

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**



**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO  
INTEGRAL DEL AGUA**

**EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL NOPAL VERDURA (*Opuntia ficus-  
indica* L.) EN INVERNADERO Y GRADOS DÍAS DE DESARROLLO EN  
CHAPINGO ESTADO DE MÉXICO**

**T E S I S**

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA**



**DIRECCIÓN GENERAL DE LA ACADÉMICA  
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES  
CALIDAD Y MARCAS PROFESIONALES**

**PRESENTA:  
MARTÍN AZÚA BARRÓN**

**Bajo la supervisión de:  
DR. MARIO ALBERTO VÁZQUEZ PEÑA**



Chapingo, Estado de México, Julio de 2019

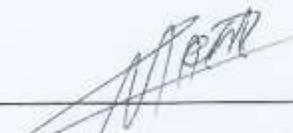
**EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL NOPAL VERDURA (*Opuntia ficus-indica* L.)  
EN INVERNADERO Y GRADOS DÍAS DE DESARROLLO EN CHAPINGO  
ESTADO DE MÉXICO**

Tesis realizada por **MARTÍN AZÚA BARRÓN**, bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, Aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

**COMITÉ ASESOR:**

DIRECTOR:

  
\_\_\_\_\_  
DR. Mario Alberto Vázquez Peña.

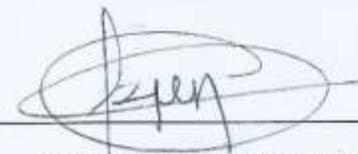
ASESOR:

  
\_\_\_\_\_  
DR. Ramón Arteaga Ramírez

ASESOR:

  
\_\_\_\_\_  
DR. Abel Quevedo Nolasco

LECTOR EXTERNO:

  
\_\_\_\_\_  
DR. Héctor Flores Magdaleno

Chapingo, México Julio de 2019

## DEDICATORIA

A mi esposa Oralia y a mis hijos Isaac, Melissa y Keevin que siempre han confiado en mí y han sabido tener la paciencia, sin su apoyo este proyecto no hubiese sido posible. Gracias y una disculpa por todos los momentos que me necesitaron y no estuve ahí para ustedes.

A mis padres Víctor y Liduvina que me han transmitido la determinación necesaria para llevar a buen puerto los proyectos.

A mis hermanos Francisco, María Guadalupe, Ma. Leticia y Víctor... los momentos de infancia juntos son inolvidables.

A todos los compañeros del posgrado con los que compartí momentos de angustia y alegría en los que aprendíamos un poco más.

A todos los maestros del posgrado que me brindaron una oportunidad, espero no haberlos defraudado.

A todos los que en este momento escapan a mi memoria y que algún momento me dieron una palabra de aliento... gracias.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Autónoma Chapingo y al posgrado en Ingeniería Agrícola Y Uso Integral del Agua por permitirme realizar mis estudios de Doctorado. Gracias alma mater.

Al Dr. Mario Alberto Vázquez Peña, por todo el apoyo durante la realización de este trabajo, tiempo en el cual brindó toda su disposición, experiencia, tiempo y conocimientos.

Al Dr. Ramón Arteaga Ramírez, por todo su apoyo y disposición para que este trabajo se llevara a cabo, sus aportaciones fueron claves.

Al Dr. Abel Quevedo Nolasco, por ser asesor de este trabajo de tesis de doctorado y cuyas aportaciones fueron muy atinadas y provechosas.

Al Dr. Héctor Flores Magdaleno por revisar la tesis y fungir como lector externo.

A todos los maestros del posgrado de IAUIA, Departamento de Irrigación y DIMA, por no escatimar apoyos para la realización de este proyecto.

Mayra, por toda la ayuda desde su trinchera.

Al CONACYT Consejo nacional de ciencia y tecnología por la beca que tuvo a bien asignarme y sin la cual este proyecto no hubiera sido posible.

## DATOS BIOGRÁFICOS



---

Nombre	Martin Azúa Barrón
Fecha de nacimiento	Agosto 1969
Lugar de nacimiento	Cerritos, S.L.P.
No. de cartilla militar	
CURP	AUBM690818HSPZRR05
Preparatoria	CBTa 123
Profesión	Ingeniero Agrónomo Especialista en Irrigación
Maestría	Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua
Áreas de trabajo	Capacitación, diseño y manejo de Riego y Drenaje. Experimentación Agrícola, instrumentación y automatización. Nutrición vegetal.

---

# RESUMEN GENERAL

## EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL NOPAL VERDURA (*Opuntia ficus-Indica* L.) EN INVERNADERO Y GRADOS DÍAS DE DESARROLLO EN CHAPINGO ESTADO DE MÉXICO

## EVAPOTRANSPIRATION OF TENDER CACTUS CLADODES (*Opuntia-ficus Indica* L.) IN GREENHOUSE AND DEGREE DAYS OF DEVELOPMENT IN CHAPINGO STATE OF MEXICO

Martin Azúa Barrón<sup>1</sup>, Mario Alberto Vázquez Peña<sup>2</sup>

### Resumen

El objetivo general fue determinar la evapotranspiración del cultivo de nopal verdura en invernadero y los grados días de desarrollo desde la brotación hasta el alcance del tamaño comercial de los nopalitos tiernos. La información que se usó fue medida en el campo experimental de la estación meteorológica del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo, en el Estado de México. Como primera actividad se realizó una revisión bibliográfica sobre los conceptos evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) y grados días de desarrollo (GDD) con énfasis en el cultivo del nopal verdura. La evapotranspiración es la suma de dos procesos separados: la evaporación y la transpiración, para un cultivo en específico se estima a partir de multiplicar la evapotranspiración de referencia por el coeficiente del cultivo. Por medio de los GDD se realizó la acumulación de calor necesario para completar un ciclo ontogénico, donde para cada planta que responde a la temperatura, tienen un requisito específico de GDD por arriba de una temperatura base, para para cada estado fenológico que se alcance. El conocer los efectos de esta variable en los cultivos permite definir estrategias de manejo para optimizar la productividad. Las variables temperatura, radiación global, humedad relativa y velocidad del viento, se utilizaron para calcular la ET<sub>o</sub> y los GDD. Se validaron los sensores que se utilizaron para medir las variables meteorológicas al compararlos con un sensor patrón. Medir todas las variables necesarias para la estimación de la ET<sub>o</sub> con Penman-Monteith no es práctico, por lo que se obtuvo un modelo para ser aplicado en condiciones de invernadero. Varios modelos empíricos que son utilizados para estimar la ET<sub>o</sub> al aire libre se les modificaron sus parámetros para estimar la ET<sub>o</sub> dentro del invernadero. Los valores de temperatura base, temperatura óptima, temperatura umbral y los GDD de desarrollo fueron definidos para el cultivo del nopal verdura y se midió la evapotranspiración del cultivo con una balanza de precisión y se calculó el coeficiente del cultivo durante un año.

### Abstract

The general objective was to determine the evapotranspiration of tender cactus crop in greenhouse and the degree days of development from sprouting to the commercial size of tender cladodes. The used information was measured in the experimental field of the meteorological station of the Irrigation Department of the Chapingo Autonomous University, in the State of Mexico. The first activity was a bibliographic review about the reference evapotranspiration concepts (ET<sub>o</sub>) and degree days of development (GDD) with emphasis on cactus tender leaf crop. Evapotranspiration consists of two separate processes: evaporation and transpiration, for a specific crop it is estimated from multiplying the reference evapotranspiration by the crop coefficient. With the GDD concept, the accumulation of necessary heat to complete an ontogenetic cycle was performed, where for each plant that responds to the temperature, they have a specific requirement of GDD above a base temperature, for each phenological stage reached. Knowing the effects of this variable on crops allows defining management strategies to optimize productivity. The variables: temperature, global radiation, relative humidity and wind speed were used to calculate the ET<sub>o</sub> and the GDD. The sensors used to measure the meteorological variables when comparing them with a standard sensor were validated. Measuring all the variables necessary for estimating ET<sub>o</sub> with Penman-Monteith is not practical, so a model was obtained to be used under greenhouse conditions. Several empirical models used to estimate the ET<sub>o</sub> in the open air were modified in their parameters to estimate the ET<sub>o</sub> inside the greenhouse. Values of base temperature, optimum temperature, threshold temperature and the GDD of development were defined for the cactus tender cladode crop, and the crop evapotranspiration was measured with a precision balance, and the crop coefficient was calculated through a year.

