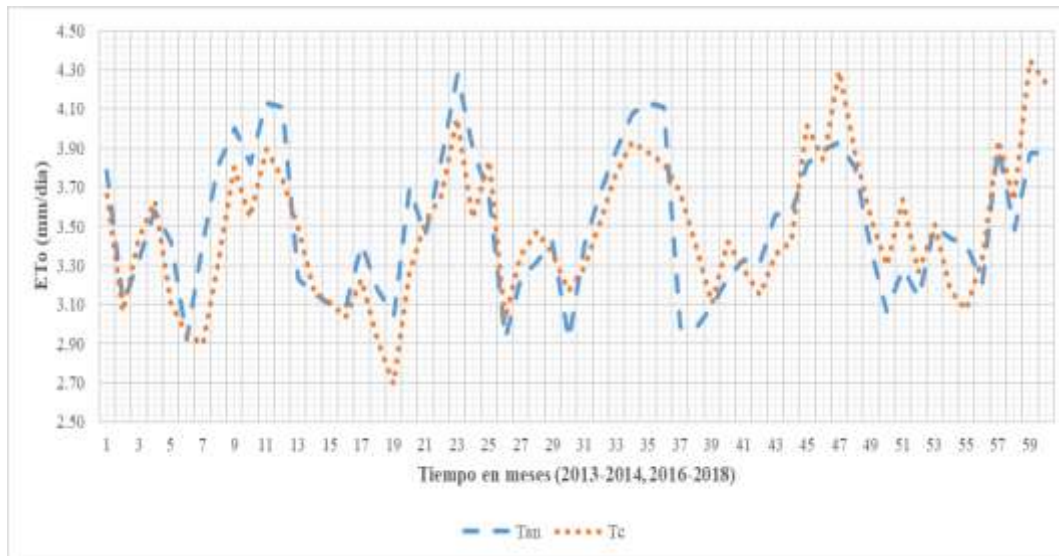
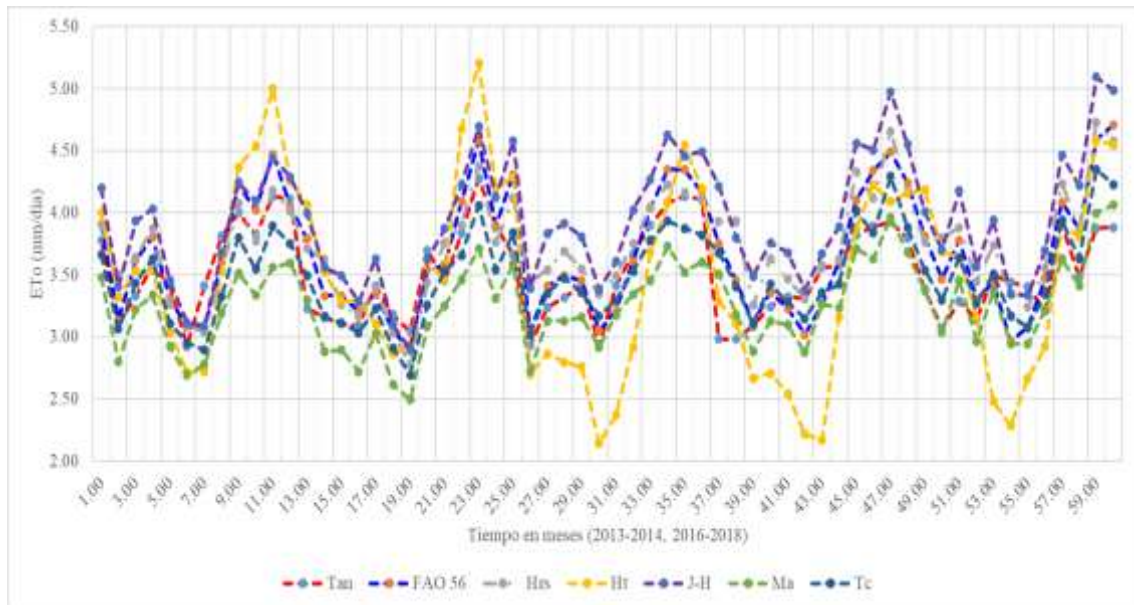


Figura 13

Comparación gráfica de evapotranspiración de referencia con modelos empíricos con tanque evaporímetro clase A



3.2 *Análisis estadística de evapotranspiración de referencia del método tanque evaporímetro clase A con métodos empíricos*

Para el análisis de comparación por gráficas de dispersión de los modelos se utilizaron datos meteorológicos mensuales de los años 2013, 2014, 2016, 2017 y 2018. Cada uno de los modelos fueron comparados con la evapotranspiración de referencia de tanque evaporímetro clase A.

A través de las gráficas de regresión lineal de la figura 14, el modelo Penman Monteith presenta mejor comportamiento, tiende a seguir la pendiente de la recta 1:1 a un eso tiene a presentar pequeñas sobreestimaciones y subestimaciones de los valores esperados. De la figura 15 se pudo

observar que el modelo Hargreaves en base a la radiación solar tiende a sobreestimar con 4.72 mm/día y subestimar con 2.78 mm/día a los valores esperados, de la figura 16 se puede observar que el modelo Hargreaves en base a temperatura tiende a sobre estimar con 5.20 mm/día y subestimar con valores de 2.14 mm/día a los valores esperados, de la figura 17 se puede observar que el modelo Jensen – Haise tiende a sobreestimar con 5.09 mm/día y subestimar con 2.90 mm/día a los valores esperados, de la figura 18 se puede observar que el modelo Makink tiende a sobre estimar con un valor de 4.06 mm/día y subestimar con 2.49 mm/día, en la figura 19 se puede observar que el modelo Turc tiende a sobrestimar con un valor de 4.35 mm/día, y también presenta resultados muy próximos a los valores esperado aunque no sigue la pendiente de la recta 1:1.

Figura 14

Análisis de regresión lineal de Tanque evaporímetro clase A con Penman Monteith

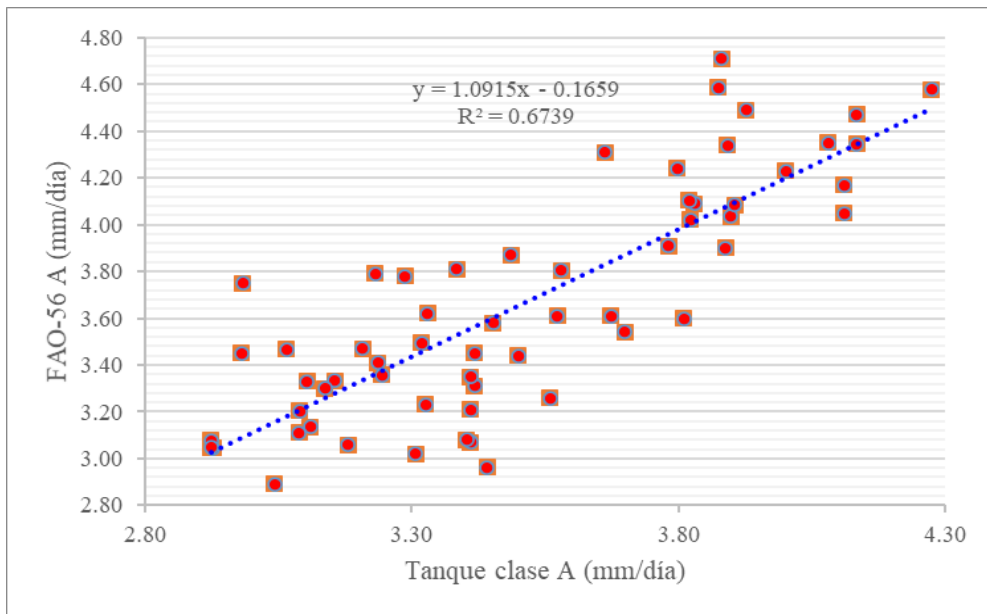


Figura 15

Análisis de regresión lineal de Tanque evaporímetro clase A con Hargreaves en base a la radiación solar