<sup>1</sup>Tesista

<sup>2</sup>Director

# ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN GENERAL</b> .....	VI
<b>1. INTRODUCCIÓN GENERAL</b> .....	1
1.1. Objetivo general.....	4
1.2. Objetivos particulares .....	4
1.3. Hipótesis.....	5
1.4. Organización de la tesis .....	5
1.5. Literatura citada.....	6
<b>2. EVAPOTRANSPIRACIÓN Y GRADOS DÍAS DE DESARROLLO DEL NOPAL VERDURA</b> .....	10
RESUMEN.....	10
2.1. Introducción .....	11
2.1.1. Importancia del nopal verdura .....	11
2.1.2. Exportación del nopalito .....	12
2.1.3. Principales variedades cultivadas en México .....	13
2.1.4. Trabajos realizados sobre el nopal verdura.....	13
2.1.5. Fertilización del nopal verdura.....	14
2.1.6. Estudios con respecto a los requerimientos hídricos del nopal .....	14
2.1.7. Trabajos que involucran GDD en nopal verdura .....	15
2.2. Balance de agua en el suelo .....	16
2.3. Balance de energía.....	16
2.4. Evapotranspiración.....	18

2.5. Ecuación de Penman-Monteith.....	18
2.6. Métodos indirectos para estimar la ETo y su clasificación.....	21
2.7. Grados días de desarrollo .....	22
2.7.1. Aspectos teóricos de los grados días de desarrollo .....	22
2.7.2. Métodos para el cálculo de las temperaturas base, umbral máxima y óptima .....	23
2.7.3. Métodos de cálculo de los grados días de desarrollo.....	26
2.8. Conclusiones .....	29
2.9. Literatura citada .....	30
<b>3. SENSORES DE BAJO COSTO PARA MEDIR HUMEDAD RELATIVA Y TEMPERATURA .....</b>	<b>35</b>
RESUMEN.....	35
3.1. Introducción .....	36
3.2. Materiales y métodos.....	37
3.2.1. Los sensores estudiados.....	38
3.3. Resultados y discusión .....	41
3.3.1. Temperatura.....	41
3.3.2. Humedad relativa .....	47
3.3.3. Validación de los modelos.....	51
3.4. Conclusiones .....	52
3.5. Literatura citada.....	53
<b>4. MODELO EMPÍRICO PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA HORARIA EN INVERNADERO.....</b>	<b>55</b>
RESUMEN.....	55

4.1. Introducción .....	56
4.2. Materiales y métodos.....	58
4.2.1. Instrumentación y equipo de medición .....	58
4.2.2. Ecuación de Penman-Monteith para el cálculo de la ETo .....	59
4.2.3. Otros modelos propuestos .....	60
4.2.4. Déficit de saturación (DS).....	60
4.2.5. Regresión lineal.....	61
4.2.6. Desarrollo teórico de los modelos .....	61
4.2.7. Validación del modelo seleccionado .....	61
4.2.8. Desempeño del modelo.....	61
4.3. Resultados y discusión .....	62
4.3.1. Visualización del comportamiento de la ETo en función de la HR, la T y DS .....	63
4.3.2. Generación de los modelos en función de la T, HR y DS.....	65
4.3.3. Análisis del modelo ETo <sub>6</sub> .....	66
4.3.4. El modelo ETo <sub>6</sub> y sus coeficientes .....	66
4.3.5. Validación del modelo .....	66
4.3.6. Comportamiento de los modelos a nivel diario.....	70
4.3.7. Desempeño del modelo a diferentes porcentajes de apertura de la ventilación lateral.....	72
4.4. Conclusiones .....	72
4.5. Literatura citada.....	72
<b>5. PARÁMETROS MODIFICADOS DE VARIOS MODELOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA EN INVERNADEROS.....</b>	<b>75</b>

RESUMEN.....	75
5.1. Introducción .....	76
5.2. Materiales y métodos.....	78
5.2.1. La ecuación de Penman-Monteith (P-M) .....	78
5.2.2. Modelos de ETo .....	79
5.2.3. Modificación de los parámetros .....	80
5.3. Resultados y discusión .....	83
5.3.1. Diagramas de dispersión entre los datos de ETo de los modelos con sus parámetros originales y los datos de ETo calculados con Penman-Monteith.....	83
5.3.2. Modificación de los parámetros de los modelos .....	85
5.3.3. Evaluación del desempeño de los modelos .....	87
5.4. Conclusiones .....	90
5.5. Literatura citada .....	90
<b>6. TEMPERATURAS CARDINALES Y GRADOS DÍAS DE DESARROLLO DEL NOPAL VERDURA VARIEDAD ATLIXCO .....</b>	<b>94</b>
RESUMEN.....	94
6.1. Introducción .....	95
6.2. Materiales y métodos.....	97
6.2.1. Localización.....	97
6.2.2. Cultivo .....	98
6.2.3. Medición de temperatura.....	98
6.2.4. Aspectos teóricos de los grados días de desarrollo .....	98
6.2.5. Métodos para determinar la temperatura base.....	100

6.2.6. Métodos de cálculo de los grados días de desarrollo.....	104
6.2.7. Modelos para estimar los GDD del seno simple a nivel diario en función de las temperaturas extremas .....	104
6.2.8. Cálculo de los intervalos de confianza del error en los días necesarios para completar la etapa fenológica .....	104
6.2.9. Estadísticos utilizados .....	105
6.3. Resultados y discusión .....	105
6.3.1. Método de la mínima desviación estándar .....	105
6.3.2. Método de Arnold .....	106
6.3.3. Método Curvilíneo .....	107
6.3.4. Validación de los datos.....	110
6.3.5. Modelos para estimar los GDD del seno simple a nivel diario en función de las temperaturas extremas .....	110
6.4. Conclusiones .....	112
6.5. Literatura citada .....	112
<b>7. DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL NOPAL VERDURA VARIEDAD ATLIXCO CON UNA BALANZA DE PRECISIÓN ...</b>	<b>116</b>
RESUMEN.....	116
7.1. Introducción .....	117
7.2. Materiales Y Métodos .....	118
7.2.1. Cultivo .....	119
7.2.2. Estación automática .....	119
7.2.3. Báscula de precisión .....	120
7.2.4. Tanque Tipo A.....	120

7.2.5. Ecuación de Peman-Monteith para el cálculo de la ETo .....	121
7.2.6. Coeficiente de tanque Tipo A .....	121
7.2.7. Cálculo de la evapotranspiración .....	121
7.2.8. Cálculo de la transpiración .....	122
7.2.9. Coeficiente de cultivo Kc .....	122
7.2.10. Modelación de la variable Kc como una distribución normal .....	122
7.2.11. Estadísticos utilizados .....	123
7.3. Resultados y discusión .....	123
7.4. Conclusiones .....	130
7.5. Literatura citada .....	131
<b>8. CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>134</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Modelos de evapotranspiración .....	21
Cuadro 3.1. Resumen de las características de los sensores y sus costos en dólares. ....	39
Cuadro 3.2. Intervalos de confianza de los errores de los sensores con respecto al sensor HMP45C en las mediciones de temperatura. ....	42
Cuadro 3.3. Estadísticos y coeficientes del modelo de regresión lineal simple para corregir los valores de los sensores al HMP45CT (Temperatura) número de datos n=4320 (90 días).....	44
Cuadro 3.4. Estadísticos y coeficientes del ajuste con regresión lineal múltiple de los valores de los sensores al HMP45C (Temperatura) con el dato anterior. ...	45
Cuadro 3.5. Intervalos de confianza de los errores de datos de los sensores con respecto al sensor HMP45C en las mediciones de humedad relativa. ....	47
Cuadro 3.6. Estadísticos y parámetro del modelo de ajuste por regresión lineal simple de la humedad relativa, número de datos n=4320.....	48
Cuadro 3.7. Estadísticos y parámetro del ajuste con el modelo de regresión lineal múltiple de la humedad relativa, número de datos n=4320.....	49
Cuadro 3.8. Estadísticas RSE y $R^2$ obtenidas en la validación de los modelos de temperatura con n = 1440.....	51
Cuadro 3.9. Estadísticas RSE y $R^2$ obtenidas en la validación de los modelos de humedad relativa con n = 1440.....	51
Cuadro 4.1. Coeficientes de determinación y error típico de los modelos generados con relación a ETo de Penman-Monteith estimados por la estación automática. ....	65
Cuadro 4.2. Estadísticos correspondientes a la regresión de los datos mostrados en la Figura 4.8 A.....	69
Cuadro 4.3. Estimaciones horarias del modelo ETo <sub>6</sub> vs ETo Penman-Monteith a tres porcentajes de apertura de la ventilación lateral.....	72

Cuadro 5.1. Detalle de los modelos empíricos incluidos, sus parámetros y su referencia.....	79
Cuadro 5.2. Estadísticos de los datos de ETo calculados con los modelos del Cuadro 5.1 con respecto a los de P-M.....	84
Cuadro 5.3. Los modelos con sus parámetros modificados para estimar de la ETo diaria (mm) dentro del invernadero n=102.....	86
Cuadro 5.4. Estadísticos obtenidos entre los valores de los modelos modificados para estimar ETo en el interior del invernadero y las mediciones de ETo de la estación meteorológica automática (Método de P-M).....	90
Cuadro 6.1. Datos de las repeticiones para ilustrar el método propuesto, Ecuaciones (6.16 a 6.20).....	108
Cuadro 6.2. Resumen de las temperaturas cardinales obtenidas con los métodos.....	109
Cuadro 6.3 . Cálculo de la media, los intervalos de confianza y la raíz del cuadrado medio del error en la estimación de los días necesarios para completar la etapa fenológica con los datos usados para determinar las temperaturas cardinales y los grados días de desarrollo.....	109
Cuadro 6.4. Cálculo de la media, los intervalos de confianza y la raíz del cuadrado medio del error en la predicción de los días necesarios para completar la etapa fenológica con los datos de validación.....	110
Cuadro 6.5. Modelos para estimar datos similares a los del Seno Simple en función de la temperatura máxima (Tx) y temperatura mínima (Tm). .....	111
Cuadro 7.1. Valores de Kt promedio trimestrales.....	125
Cuadro 7.2. Valores trimestrales del Kc.....	126
Cuadro 7.3. Resumen de estadísticos en la estimación de la ETo y ETc.....	129

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquematación del cálculo de los grados días de desarrollo con el método de seno simple, las $T_{max}$ , $T_{min}$ , $T_u$ , $T_b$ corresponden a las temperaturas máxima, mínima, umbral máxima y base. Las fórmulas para cada caso ver en UCANR (2018).....	27
Figura 2.2. Propuesta del cálculo de los GDD de desarrollo de Lui <i>et al.</i> (1997), las $T_{max}$ , $T_o$ , $T_{min}$ , $T_u$ , $T_b$ corresponden a las temperaturas máxima, óptima, mínima, umbral máxima y base en donde si la curva de temperaturas supera la $T_o$ se descuenta una cierta área por concepto de los efectos adversos de estrés por altas temperaturas en la planta. Esquema tomado de Liu <i>et al.</i> (1997).....	28
Figura 2.3. Esquematación del cálculo de los grados días de desarrollo con el método de triangulo simple, las $T_{max}$ , $T_{min}$ , $T_u$ , $T_b$ corresponden a las temperaturas máxima, mínima, umbral máxima y base. Las fórmulas para cada caso ver en UCANR (2018).....	29
Figura 3.1. Invernadero donde se realizó la toma de datos con una estación meteorológica automatizada.....	38
Figura 3.2. Diagramas de dispersión entre las temperaturas medidas con los sensores y el sensor patrón. La línea roja tiene pendiente 1:1 y pasa por el origen, (datos de 90 días) número de datos n=4320. ....	43
Figura 3.3. Diagramas de dispersión entre las mediciones de temperatura del sensor HMP45C y los datos medidos por los tres sensores, los corregidos con los métodos de regresión lineal simple y múltiple: A y B el sensor LM35DZ 1; C y D el DHT22 2 y E y F el DHT11 3 número de datos n=4320. ....	46
Figura 3.4. Diagramas de dispersión de humedad relativa del sensor HMP45C con: A, B) y C) sensores HMZ_433A1; D), E) y F) sensores DHT22 y G), H) e I) sensores DHT11, número de datos n=4320. ....	48
Figura 3.5. Diagramas de dispersión entre la humedad relativa medida con el sensor HMP45C y las medidas, las ajustadas con el modelo de regresión lineal	

simple y múltiple de los sensores: A), B) y C) con el sensor HMZ_433A1; D), E) y F) con el DHT22 1 y G), H) y I) con el DHT11 1, número de datos n=4320...	50
Figura 4.1 Vista general del Invernadero. ....	58
Figura 4.2. Estación automática al interior del invernadero. ....	59
Figura 4.3. Variación temporal de la radiación solar horaria en el invernadero en 2017 (100 días) con n=2400. ....	62
Figura 4.4. Variación temporal de la T y la HR medidas cada hora en el invernadero el mes de septiembre de 2017 (primeros 25 días), temperatura en °C (azul) y humedad relativa en % (negro) con n=600. ....	63
Figura 4.5. Variación temporal de la ETo horaria estimada con Penman-Monteith en el invernadero en 2017 (100 días) con n=2400. ....	63
Figura 4.6. Relación de la ETo calculada con Penman-Monteith con respecto a las variables A) Temperatura, B) Humedad Relativa y C) Déficit de Saturación (DS) con datos cada hora durante el periodo de medición (413 días) n= 9912.	64
Figura 4.7. Variación temporal de los datos del método de Penman-Monteith y los estimados con los modelos ETo <sub>6</sub> , Abtew y Bonachela et al. (2006) (100 días del 2018) n=2400.....	66
Figura 4.8. ETo horarias estimados con el modelo ETo <sub>6</sub> y los calculados con: A) Penman-Monteith, B) Abtew y C) Bonachela para el periodo de validación (100 días) n= 2400.....	68
Figura 4.9. A) Tendencia entre la ETo P-M (Penman-Monteith) y ETo Abtew, B) ETo P-M y ETo Bonachela para el periodo de validación (100 días) n=2400...	69
Figura 4.10. Comportamiento diario de la ETo estimada con los diferentes métodos para el periodo de validación (100 días). ....	70
Figura 4.11. Diagramas de dispersión y coeficientes de determinación (R <sup>2</sup> ) del modelo de Penman-Monteith con: A) ETo <sub>6</sub> , B) Abtew y C) Bonachela en el periodo de validación (100 días) n=100.....	71
Figura 5.1. Vista panorámica del Invernadero. ....	78
Figura 5.2. Estación automática al interior del invernadero. ....	78

Figura 5.3. Diagrama de flujo simplificado para la obtención de los modelos de ETo modificados para estimar la ETo en el interior de un invernadero.....	82
Figura 5.4. Diagramas de dispersión entre los valores de ETo calculados con los modelos del Cuadro 5.1 y los del método de P-M: A), B) y C) con base en la temperatura y de la D) a la K) en radiación (n=102). .....	83
Figura 5.5. Ajuste temporal entre las mediciones de ETo de la estación automática (P-M) y los modelos modificados basados en temperatura para predecir la ETo diaria en el interior de un invernadero de: Baier-Robertson, Romanenko y Hargreaves, n=51. ....	87
Figura 5.6. Diagramas de dispersión entre los valores predichos por los modelos modificados y las mediciones en el interior del invernadero con la estación automática (P-M): A) entre el método de Baier-Robertson y P-M, B) entre Romanenko y P-M, C) entre Hargreaves y P-M, n=51.....	88
Figura 5.7. Ajuste temporal entre las mediciones de ETo de la estación automática (P-M) y los modelos modificados con base en radiación para predecir la ETo diaria en el interior de un invernadero, n=51. ....	89
Figura 5.8. Diagramas de dispersión entre los valores predichos por los modelos modificados y las mediciones en el interior del invernadero con la estación automática (P-M): A) Turc y P-M, B) Abtew y P-M, C) Jensen-Haise y P-M, D) Caprio y P-M, E) Irmak y P-M, F) Stephens y P-M, G) Priestley-Taylor y P-M y H) Makkink y P-M, n=51. ....	89
Figura 6.1. Invernadero con un volumen de aire de 550 m <sup>3</sup> y área útil de 105 m <sup>2</sup> . .....	97
Figura 6.2. Invernadero con un volumen de 23.5 m <sup>3</sup> y área útil de 8.5 m <sup>2</sup> .....	97
Figura 6.3. Plantas en el ambiente. ....	97
Figura 6.4. Gráfica entre la Tb propuesta (°C) y la Desviación Estándar (°D). 106	
Figura 6.5. Gráfica entre la Tb y los GDD, para una Tb de 6.19 (°C) se indica un valor de GDD de 818.6. ....	106
Figura 6.6. Resultado de la implementación del método de Arnold. ....	106

Figura 6.7. Diagrama de dispersión entre las tasas de desarrollo (1/d) y las temperaturas medias (T), al implementar el método curvilíneo se obtiene la curva que inicia en la $T_b=6.34$ °Cy termina en la $T_u=33.13$ °C (línea negra) se señala la $T_o$ que corresponde a $29.02$ °C (línea roja), y la curva de ajuste con la función beta (color azul), $n=41$ . .....	107
Figura 6.8 Marcha temporal de los GDD calculados con el método de seno simple y los estimados con el modelo General del Cuadro 6.5, así como la línea que corresponde al error.....	111
Figura 7.1. Vista general del Invernadero .....	119
Figura 7.2. Estación automática al interior del invernadero .....	120
Figura 7.3. Marcha diaria de la evapotranspiración calculada con Penman-Monteith y la evaporación en el tanque Tipo A, $n=368$ . .....	123
Figura 7.4. Marcha diaria del coeficiente de tanque ( $K_t$ ), $n=368$ .....	124
Figura 7.5. Relación de la $E_{To}$ P-M vs el Tanque Tipo A. ....	124
Figura 7.6. Diagrama de dispersión de los datos evapotranspiración del cultivo ( $E_{Tc}$ ) y los de evapotranspiración con Penman-Monteith ( $E_{To}$ P-M) y la línea de ajuste por regresión lineal simple, ( $n=319$ ). .....	125
Figura 7.7. Marcha temporal de las variables $E_{To}$ con Penman-Monteith ( $E_{To}$ P-M), la evapotranspiración del cultivo ( $E_{Tc}$ ) y la transpiración ( $T_c$ ), las líneas punteadas señalan el suavizado de los datos, todos en mm de lámina de agua, $n=319$ .....	127
Figura 7.8. Marcha temporal de los coeficientes del cultivo ( $K_c$ ) obtenido con la balanza, la línea punteada señala el suavizado de los datos, $n=319$ . .....	128
Figura 7.9. Marcha temporal del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) obtenido con la balanza, la línea punteada señala el suavizado de los datos, $n=319$ . .....	128
Figura 7.10. Marcha temporal de las variables ( $K_c$ y Área caulinar) en dos cortes consecutivos del nopal, $n=76$ .....	129

Figura 7.11. Marcha temporal de la ETc medida con la balanza y las estimaciones con la evapotranspiración de referencia y las mediciones de evaporación del tanque Tipo A, n=319..... 130

## 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

México según el fondo para la comunicación y la educación ambiental A.C (2019) tiene dos problemas que son: poca disponibilidad y la distribución del agua, para el primero se contabilizan menos de 5000 m<sup>3</sup> de agua por habitante y para el segundo la distribución geográfica del agua no coincide con la de la población. El crecimiento poblacional y económico ejercen presión sobre los recursos hídricos, lo que genera conflictos en ocasiones violentos, la problemática por el agua es a diferentes niveles, desde problemas entre los usuarios de una misma comunidad, municipios, estados, hasta en las fronteras de los países (Becerra *et al.*, 2006).