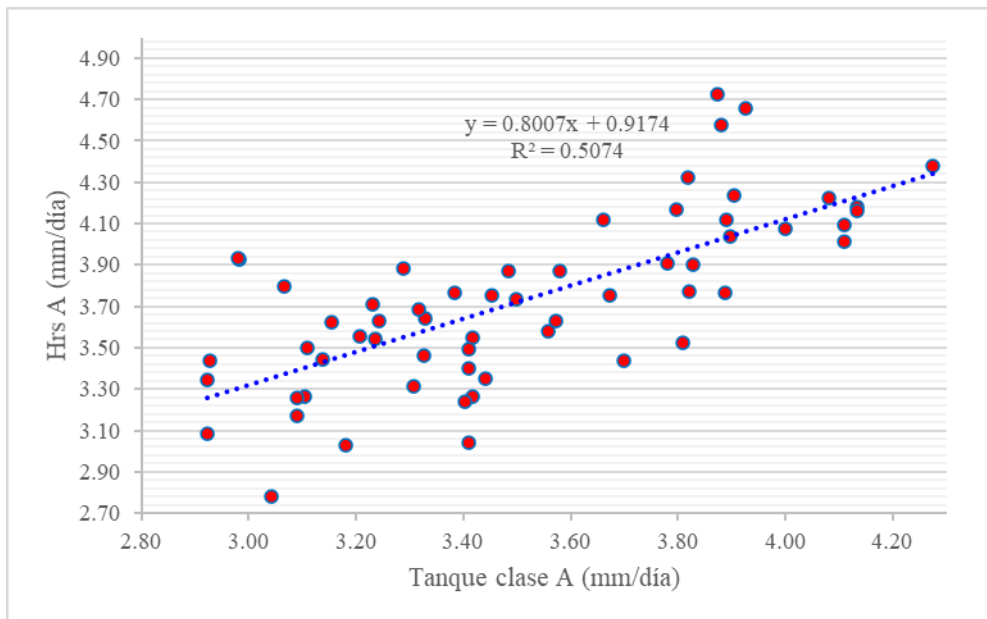


Figura 16

Análisis de regresión lineal de Tanque evaporímetro clase A con Hargreaves en base a la temperatura