Las cactáceas son consideradas autóctonas del continente americano y en las zonas áridas de México es donde se albergan la mayor cantidad de especies (Bravo, 1978). El nopal por su resistencia a la sequía es un cultivo que prospera en superficies con cierta aridez, que en México son aproximadamente el 48.29 por ciento del territorio (Flores, 2002). Según CONAZA (1994) en México hay más de 100 especies del género opuntia y los botánicos lo consideran el centro de origen de los nopales. El nopal se cultiva en más de 25 países para aprovechar la tuna, el nopal tierno o el nopal maduro, y en México se tiene una producción comercial de nopal verdura de 12,041 ha con rendimientos de 9.03 a 99.93 t ha<sup>-1</sup> con un promedio de 64.33 t ha<sup>-1</sup> (Blanco *et al.*, 2011).

El nopal tiene estrategias para adaptarse a las condiciones de las zonas áridas como: Suculencia, elaboración de mucilagos y sustancias higroscópicas a partir de ácidos orgánicos, la superficie foliar al ser plana y discoidea son los cuerpos más eficientes para evitar la evapotranspiración, la savia viscosa para cerrar las heridas de la planta y sobre todo el metabolismo ácido de las crasuláceas (Becerra, 1994).

En México en el 2010 se contaba con 18,127 unidades de producción de agricultura protegida en una superficie de 12,540 ha, lo que indica un promedio de superficie de 0.69 ha por unidad de producción (FIRA, 2010). Para 2013 según González, se estimó en México una superficie bajo la modalidad de agricultura protegida de 20,000 ha. La mayoría son unidades de producción menores a 0.5 ha, las que tienen limitado acceso a la tecnología, capacitación y asistencia técnica (Cedillo y Calzada, 2012).

## ***Evapotranspiración***

La evapotranspiración es la suma de dos procesos separados: la evaporación donde el agua líquida se convierte en vapor de agua y se retira de la superficie evaporante y la transpiración que consiste en la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos vegetales y su posterior remoción hacia la atmósfera (Allen *et al.*, 2006). La evapotranspiración es una variable importante en: los balances de agua en el suelo, diseño y manejo del sistema de irrigación, simulación de cultivos y estudios hidrológicos (Allen *et al.*, 1989), en climatología y agricultura (Scheff and Dargan, 2014) y en la evaluación de los efectos del cambio climático en los cultivos, donde se espera que las condiciones más calurosas y secas aumenten las demandas de agua (Espadafor *et al.*, 2011; Moreno *et al.*, 2011). En las regiones donde hay escasez de agua se requiere optimizar las prácticas de irrigación y suministrar al cultivo en la medida de lo posible el agua que necesita, sin desperdicio (Orgaz *et al.*, 2005).

El término evapotranspiración de referencia se define como la cantidad de agua evapotranspirada por un cultivo de referencia como el pasto con una altura de 0.12 m, con una resistencia de la superficie de  $70 \text{ s m}^{-1}$  y un albedo de 0.23, muy parecida a la evaporación de una superficie de pasto de altura uniforme y que crece activamente, que sombrea la superficie del suelo y sin limitantes de agua, (Allen *et al.*, 2006).

En 1990 se consultó un grupo de expertos, quienes recomendaron el método de Penman-Monteith como el estándar para la definición y el cálculo de la ETo. La mayoría de los diferentes efectos climáticos se incorporan en el cálculo de la ETo, por lo que representa un indicador de la demanda hídrica climática. Para la ETc de un cultivo en particular la ETo se multiplica por el coeficiente de cultivo, que depende de las características de este (Allen *et al.*, 2006).

La ETo se estima por muchos métodos, pero para cultivos en invernaderos se utiliza el tanque tipo A por su simplicidad, bajo costo y la obtención de estimaciones diarias, su uso es objeto de controversia al no saberse con exactitud el factor a utilizar para estimar la ETo y el área que se deja de producir por el espacio que ocupa en el interior del invernadero (Fernandes *et al.*, 2003). Se ha encontrado que el tanque tipo A en el interior del invernadero con un factor de 0.79 estima adecuadamente para climas mediterráneos la

evapotranspiración de referencia (Fernández *et al.*, 2010). La evapotranspiración de referencia en el interior de los invernaderos es siempre menor que en el exterior (Fernandes *et al.*, 2003, Orgaz *et al.*, 2005), y al variar con las condiciones climáticas tiene un comportamiento estacional muy diferente tanto en verano como en invierno (Li *et al.*, 2003).

### **Grados días de desarrollo**

Los ciclos biológicos de muchos organismos dependen de la temperatura (Herms, 2004; Flores *et al.*, 2016). Sus efectos son positivos y negativos en la vida vegetal, la acción positiva se ejerce en la planta por la acumulación de calor, que es la energía necesaria para cumplir su ciclo ontogénico y es mediante los grados días de desarrollo que se realiza la acumulación (Angeloni *et al.*, 2001). Las plantas requieren una cierta cantidad de calor para ir de una etapa fenológica a otra, su desarrollo depende de la temperatura, ciertas temperaturas aceleran el desarrollo y otras lo retardan (Miller *et al.*, 2001). Vidal *et al.* (2010) mencionaron que conocer los efectos de esta variable en los cultivos permite definir estrategias de manejo para optimizar la productividad. Cada planta tiene un requisito específico de temperatura antes de que ciertos estados fenológicos se alcancen (Sikder, 2009).

El concepto grados días se originó con las observaciones realizadas por Reamur en 1735, en las que notó que el desarrollo de las plantas estaba más relacionado a la temperatura acumulada en una etapa dada, que al tiempo transcurrido (Neild y Seeley, 1977). Mediante los grados días de desarrollo se asigna un cierto valor de calor a cada día y se suma todos los valores de los días para completar una etapa (Miller *et al.*, 2001). Para el cálculo de los grados días de desarrollo es necesario conocer el umbral térmico o temperatura base, que es diferente para cada cultivo y etapa fenológica. Este concepto se conoce con varios nombres: suma de temperaturas efectivas, suma de unidades térmicas, suma de unidades calor o suma de grados día ( $^{\circ}$  D) (Flores *et al.*, 2016). El método de grados días de desarrollo es independiente del medio ambiente y del año, por lo qué, es adecuado para describir el desarrollo de los cultivos (Salazar *et al.*, 2013).

La temperatura y los grados días de desarrollo son dos variables que afectan directamente las funciones de la planta en cuanto a: evapotranspiración, fotosíntesis, respiración y a

nivel de los tejidos el movimiento de agua y nutrientes (Hassan *et al.*, 2007). Los grados días se utilizan para estimar el crecimiento potencial de los cultivos (Salazar *et al.*, 2008). En el cultivo de la caña de azúcar, la evapotranspiración acumulada tiene una correlación lineal con los grados días de desarrollo, por lo que, en los modelos de estimación de rendimientos agrícolas los grados días pudieran ser utilizados para estimar la evapotranspiración (Ferrer *et al.*, 2014). Almaguer *et al.* (2014) generaron modelos de regresión entre la acumulación de los GDD y la acumulación de biomasa de nopalitas para consumo humano, en los que usaron como  $T_b$  el valor de 10 °C.

El cultivo de nopal tiene ciertos requerimientos térmicos, de acuerdo con Ríos y Quintana (2004) el nopal requiere una temperatura media anual entre 16 y 28 °C. Russell y Felker, (1987) indican que las temperaturas altas pueden disminuir el desarrollo y que el nopal soporta temperaturas hasta de 65 °C durante una hora sin presentar daños y a menores de 5 °C el nopal presenta daño celular. Según SAGARPA (2015) el nopal ha despertado un interés genético por los diversos ambientes a los que se ha adaptado, se ha encontrado en regiones donde las temperaturas descienden a -40 °C. Flores *et al.* (2004) coinciden con Ríos y Quintana (2004) en la temperatura media, pero indican que una temperatura de -2 °C y una máxima de 45 °C por tiempos prolongados pone en riesgo la producción e incluso la supervivencia de la planta.

### **1.1. Objetivo general**

Determinar la evapotranspiración del cultivo de nopal verdura en invernadero y los grados días de desarrollo necesarios desde la brotación de los nopalitas hasta que los nopalitas tiernos alcancen el tamaño comercial.

### **1.2. Objetivos particulares**

Definir los alcances y limitaciones que tienen los sensores electrónicos de bajo costo, disponibles en el mercado y que con frecuencia son utilizados en proyectos académicos y de investigación en países en desarrollo, al comparar los datos obtenidos con estos y los de un sensor patrón.

Generar un modelo empírico para estimar la evapotranspiración de referencia en invernadero con cubierta de plástico. Toda vez que no hay un método estándar como el de Penman-Monteith para las condiciones de los invernaderos.

Modificar los parámetros de once modelos matemáticos para adecuarlos a las condiciones propias de los invernaderos y usarlos para estimar la ETo en el interior de un invernadero de plástico.

Determinar las temperaturas cardinales del nopal verdura y los grados días de desarrollo necesarios entre cortes consecutivos de nopalitas tiernos para consumo humano.

Obtener las necesidades hídricas del cultivo de nopal verdura con una balanza de precisión, así como la determinación del coeficiente de cultivo.

### **1.3. Hipótesis**

Los sensores electrónicos de bajo costo son útiles en los trabajos académicos o de investigación previa caracterización.