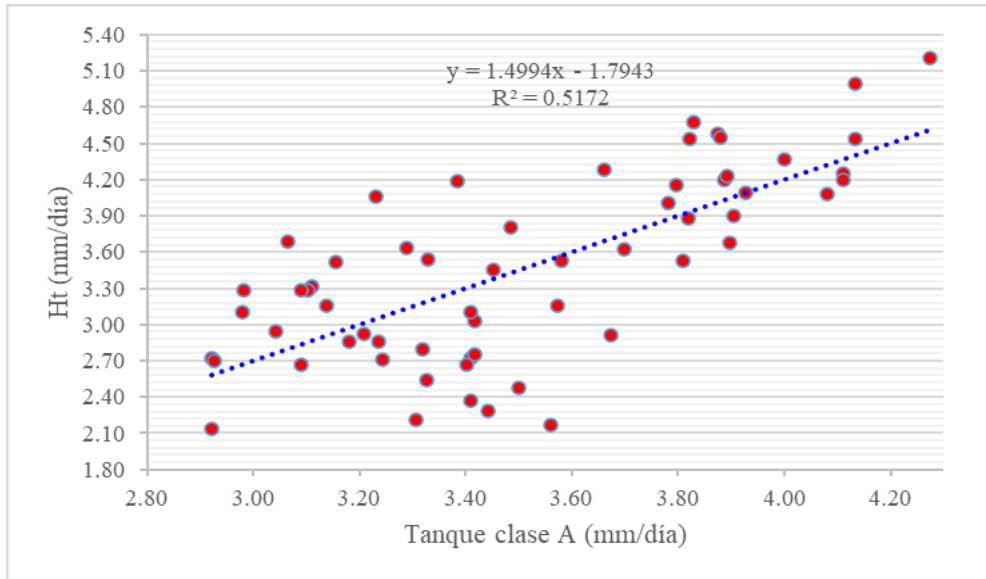


Figura 17

Análisis de regresión lineal de Tanque evaporímetro clase A con Jensen – Haise

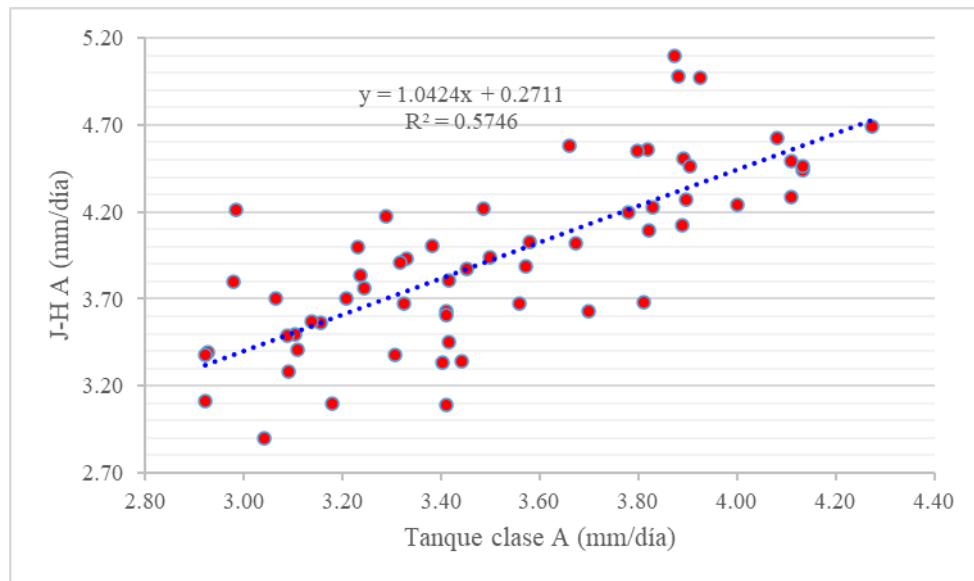


Figura 18

Análisis de regresión lineal de Tanque evaporímetro clase A con Makink

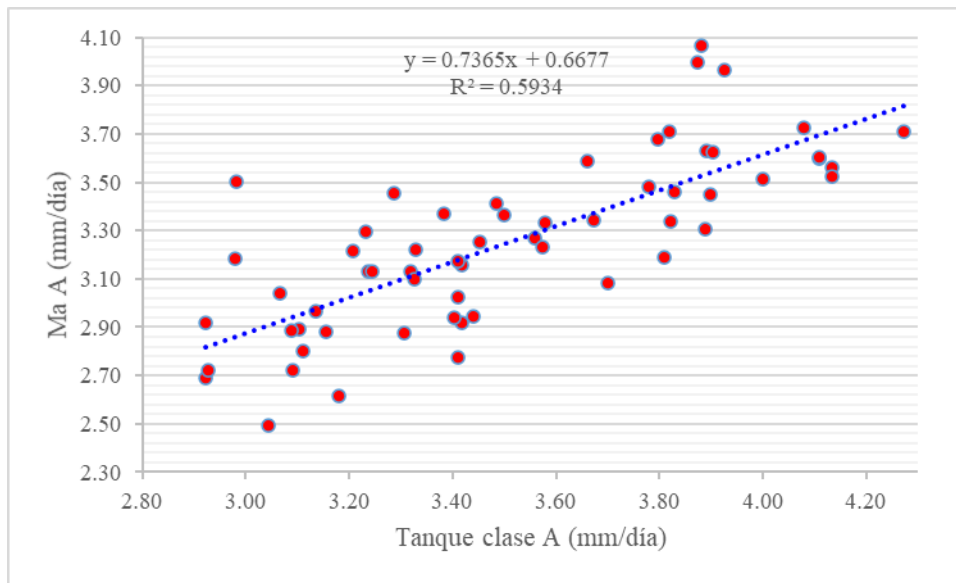
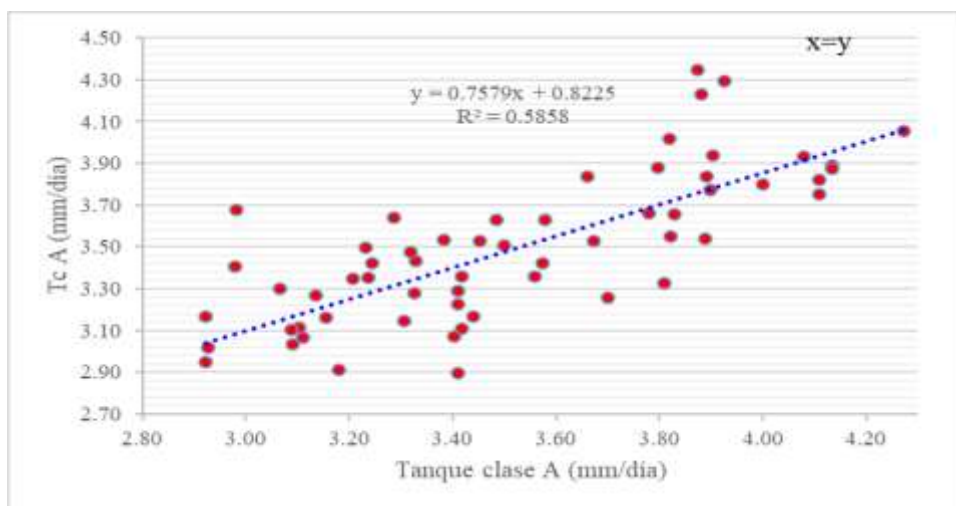


Figura 19

Análisis de regresión lineal de Tanque evaporímetro clase A con Turc



Al analizar los indicadores de ajuste, considerando análisis de regresión lineal y la comparación gráfica anterior se puede determinar que los valores de RSME y el índice de confiabilidad de los modelos Hargreaves en base a la radiación solar, Hargreaves en base a la temperatura, Jensen – Haise y Makink son producto se las sobreestimaciones y subestimaciones de los valores de evapotranspiración de referencia, siendo los modelos que más

se alejan de los valores esperados, mientras que los modelos de Penman Monteith y Turc presentan un RMSE más cercanos a cero y el índice de correlación más cercanos a la unidad y con índice de confiabilidad bueno, siendo el modelo Penman Monteith que presenta menores diferencias relativas respecto a la evapotranspiración de referencia de tanque evaporímetro Clase A.

Tabla 11
Indicadores estadísticos de ajuste.

	R ²	RMSE	PE	d	r	c	Desempeño
FAO 56	0.67	0.23	4.42	0.86	0.82	0.70	Bueno
Hrs	0.51	0.26	6.21	0.78	0.71	0.56	Tolerable
Ht	0.52	0.40	1.17	0.73	0.72	0.52	Tolerable
J-H	0.57	0.38	11.97	0.70	0.76	0.53	Tolerable
Ma	0.59	0.25	7.33	0.77	0.77	0.59	Tolerable
Tc	0.59	0.18	0.78	0.87	0.77	0.67	Bueno

El coeficiente de determinación nos indica que el modelo que mejor se ajusta a sus datos a su línea de tendencia, al hacer una comparación del comportamiento de coeficiente de determinación el modelo Penman Monteith presenta mayor valor que otros modelos un valor de 0.67mm/día, como se muestra en la figura 14 el modelo se ajusta a una correlación lineal a los valores de evapotranspiración de referencia observados y medidos, el error cuadrático medio y error porcentual nos indica cuando sus valores se aproximan a cero son óptimos el modelo obtuvo RMSE de 0.23 mm/día, PE de 4.42%, el índice de concordancia, el coeficiente de correlación y el índice de confiabilidad nos indica cuando los valores se aproximan a la unidad tiene un valor óptimo el modelo obtuvo d 0.86mm/día, r 0.82mm/día y c 0.70mm/día, según la metodología propuesta Camargo y Sentelhas en el año 1997 tabla 3, el modelo obtuvo un desempeño bueno por ello es recomendable para estimar la evapotranspiración de referencia en la zona de INIA.

El coeficiente de determinación nos indica que el modelo que mejor se ajusta a sus datos a su línea de tendencia, el modelo Hargreaves en base a la radiación solar, no se ajusta a una correlación lineal a los valores de

evapotranspiración de referencia observados y medidos, el error cuadrático medio y error porcentual nos indica cuando sus valores se aproximan a cero son óptimos el modelo obtuvo RMSE de 0.26 mm/día, PE de 6.21%, el índice de concordancia, el coeficiente de correlación y el índice de confiabilidad nos indica cuando los valores se aproximan a la unidad tiene un valor óptimo el modelo obtuvo d 0.78mm/día, r 0.71mm/día y c 0.56mm/día, según la metodología propuesta Camargo y Sentelhas en el año 1997 tabla 3, el modelo obtuvo un desempeño de tolerable por ello se descarta para estimar la evapotranspiración de referencia en la zona de INIA.