Es posible determinar la evapotranspiración de referencia en un invernadero con cubierta de plástico con un modelo empírico en función de variables fácil de medir (temperatura y humedad relativa) o de calcular (déficit de saturación)

Los modelos empíricos o teóricos, derivados se pueden usar en ambiente de otras latitudes, que se pueden modificar en sus parámetros y estimar adecuadamente la evapotranspiración de referencia en un invernadero con cubierta de plástico.

Mediante la utilización de técnicas reportadas en la literatura es posible determinar las temperaturas cardinales del nopal verdura y con estas calcular los grados días de desarrollo necesarios para que los nopalitas completen la etapa fenológica desde que brotan hasta que alcanzan la madurez comercial.

Con el uso de una báscula de precisión se puede determinar los requerimientos hídricos del nopal verdura y su Kc.

### **1.4. Organización de la tesis**

La presente tesis se dividió en siete capítulos:

El primero es una introducción, la importancia y justificación, objetivo e hipótesis de la investigación. El segundo es una revisión bibliográfica sobre los conceptos evapotranspiración de referencia y grados días de desarrollo con énfasis en el cultivo del nopal verdura. El tercero es una comparación entre los sensores de bajo costo (que frecuentemente se utilizan para medir las variables temperatura y humedad relativa) con un sensor Vaisala HMP45C, para evaluar sus alcances y limitaciones en la medición de las variables mencionadas. El cuarto se determinó un modelo empírico, que se derivó- de la técnica de regresión lineal múltiple, para estimar la ETo de una manera rápida, simple y precisa dentro del invernadero. El quinto consistió en la modificación de los parámetros de modelos empíricos para estimar la ETo en el interior de un invernadero de plástico; con base en los modelos iniciales que fueron propuestos para la estimar la ETo al aire libre. El sexto consistió en la determinación de las temperaturas cardinales y los grados días de desarrollo de los nopales tiernos para alcanzar el tamaño comercial, para lo cual se midió entre las etapas fenológicas dentro y fuera de un invernadero de plástico, los grados días de desarrollo dependieron del método utilizado para su cálculo (método residual, seno simple y triángulo simple). El capítulo siete consistió en medir la ETc del cultivo del nopal verdura con una balanza de precisión, donde se determinó el coeficiente de tanque para el cálculo de la ETo a partir de la evaporación medida en el tanque Tipo A, también se obtuvo el coeficiente del cultivo (Kc).

## 1.5. Literatura citada

- Allen, R. G.; Jensen, M. E.; Wright, J.L. and Burman, R. D. (1989). Operational Estimates of Reference Evapotranspiration. *Agron J.* 81(4): 650-662.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. FAO: 322 pp.
- Almaguer-Sierra, P., Rodríguez-Fuentes, H., Barrientos Lozano, L., Mora Ravelo, S. G., & Vidales-Contreras, J. A. (2014). Relación entre grados-día y la producción de *Opuntia ficus-indica* para consumo humano en Marín, Nuevo León. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(6): 1055-1065
- Angeloni, O., Caram, G. D. Y., & Prause, J. (2001). Utilización de dos temperaturas base para el cálculo de grados-día. Univ. Nac. Nor Este, FCA, Cátedra Climatología y Fenología Agrícolas. Corrientes. 4 pp.

- Becerra, G. (1994). Nopal verdura *Opuntia* spp: Cultivo alternativo para las zonas áridas y semiáridas de México. In Nopal verdura *Opuntia* spp: Cultivo alternativo para las zonas áridas y semiáridas de México. CONAZA. 31 pp.
- Becerra P. M., J. Sainz S. y C. Muñoz P. (2006). Los conflictos por agua en México. Diagnóstico y análisis. *Gestión y política pública*, 15(1): 111-143.
- Blanco M. F., R.D. Valdez S., R. Magallanes Q., R.E Vázquez A., E. Olivares S., E. Gutiérrez O. y J. A. Vidales C. (2011). El Rendimiento e interacciones nutrimentales en nopal (*Opuntia ficus indica* L.). IX Simposium-Taller Nacional y Internacional de producción de nopal y maguey. 12 y 13 de noviembre. 255-260.
- Bravo, (1978). Las cactáceas de México. Segunda edición. Volumen I. UNAM. 745 pp.
- Cedillo, E., y Calzada, M. (2012). La horticultura protegida en México situación actual y perspectivas. *Encuentros UNAM*: 1-10.
- CONAZA. (1994). Cultivo alternativo para las zonas áridas y semiáridas de México. Instituto nacional de ecología (primera edición). Saltillo, Coahuila. México. 18 pp.
- Espadafor, M.; Lorite, I. J.; Gavilan, P. and Berenjena, J. (2011). An Analysis of the Tendency of Reference Evapotranspiration Estimates and other Climate Variables During the last 45 Years in Southern Spain. *Agricultural Water Management*. 98 (6):1045-1061.
- Fernandes, C.; Cora, J. E. y Campos de Araujo, J. A. (2003). Reference evapotranspiration estimation inside greenhouses. *Scientia Agricola*. 60(3):591-594.
- Fernández, M. D.; Boachela, S.; Orgaz, F.; Thompson R.; López, J. C.; Granados, M. R.; Gallardo, M. and Ferreres, E. (2010). Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *IrrigSci*. 28:497-509.
- Ferrer Reyes, M., Gálvez, G., Lamela, C., & Jiménez, G. (2014). Uso de los grados días acumulados en la estimación de la evapotranspiración de la caña de azúcar (*Saccharum* spp. híbrido) para ciclos de crecimiento mono modal. *Cultivos Tropicales*, 35(3): 113-117.
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). (2010). Oportunidades de negocio en la agricultura protegida. Boletín informativo No 7. 100 pp.
- Flores, G. H., Domínguez, M. P. A., Narváez, M. M. P., Zavala, E. F. Santana, E. S. y García, H. R. V. (2016). Predicciones fenológicas en cultivos agrícolas bajo tiempo térmico. INIFAP-SAGARPA, Boletín Técnico No. 85. 18 pp.
- Flores, H. A., Orona, C. I., Martínez, M. J. Rivera, G. M. y Hernández, M. J. C. (2004). Producción del nopal para verdura (*Opuntia* spp) bajo riego por goteo subterráneo en la comarca lagunera. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*. 3 (1): 99-104.
- Flores V, C. A. (2002). El Nopal y la lucha contra la desertificación. Reporte de investigación 59. CIESTAAM. UACH. 39 pp.

- Fondo para la comunicación y educación ambiental A. C. (2019). (<https://agua.org.mx/cuanta-agua-tiene-mexico/>). (consultado en línea enero de 2019).
- González, N.J.F. 2013. 20,000 has. Bajo agricultura protegida. Horticultivos. Editorial Agro Síntesis S.A. de C.V. México, D.F: 8-10.
- Hassan, Q. K., Bourque, C. P., Meng, F. R., & Richards, W. (2007). Spatial mapping of growing degree-days: an application of MODIS-based surface temperatures and enhanced vegetation index. *Journal of Applied Remote Sensing*, 1(1): 1-12.
- Hermes, D. A. (2004). Using degree-days and plant phenology to predict pest activity. IPM (integrated pest management) of midwest landscapes, 49-59.
- Li, Y. S.; Aydin, M.; Yano, T, and Li, X. (2003). Evapotranspiration of oranges trees in greenhouse lysimeters. *Irrig Sci.* 21(4): 145-149.
- Miller, P., Lanier, W., and Brandt, S. (2001). Using Growing Degree Days to Predict Plant stages. Montana State University. *Extension Service*. 8 pp.
- Moreno, R. A.; Aguilar, D. J. y Luevano, G. A. (2011). Características de la Agricultura Protegida y su Entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*. 15 (29):763-774.
- Neild, R. E., & Seeley, M. W. (1977). Growing degree-days predictions for corn and sorghum development and some applications to crop production in Nebraska. 12 pp.
- Orgaz, F.; Fernández, M. D.; Bonachela, S.; Gallardo, M. and Fereres, E. (2005). Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. *Agricultural water management*. 72 (2):81-96.
- Ríos, R. J. y Quintana, M. V. (2004). Manejo General del Cultivar del Nopal. Secretaría de la Reforma Agraria. Colegio de Postgraduados. 81 pp.
- Russell, C. and Felker, P. (1987). Comparative freeze hardiness of fruit vegetable and fodder *Opuntia* accessions J. *Horti. Sci.*62:545-550.
- Salazar-Gutierrez MR, Johnson J, Chaves-Cordoba B, Hoogenboom G. (2013). Relationship of base temperature to development of winter wheat. *Int J Plant Prod.* 7(4):741-762.
- Salazar, M. R., Jones, J. W., Chaves, B., & Cooman, A. (2008). A model for the potential production and dry matter distribution of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *Scientia Horticulturae*, 115(2): 142-148.
- Scheff, J. and Dargan M. W. F. (2014). Scaling Potential Evapotranspiration with Greenhouse Warming. *American Meteorological Society*. 27(4):1539-1558.
- Secretaría de Agricultura, ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2015). Estudio de factibilidad para el establecimiento de cultivo de nopal (opuntia) en tierras ociosas en los estados de Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato y Zacatecas con fines alimenticios, energéticos y ambientales. UAZ. 94 pp.