El coeficiente de determinación nos indica que el modelo que mejor se ajusta a sus datos a su línea de tendencia, el modelo Hargreaves en base temperatura, no se ajusta a una correlación lineal a los valores de evapotranspiración de referencia observados y medidos, el error cuadrático medio y error porcentual nos indica cuando sus valores se aproximan a cero son óptimos el modelo obtuvo RMSE de 0.40 mm/día, PE de 1.17%, el índice de concordancia, el coeficiente de correlación y el índice de confiabilidad nos indica cuando los valores se aproximan a la unidad tiene un valor óptimo el modelo obtuvo d 0.73mm/día,

r 0.72 mm/día y c 0.52mm/día, según la metodología propuesto Camargo y Sentelhas en el año 1997 tabla 3, el modelo obtuvo un desempeño de tolerable por se descarta para estimar la evapotranspiración de referencia en la zona de INIA.

El coeficiente de determinación nos indica que le modelo que mejor se ajusta a sus datos a su línea de tendencia, el modelo Jensen – Haise, no se ajusta a una correlación lineal a los valores de evapotranspiración de referencia observados y medidos, el error cuadrático medio y error porcentual nos indica cuando sus valores se aproximan a cero son óptimos el modelo obtuvo RMSE de 0.38 mm/día, PE de 11.97%, el índice de concordancia, el coeficiente de correlación y el índice de confiabilidad nos indica cuando los valores se aproximan a la unidad tiene un valor óptimo el modelo obtuvo d 0.0.70mm/día, r 0.76 mm/día y c 0.53mm/día, según la metodología propuesto Camargo y Sentelhas en el año 1997 tabla 3, el modelo obtuvo un desempeño de tolerable por ello se descarta para estimar la evapotranspiración de referencia en la zona de INIA.

El coeficiente de determinación nos indica que le modelo que mejor se ajusta a sus datos a su línea de tendencia es mejor, el modelo Makink, no se ajusta a una correlación lineal a los valores de evapotranspiración de referencia observados y medidos, el error cuadrático medio y error porcentual nos indica cuando sus valores se aproximan a cero son óptimos el modelo obtuvo RMSE de 0.25 mm/día, PE de 7.33%, el índice de concordancia, el coeficiente de correlación y el índice de confiabilidad nos indica cuando los valores se aproximan a la unidad tiene un valor

óptimo el modelo obtuvo d 0.77mm/día, r 0.77mm/día y c 0.59mm/día, según la metodología propuesto Camargo y Sentelhas en el año 1997 tabla 3, el modelo obtuvo un valor de desempeño de tolerable por se descarta para estimar la evapotranspiración de referencia en la zona de INIA.

El coeficiente de determinación nos indica que le modelo que mejor se ajusta a sus datos a su línea de tendencia es mejor, el modelo Tur, no se ajusta a una correlación lineal a los valores de evapotranspiración de referencia observados y medidos, el error cuadrático medio y error porcentual nos indica cuando sus valores se aproximan a cero son óptimos el modelo obtuvo RMSE de 0.18mm/día, PE de 0.78%, el índice de concordancia, el coeficiente de correlación y el índice de confiabilidad nos indica cuando los valores se aproximan a la unidad tiene un valor óptimo el modelo obtuvo d 0.87mm/día, r 0.77mm/día y c 0.67mm/día, según la metodología propuesto Camargo y Sentelhas en el año 1997 tabla 3, el modelo obtuvo un desempeño bueno por ello es recomendable para estimar la evapotranspiración de referencia en la zona de INIA.

Rondinel (2020), comparó los resultados de tanque evaporímetro clase A, con método satelital calibrado obteniendo resultados que el modelo tiene un desempeño pésimo, con valores de RSME =0.452 mm/día, PE = 1.685 %, índice de concordancia (d) = 0.342, índice de determinación (R^2) = 0.002, índice de concordancia (r) = 0.047, y el índice de confiabilidad (c) de 0.016, para este trabajo primero se debió hacer un análisis previo de datos diarios de clima, y evapotranspiración de referencia para todos los meses y de cada año y se debió descartar el año 2015 ya que este año

presenta distinta variación de evapotranspiración a los a otros modelos y se debió calibrar el modelo con datos medidos de tanque evaporímetro.

Retamozo (2015) comparo los resultados de tanque evaporímetro clase A, con MOD16A2 calibrado obteniendo resultados que el modelo tiene un desempeño pésimo, con valores de índice de determinación (R^2) = 0.55, índice de correlación de 0.74, índice de exactitud (Concordancia) (d) = 0.41, índice de confianza (c) = 0.30 con un desempeño pésimo, para que el ajuste de índice de confiabilidad sea bueno se debió calibrar el modelo con datos medidos de tanque evaporímetro.

4. CONCLUSIONES

1. Se estimó la evapotranspiración de referencia de la estación meteorológica INIA-Canaán por método directo Tanque evaporímetro clase A, obteniendo el resultado promedio anual del año 2013 a 2021, de 1305.88 mm/año. Por métodos indirectos seleccionados FAO Penman Monteith 1363.6 mm/año, Hargreaves en base a la radiación solar 1386.92 mm/año, Hargreaves en base a la temperatura 1290.55 mm/año, Jensen-Haise 1462.13 mm/año, Makkink 1210.12 mm/año, Turc 1295.69 mm/año, a partir de datos meteorológicos de la estación INIA, para los años 2017 al 2021 en promedio.

2. Mediante la comparación gráfica, gráficas de dispersión de evapotranspiración de referencia de tanque evaporímetro clase A, con métodos empíricos de Penman Monteith, Hargreaves en base a la radiación solar, Hargreaves en base a la temperatura, Jensen-Haise, Makkink y Turc, para los años de 2013 hasta 2021, se descartó los años de 2015, 2019, 2020 y 2021 ya que estos presentan una variación distinta y los coeficientes de determinación no se ajustaron a la recta de regresión lineal, presentan pendientes negativas y sus coeficientes de correlación resultaron valores muy bajos.

3. se comparó los resultados de evapotranspiración de referencia, de los años 2013-2014, 2016-2018 mediante los índices estadísticos de los modelos Penman Monteith, Hargreaves en base a la radiación solar, Hargreaves en base a la temperatura, Jensen-Haise, Makkink y Turc, con los valores de evapotranspiración de referencia obtenida de tanque evaporímetro clase A, los modelos Hargreaves en base a la radiación solar, Hargreaves en base a la temperatura, Jensen-Haise y Makkink presentaron un resultado de índice de confiabilidad tolerable, los modelos Penman Monteith y Turc presentaron un índice de confiabilidad bueno, estos modelos fueron los que lograron mejores estimaciones de valores de evapotranspiración de referencia para la zona de INIA.

5. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

Aroni. (2019). *Análisis comparativo de la evapotranspiración de referencia mediante la metodología del modelo SEBAL y Tanque*

- evaporímetro en la cuenca de Huancané en la región puno*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano - Perú].
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Estudio FAO- Riego y drenaje 56. Evapotranspiración de cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma: FAO56.
- Bochetti, M. (2010). *Análisis comparativo de la evapotranspiración obtenida mediante ecuaciones empíricas aplicadas en la zona Agrícola de Chillan* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santísima Concepción - Chile].
- Cahuana, A., Yugar, W. (2009). *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología CIV-233*. [Trabajo Dirigido Por Adscripción, Presentado Para Optar al Diploma Académico de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Mayor de San Simón Cochabamba – Bolivia].
<https://docplayer.es/214749650-Universidad-mayor-de-san-simon.html>
- Camargo, A. y Sentelhas, P. (1997). Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial no estado de Sao Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 5(1),89-97.
[https://www.researchgate.net/publication/284194031_Avaliacao_do_de_sempenho_de_diferentes_metodos](https://www.researchgate.net/publication/284194031_Avaliacao_do_de_sempenho_de_diferentes_metodos_de_estimativa_da_evapotranspiracao_potencial_no_estado_de_Sao_Paulo_Brasil)
- [de estimativa da evapotranspiracao potencial no Estado de Sao Paulo Brasil](#)
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. w. (2000). *Hidrología Aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: NOMOS S. A.
- Contreras, j. (2015). *Análisis comparativo de cuatro modelos de evapotranspiración de referencia en la microcuenca del río Quinuas* [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca Ecuador].
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/21725>
- Gutiérrez, C., (2018). *Manual del usuario PETP 2.0 evapotranspiración potencial*. Cartago, Costa Rica: MAXSOFT.
- Huaccoto, P. (2017). *Determinación del método más eficiente para calcular la evapotranspiración potencial para un modelo lluvia - escorrentía en la cuenca Huancané – Puno* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano - Puno].
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/5872>
- Jaramillo, A. (2006). Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. *Cenicafé*, 57(4), 288-298.
<https://docplayer.es/30742828-Evapotranspiracion-de-referencia-en-la-region-andina-de-colombia.html>
- López, J., Díaz, T., Watts, C., Cesar, J., Castellanos, A., Partida, L., Velásquez, T., (2015). Evapotranspiración y coeficiente de cultivo de Chile Bell en el Valle de Culiacán, México. *Terra latinoamericana*, 33(3), 209 – 219.