- Sikder, S. (2009). Accumulated heat unit and phenology of wheat cultivars as influenced by late sowing heat stress condition. *Journal of Agriculture & Rural Development*, 7(1): 59-64.
- Vidal, J. L., Budeguer, R., Alderete, G., Romero, E., Rodríguez Rey, J., Amado, M. E., & Bas Nas, S. (2010). Influencia del régimen térmico en el desarrollo foliar del pimiento (*Capsicum annuum* L.) cultivado en campo. *Horticultura Argentina*. 29(69):13-17.

## 2. EVAPOTRANSPIRACIÓN Y GRADOS DÍAS DE DESARROLLO DEL NOPAL VERDURA

Martin Azúa Barrón<sup>1</sup>, Mario Alberto Vázquez Peña<sup>2</sup>

### RESUMEN

#### Resumen

México con 48.29 por ciento del territorio con un cierto grado de aridez, el nopal es uno de los pocos cultivos que prospera. Del nopal verdura no se cuenta con investigaciones abundantes como las hay para cultivos como el maíz. En los últimos años el nopal verdura ha cobrado una importancia en diferentes ámbitos: alimenticio, industrial, económico y en la conservación de los ecosistemas entre otros. Como la mayoría de las hortalizas mexicanas el nopalito tierno tiene como destino el consumo interno y la exportación a los Estados Unidos. El objetivo de este trabajo fue recopilar información del nopal verdura en cuanto a investigaciones relacionadas al cultivo, con énfasis en evapotranspiración y los grados días de desarrollo. Con la información recopilada se evidenció la escasez de investigaciones de esta hortaliza, en la que destacan los pocos estudios de evapotranspiración y grados días de desarrollo.

**palabras clave:** nopal verdura, evapotranspiración, grados días de desarrollo

<sup>1</sup>Tesista

<sup>2</sup>Director

#### Abstract

Mexico with 48.29 percent of the territory with a certain degree of aridity is the cactus one of the few crops that thrives. Nopal vegetables do not have abundant research as there are for crops such as corn. In recent years, the nopal vegetable has gained importance in different areas: food, industrial, economic and in the conservation of ecosystems among others. Like most Mexican vegetables, the tender nopal is destined for domestic consumption and exports to the United States. The objective of this work was to compile information of the nopal vegetable in relation to research related to the crop, with emphasis on evapotranspiration and the degrees days of development. With the information gathered, there was a lack of research on this vegetable, in which the few studies of evapotranspiration and degrees days of development stand out.

**keywords:** tender cactus, evapotranspiration, degrees days of development

## 2.1. Introducción

En México según el Consejo consultivo del agua (2019) se tiene dos problemas que son: poca disponibilidad y la distribución del agua, para el primero se contabiliza menos de 5000 m<sup>3</sup> de agua por habitante por año y para el segundo la distribución geográfica del agua no coincide con la de la población. El crecimiento poblacional y económico ha ejercido una presión sobre los recursos hídricos, lo que genera conflictos en ocasiones violentos, la problemática por el agua es a diferentes niveles, desde problemas entre los usuarios de una misma comunidad, municipios, estados, hasta en las fronteras de los países (Becerra *et al.*, 2006)

Las cactáceas se encuentran distribuidas en las zonas áridas donde caracterizan el paisaje, en México por sus características particulares de latitud, orografía y climas es donde se alberga la mayor cantidad de especies (Bravo, 1978). La especie *Opuntia ficus-indica* L. es nativa de las regiones templadas semiáridas de México (Blanco *et al.*, 2011). Se conoce como nopal a los géneros *Opuntia* y *Nopalea* de la familia de las cactáceas, por lo que en México se encuentran más de 100 especies de nopales y en las zonas áridas es donde está la variedad más amplia, algunos botánicos consideran a México el origen de los nopales (CONAZA, 1994)

En México el cultivo y utilización del nopal son toda una tradición, se ha evolucionado desde nopaleras silvestres hasta la producción intensiva en micro túneles, técnica que se inició en la Universidad Autónoma Chapingo desde los años sesenta (Flores, 2001). Muchos países cultivan el nopal para aprovechar su fruta (tuna), nopalitos tiernos o nopales maduros, en México se cuenta con una superficie de 12041 ha con rendimientos variables de 9 a 100 t ha<sup>-1</sup> (Blanco *et al.*, 2011).

El objetivo fue hacer una revisión de los trabajos científicos del nopal verdura con especial atención a la evapotranspiración y grados días de desarrollo.

### 2.1.1. Importancia del nopal verdura

En las zonas áridas muchas veces es el único cultivo que prospera por las condiciones de escasez de agua que prevalecen y da una cierta seguridad a las personas que habitan las regiones áridas de México que en extensión son el 48.29 por ciento del territorio (Flores, 2002).

El nopal se ha aprovechado desde tiempos prehispánicos, cuando se apreciaba y aceptaba el nopal como alimento, y lubricante entre las ruedas y el eje de las carretas. Los franciscanos utilizaban el mucilago del nopal para amalgamar los adobes utilizados en la construcción de las misiones (CONAZA, 1994).

En cookpad (2018) página gastronómica se documentaron 332 platillos donde uno de los ingredientes principales son los nopalitos tiernos, lo que resalta su importancia como alimento humano. Se encuentra ligado a la comida mexicana del centro del país principalmente donde su oferta es abundante durante todo el año (Blanco *et al.*, 2009). Las variedades de nopal verdura tienen diferencias en acidez la que varía dependiendo si se cosechan en la mañana o en la tarde, son más ácidos los cosechados en la mañana (Corrales *et al.*, 2004)

Además de los usos como alimento humano o animal, se le han encontrado aplicaciones en la industria de cosméticos, donde se han extraído productos como: fructuosa, pectina, colorantes, etc. (Flores, 2001), bebidas, yogurt, mucilago (Sepúlveda *et al.*, 2007). En medicina se le ha encontrado propiedades al nopal, antiguamente en la curación de heridas, actualmente en el tratamiento de la diabetes, colesterol y obesidad (Luna, 2001).

Muchos países cultivan el nopal para aprovechar su fruta (tuna), nopalitos tiernos o nopales maduros, en México se cuenta con una superficie de 12,041 ha con rendimientos variables de 9 a 100 t ha<sup>-1</sup> (Blanco *et al.*, 2011). El valor de la producción de nopal verdura en México fue de 650.52 millones de pesos; en 1999, ocupó el lugar número once encima del elote, brócoli, col, lechuga y fresa (Blanco *et al.*, 2009). En el 2013 fue de 1926 millones de pesos con un incremento anual promedio de 20 % con una superficie de 13,124 ha según las estadísticas de la SAGARPA (2013).

En el 2006 se emitió la norma mexicana que se debe cumplir en el nopal verdura de los géneros *Opuntia spp* y *Nopalea spp* que se destine para el consumo humano y se comercialice en el territorio nacional (Secretaría de economía, 2006).

### **2.1.2. Exportación del nopalito**

Los Estados Unidos de América constituyen el principal mercado del nopalito tierno y las cantidades exportadas crecen significativamente. El mercado canadiense está en segundo lugar, especialmente en nopalito procesado (Flores *et al.*, 1995). También se exporta a

Centroamérica, Sudamérica y algunos países asiáticos, pero en cantidades menores (Saravia, 2002). En la exportación de nopal México tiene dos grandes competidores que son Brasil y China, por el momento China destina su producción de nopal para la industria cosmética y farmacéutica y Brasil cubre la exportación de nopal para forraje (Pedrero, 2018).

### **2.1.3. Principales variedades cultivadas en México**

Flores *et al.* (1995) mencionan que las principales variedades que se cultivan en México son: Milpa alta (Distrito Federal), Atlixco (Puebla y Estado de México), Copena V1 (Baja California, San Luis Potosí), Copena F1 (Sonora, Baja California, Estado de México), Moradilla (México).

### **2.1.4. Trabajos realizados sobre el nopal verdura**

Aun cuando en los últimos años el cultivo del nopal ha recibido atención por parte de los investigadores, los estudios del nopal verdura son pocos, en comparación a los que han realizado a los granos y los cereales (Orona *et al.*, 2004). El INIFAP generó un folleto para productores para divulgar información de la producción intensiva de nopal verdura (Luna, 2001). La densidad de plantación ha sido estudiada para ciertos cultivares de nopal verdura donde se utilizaron las siguientes densidades: 30,000, 60,000 y 90,000 plantas por hectárea, la de 90,000 fue la mejor en cuanto a producción, lo que sugiere que mayores densidades conducen a mejores resultados (Ruiz *et al.*, 2008).

Una revisión sobre la biología reproductiva del nopal en la que se presentan los aspectos y estrategias reproductivas que han hecho esta planta tan exitosa, su éxito ecológico y evolutivo en parte se atribuye a su asociación a animales durante su reproducción (Reyes *et al.*, 2006).

La producción de nopal verdura en invernadero es una actividad rentable con una relación beneficio costo de 1.15 (Ramírez *et al.*, 2012). Los precios nominales promedio del nopalito se incrementaron de \$ 1.83 en 1989 a \$2.67 en 1995 (Flores *et al.*, 1995). Hoy en día el precio promedio al consumidor es de \$10.00 y en ocasiones en los meses de octubre a enero alcanza precios mayores.

### **2.1.5. Fertilización del nopal verdura**

Salazar *et al.* (2003) indican que el nopal responde a la aplicación de abonos orgánicos e inorgánicos, por su parte Zúñiga *et al.* (2009) encontraron que la aplicación de fertilizantes de origen animal o mineral tiene un efecto en el desarrollo radicular del cultivo. Algunos trabajos con la fertilización orgánica y mineral en nopal son: Orúe *et al.* (2008) que recomiendan una dosis de fertilización que promueve la brotación de nopalitas (12-15-10), si se utiliza combinada con dos kilogramos de composta por planta; Ríos y Quintana, (2004) hacen recomendaciones de 8 kg de abono animal por planta para terrenos con tepetate y poco profundos complementados con 50 g de superfosfato de calcio simple; Robles *et al.* (2008) para Caborca Sonora de 50 a 100 t de estiércol por ha. En cuanto a fertilización inorgánica la más adecuada es 60-80-80 en el Orito Zacatecas (Valdez *et al.*, 2003). Orona *et al.* (2004) encontró que hay una correlación significativa entre las variables temperatura, producción y extracción mineral, lo que significa que son factores importantes a considerar si se quiere incrementar la producción del cultivo.

### **2.1.6. Estudios con respecto a los requerimientos hídricos del nopal**

Las estrategias del nopal para adaptarse a las condiciones de las zonas áridas son: succulencia, elaboración de mucilagos y sustancias higroscópicas a partir de ácidos orgánicos, la superficie foliar al ser planas y discoideas son los cuerpos más eficientes para evitar la evapotranspiración, la savia viscosa para cerrar las heridas de la planta y sobre todo el metabolismo ácido de las crasuláceas (Becerra, 1994).

El nopal verdura tiene una ventaja fisiológica con respecto a los cultivos tradicionales, su alta eficiencia del uso del agua del orden de 1 kg de materia seca por 162 kilos de agua (Han y Felker, 1997)

Orona *et al.* (2003) en un estudio evaluaron cuatro variedades de nopal, a campo abierto y con riego por goteo. Se regaron con láminas equivalentes al 30, 45 y 60 por ciento de la evaporación del lugar, encontraron que la mejor lámina es el 30 % de la evaporación del tanque Tipo A. Cuando el nopal tiene aplicaciones excesivas de agua, es afectado por los hongos y las bacterias. Flores *et al.* (2005) no encontró diferencias significativas en brotes si se aplica 45 o 65 % del tanque tipo A.

Los trabajos en hidroponía del nopal verdura son con la finalidad de: desarrollar una producción intensiva con un mayor número de cortes al año, reducir al mínimo el desperdicio de agua y nutrientes (Vázquez, *et al.*, 2010). Calderón *et al.* (1997) indican que una CE de  $2 \text{ mS cm}^{-1}$  es adecuada para el nopal verdura y que una CE mayor a 2.0 abate el crecimiento de materia seca y la extracción nutrimental de la planta.

### **2.1.7. Trabajos que involucran GDD en nopal verdura**

El efecto de la temperatura en el funcionamiento de las plantas es a través de la acción en la actividad enzimática, bajo cierta temperatura la proteína enzimática no es lo suficiente flexible y no adquiere la conformación requerida para la reacción y a temperaturas mayores a cierto umbral la enzima coagula y la nueva estructura obtenida no es capaz de catalizar la reacción (Bonhomme, 2000).

El concepto de grados días se originó con las observaciones realizadas por Reamur en 1735, en las que notó que el desarrollo de las plantas estaba más relacionado a la temperatura y el tiempo transcurrido de una etapa a otra, que al tiempo por sí mismo (Neild y Seeley, 1977). La medición de los grados días de desarrollo es con base en el principio que el crecimiento y desarrollo de las plantas está ligado a la temperatura y solo ocurre dentro de ciertos límites.

Las temperaturas son determinantes en la distribución geográficas y adaptación de las plantas, en nopal se realizó un estudio tendiente a buscar más resistencia a las bajas temperaturas con la inyección en los tejidos de sustancias como glucosa y methylglucosa (Nobel *et al.*, 1995).

Flores *et al.* (2005) encontraron evidencias de la influencia de la temperatura en la brotación de nopalitos tiernos. Almaguer *et al.* (2014) indica que el peso fresco en promedio aumenta  $0.0078 \text{ kg m}^{-2}$  en una plantación de la Variedad "Villanueva" con 16 plantas por  $\text{m}^2$ , también encontró que la temperatura del aire expresada como GDD calculados con el método residual con una temperatura base de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  y la materia seca y fresca se relacionan cuadráticamente con coeficientes de determinación mayores a 0.8, los modelos representan una herramienta en la toma de decisiones de inversión para estimar la respuesta del nopal verdura en módulos de producción cercanos a Marín, Nuevo León.

## 2.2. Balance de agua en el suelo

La ecuación general del balance hídrico en el sistema planta-suelo-atmósfera es (Allen *et al.*, 2006):

$$ET = R + P - ES - D + C \pm \Delta FS \pm \Delta SW \quad (2.1)$$

Donde: ET la evapotranspiración real del cultivo (mm); R lámina de agua aplicada mediante riego (mm); P es la precipitación ocurrida durante el periodo de medición (mm); ES escurrimiento superficial (mm); D percolación profunda (mm); C agua transportada a la superficie por capilaridad (mm) y  $\Delta FS$  agua transferida horizontalmente por flujo subsuperficial hacia adentro o hacia afuera (mm) y  $\Delta SW$  variación en el contenido de humedad en el suelo (mm).

Los flujos de agua que corresponden a los aportados por: capilaridad, percolación profunda y flujo subsuperficial son difíciles de medir y para periodos cortos de tiempo no se consideran (Allen *et al.*, 2006). La fórmula de balance se simplifica y más usada es:

$$ET = R + P - ES \pm \Delta SW \quad (2.2)$$

Para un cultivo la  $ET = ET_c$ , y la  $ET_c$  se relaciona con la  $ET_o$  de acuerdo a la siguiente Ecuación:

$$ET_c = K_c ET_o \quad (2.3)$$

Donde:  $K_c$  es el coeficiente del cultivo en función de las características *anatómicas* y fisiológicas (adimensional) y  $ET_o$  es la evapotranspiración de referencia (mm).

## 2.3. Balance de energía

En un balance se deben considerar todos los flujos (Allen *et al.*, 2006)

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0 \quad (2.4)$$

Donde:  $R_n$  es la radiación solar neta ( $MJm^{-1}dia^{-1}$ ),  $H$  es el calor sensible ( $MJm^{-1}dia^{-1}$ ),  $G$  es el flujo de calor del suelo ( $MJm^{-1}dia^{-1}$ ), y  $\lambda ET$  es el flujo de calor latente ( $MJm^{-1}dia^{-1}$ ). Los distintos términos pueden ser positivos o negativos. Cuando  $R_n$  es positiva, proporciona energía a la superficie y cuando  $G$ ,  $\lambda ET$  y  $H$  son positivos retiran energía de la superficie.

En la Ecuación (2.4) no se incluyen la tasa neta de energía que se transfiere horizontalmente por advección, el calor almacenado y liberado de la planta y la energía utilizada en actividades metabólicas. La suma de estos es una fracción de la radiación neta por lo que se considera despreciable.

El flujo de calor latente (Ecuación 2.5) representa la fracción que se puede derivar, si se conoce el resto de las variables de la Ecuación 2.4.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (2.5)$$

La radiación neta es (Gordillo *et al.*, 2014):

$$R_n = R_s - \alpha R_s + RL_i - RL_o - (1 - \varepsilon_0)RL \quad (2.6)$$

Donde:  $R_s$  es la radiación solar ( $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ); es decir, la radiación de onda corta que llega a la superficie;  $\alpha$  es el albedo de la superficie (adimensional);  $RL_i$  es la radiación de onda larga que llega a la superficie ( $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ );  $RL_o$  es la radiación de onda larga que sale de la superficie ( $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) y  $\varepsilon_0$  es la emisividad térmica de la superficie (adimensional).

Se han propuesto ecuaciones para estimar el valor de G:

$$\frac{G}{R_n} = 0.05 + 0.18 e^{-0.521LAI} \quad LAI \geq 0.5 \quad (2.7)$$

$$\frac{G}{R_n} = 1.8 \frac{(T_s - 273.16)}{R_n} + 0.084 \quad LAI \geq 0.5 \quad (2.8)$$

Donde: LAI es el índice de área foliar (adimensional);  $T_s$  es la temperatura de la superficie ( $^{\circ}\text{K}$ )

La determinación de H es compleja y requiere de mediciones precisas de gradientes de temperatura por encima de la superficie evaporante.

Una expresión en función del gradiente para estimar el flujo de calor sensible:

$$H = 0.0864 \frac{\rho_{air} C_p dT}{r_a} \quad (2.9)$$

Donde: H es el flujo de calor sensible ( $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ )  $\rho_{air}$  es la densidad del aire ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $C_p$  es el calor específico del aire a presión constante ( $1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ); dT es la diferencia de temperatura (K) entre dos alturas cercanas a la superficie,  $z_1$  y  $z_2$  (generalmente 0.1 y 2 m);  $r_a$  es la resistencia aerodinámica al transporte de calor ( $\text{s m}^{-1}$ ).

## 2.4. Evapotranspiración

La evapotranspiración es la suma de dos procesos separados: la evaporación por el que el agua líquida se convierte en vapor de agua y se retira de la superficie evaporante; y la transpiración es la vaporización del agua líquida contenida en los tejidos y su posterior remoción hacia la atmósfera (Allen *et al.*, 2006). Para medir la evapotranspiración se requiere de aparatos especiales y de mediciones precisas de los parámetros físicos o del balance de agua en el suelo mediante lisímetros. Para medir la ET suele ser en general cara y requiere de personal altamente capacitado, por lo que los métodos directos suelen ser útiles en la evaluación de las estimaciones de los métodos indirectos (Allen *et al.*, 2006).