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57341186003>

- Lujano, A., Quispe, J., Lujano, E (2019). Métodos alternativos de estimación de evapotranspiración de referencia en la estación de Yauri – Cusco, Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 21(3), 215-224.
<https://doi.org/10.18271/ria.2019.479>
- Monsalve, G. (1999). *Hidráulica en la ingeniería*. (2^{da} ed). Editorial escuela Colombia de Ingeniería.
- Monterroso, A., Gómez, J., (2021). Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México. *Terra latinoamericana*, 39, 1-19.
<https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.774>
- More, H. (2021). *Análisis comparativo entre métodos empíricos para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la región de Tumbes* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Tumbes]. Archivo digital.
<http://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/20.500.12874/2569>
- Olarte, W. (1987). *Manual de riego por gravedad*. Lima - Perú: Comisión de Coordinación de Tecnología Andina (CCTA).
- Ortiz, R., Chile, M., (2020). Métodos de cálculo para estimar evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco. *Siembra*, 7(1), 070-079.
<https://www.researchgate.net/publication/352062102>
- Retamozo, W. J. (2015). *Estimación de evapotranspiración potencial a partir de imágenes satelitales Modis aplicadas a la zona agrícola de Cannán (2756 m.s.n.m.) - Ayacucho 2015*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho - Perú].
- Rodríguez. V.H. (2021). Calibración y validación de la evapotranspiración de referencia mediante modelos de máxima verosimilitud en la cuenca del río Ramis. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano - Perú].
- Rondinel, H. A. (2020). *Estimación satelital, validación y distribución espacial de la evapotranspiración a través del clima en la cuenca Cachi – Ayacucho-2020*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho - Perú].
- Santana, L. y Peña. E. (2010). Obtención de modelos para la determinación de la evapotranspiración de referencia en condiciones de clima subhúmedo seco en las Tunas, Cuba. *Revista IDESIA (Chile)*, 28(1), 55-59.
https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34292010000100008&script=sci_abstract
- Senamhi. (2015). *Generación de una base de datos de evapotranspiración Grillada y de alta resolución a nivel nacional (1981-2014)*. dirección general de hidrología y recursos hídricos.
- Toro, M., Arteaga, R., Vázquez, A., Ibáñez, A. (2015) modelos para estimar la evapotranspiración de referencia en la zona norte bananera del Urabá antioqueño (Colombia).

ARTÍCULO en Agrociencia 49,
821-836.

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140531952015000800001

Vásquez, A., Vásquez R, I., Vásquez R, C., & Cañamero, M. (2017). *Fundamentos de la ingeniería de riego*. Lima: Q&P Impresores S.R.L.

Villazón, J., Noris, P., Vásquez, R., Martines, G., Cobo, Y. (2021) Comparación de métodos empíricos para la estimación de la

evapotranspiración de referencia en Holguín, Cuba. *IDESIA (Chile)* 39(3), 103-109. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.scielo.cl/pdf/idesia/v39n3/0718-3429-idesia-39-03-103.pdf>

Ortiz, R., Chile, M., (2020). Métodos de cálculo para estimar evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco. *Siembra*, 7(1), 070-079. <https://www.researchgate.net/publication/352062102>