La evapotranspiración del cultivo se determina con dos tipos de métodos: directos (miden) e indirectos (estiman). Los primeros son micro meteorológicos (sistemas Bowen y flujo turbulento) y de balance hídrico (lisímetro de pesada). Los segundos calculan la ETo con un balance de energía (modelos empíricos).

El término evapotranspiración de referencia se define como la cantidad de agua evapotranspirada por un cultivo de referencia como el pasto con una altura de 0.12 m, con una resistencia de la superficie de  $70 \text{ s m}^{-1}$  y un albedo de 0.23, muy parecida a la evaporación de una superficie de pasto de altura uniforme y que crece activamente, que sombrea la superficie del suelo y sin limitantes de agua, (Allen *et al.*, 2006).

En 1990 se reunieron un grupo de expertos, quienes recomendaron el método de Penman-Monteith como el estándar para la definición y el cálculo de la ETo. La mayoría de los diferentes efectos climáticos se incorporan en el cálculo de la ETo, por lo que representa un indicador de la demanda climática, para la ETc de un cultivo en particular la ETo se multiplica por el coeficiente de cultivo, que depende de las características de este (Allen *et al.*, 2006).

## 2.5. Ecuación de Penman-Monteith

En 1948, Penman combinó el balance energético con el método de transferencia de masa y derivó una ecuación para calcular la evaporación de una superficie abierta:

$$\Delta ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad (2.10)$$

Donde:  $R_n$  es la radiación neta ( $\text{MJm}^{-1}\text{dia}^{-1}$ ),  $G$  es el flujo del calor en el suelo ( $\text{MJm}^{-1}\text{dia}^{-1}$ ),  $(e_s - e_a)$  representa el déficit de presión de vapor del aire (kPa),  $\rho_a$  es la densidad media del aire a presión constante ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $C_p$  es el calor específico del aire ( $\text{MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $\Delta$  representa la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $\gamma$  es la constante psicométrica ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ), y  $r_s$  ( $\text{s m}^{-1}$ ) y  $r_a$  ( $\text{s m}^{-1}$ ) son las resistencias superficiales (total) y aerodinámica.

A la que le hicieron modificaciones para adaptarla a las características de un cultivo hipotético de referencia. Aquí se hace un resumen de la deducción, los detalles se presentan en el boletín 56 de la FAO (Allen *et al.*, 2006)

$$r_a = \frac{\ln(\frac{z_m - d}{z_{om}}) \ln(\frac{z_h - d}{z_{oh}})}{K^2 U_z} \quad (2.11)$$

Donde:  $r_a$  es resistencia aerodinámica ( $\text{s m}^{-1}$ ),  $z_m$  la altura de medición del viento (m),  $z_h$  la altura de medición de la humedad (m),  $d$  el plano de altura de desplazamiento cero (m),  $z_{om}$  la longitud de la rugosidad que gobierna la transferencia del momentum (m),  $z_{oh}$  la longitud de la rugosidad que gobierna la transferencia de calor y vapor de agua (m),  $k$  la constante de Von Karman, 0.41 y  $u_z$  velocidad del viento a la altura  $z$  ( $\text{m s}^{-1}$ ).

Al sustituir:  $d = 2/3 h$ ,  $z_{om} = 0.123 h$  y con  $z_{oh} = 0.1 z_{om} z_m = z_h = 2 \text{ m}$  y  $h=0.12 \text{ m}$  en la Ecuación 2.11) queda:

$$r_a = \frac{208}{U_z} \quad (2.12)$$

Donde:  $U_z$  es la velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ ) a 2 m de altura.

$$r_s = \frac{r_1}{IAF_{activo}} \quad (2.13)$$

Donde:  $r_s$  resistencia superficial (total) ( $s\ m^{-1}$ ),  $r_1$  resistencia estomática total de una hoja bien iluminada ( $100\ s\ m^{-1}$ ),  $IAF_{activo}$  índice activo de área foliar ( $m^2$  (área de la hoja)  $m^{-2}$  (superficie del suelo)).

$$IAF_{activo}=0.5\ IAF\ y\ IAF = 24\ h$$

Donde:  $h$  es la altura del cultivo en (m)

Al sustituir en Ecuación (2.13)  $r_s$  queda:

$$r_s=70\ s\ m^{-1} \quad (2.14)$$

$$\text{Al ser } C_p = \frac{\gamma \xi \lambda}{P}, \rho_a = \frac{P}{T_{kv} R}, T_{kv} = 1.01(T + 2.73)$$

Donde:  $\xi = 0.622$  (adimensional),  $\lambda = 2.45$  ( $MJ\ kg^{-1}$ ),  $R = 0.287$  constante universal de los gases ( $kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$ ),  $T$  temperatura del aire ( $^{\circ}C$ ),  $P$  presión atmosférica en (kPa) y al multiplicar por 86400 que son los segundos de un día.

el término  $\frac{\rho_a C_p}{r_a}$  de la ecuación 2.10) queda:

$$\frac{\rho_a C_p}{r_a} = \gamma \lambda \frac{900 * U_2}{T + 273} \quad (MJ\ m^{-2}\ ^{\circ}C^{-1}\ dia^{-1}) \quad (2.15)$$

Al sustituir y simplificar la ecuación para el cálculo de la  $ET_o$  de Penman-Monteith queda:

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (2.16)$$

Donde:  $ET_o$  es la evapotranspiración de referencia ( $mm\ d^{-1}$ ),  $Rn$  la radiación neta en la superficie del cultivo ( $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ ),  $Ra$  la radiación extraterrestre ( $mm\ d^{-1}$ ),  $G$  el flujo del calor de suelo ( $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ ),  $T$  temperatura media del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}C$ ),  $u_2$  velocidad del viento a 2 m de altura ( $m\ s^{-1}$ ),  $e_s$  presión de vapor de agua a saturación (kPa),  $e_a$  presión real de vapor de agua (kPa),  $(e_s - e_a)$  el déficit de presión de vapor de agua (kPa),  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor en función de la temperatura ( $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$ )

Y constante psicométrica ( $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$ ).

## 2.6. Métodos indirectos para estimar la ETo y su clasificación

Se han propuesto diferentes métodos, con base en temperatura y en radiación, en el Cuadro 2.1 se presenta una breve recopilación de ellos.

Cuadro 2.1. Modelos de evapotranspiración

Modelo	Referencia	Formula	Variables
<b>Con base en Temperatura</b>			
<i>Baier-Robertson</i>	Baier and Robertson (1965)	$ET_o = 0.157 * T_{max} + 0.158(TD) + 0.109 * Ra - 5.39$	Tmax,TD,Ra
<i>Romanenko</i>	Romanenko (1961)	$ET_o = 0.00006 * (T_{med} + 25)^2 (100 - HR)$	Tmed, e <sub>s</sub> , e <sub>a</sub> , HR
<i>Ravazzani</i>	Ravazzani <i>et al.</i> (2012)	$ET_o = 2.45 * (0.817 + 0.00022Z)0.0023 Ra(T_{med} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5}$	Ra, Tmed, Tmax, Tmin
<i>Hargreaves</i>	Hargreaves y Samani, 1985	$ET_o = 0.0023 * Ra (T_{med} + 17.8) (T_{max} - T_{min})^2$	Ra,Tmed,Tmax,Tmin
<i>Modified Hargreaves</i>	Berti <i>et al.</i> (2014)	$ET_o = 2.45 * 0.00193 Ra(T_{med} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.517}$	Ra, Tmed, Tmax, Tmin
<i>Trajkovic</i>	Trajkovic (2007)	$ET_o = 2.45 * 0.0023 Ra(T_{med} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.424}$	Ra, Tmed, Tmax, Tmin
<b>Con base en Radiación</b>			
<i>Turc</i>	Turc (1961)	$ET_o = (0.3107 R_s + 0.65) \left( \frac{T_1}{T_{med} * 15} \right)$	R <sub>s</sub> , Tmed, T <sub>1</sub>
<i>Abtew</i>	Abtew (1996)	$ET_o = 0.408 + 0.01786 R_s T_{max}$	R <sub>s</sub> , T <sub>max</sub>
<i>FAO24-Radiation</i>	Doorenbos and Pruitt (1977)	$ET_o = a + b \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_s \right]$	R <sub>s</sub> , Δ
<i>Jensen-Haise</i>	Jensen-Haise (1963)	$ET_o = 0.4081 * R_s (0.025 T_{med} + 0.08)$	R <sub>s</sub> ,Tmed
<i>Caprio</i>	Caprio (1974)	$ET_o = (0.01092708 T_{med} + 0.0060706) R_s$	Tmed, R <sub>s</sub>
<i>Irmak</i>	Irmak <i>et al.</i> (2003)	$ET_o = 0.149 R_s + 0.079 * T_{med} - 0.611$	R <sub>s</sub> , Tmed
<i>Stephen</i>	Stephen (1965)	$ET_o = 0.408(0.0158 * T_{med} + 0.09)R_s$	R <sub>s</sub> , Tmed
<i>Priestley-Taylor</i>	Priestley-Taylor (1972)	$ET_o = 0.408 \left( 1.26 \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (R_n - G) \right)$	Δ, γ, R <sub>n</sub> , G
<i>Ritchie (RT)</i>	Jones and Ritchie (1990)	$ET_o = R_s \alpha [0.002322 T_{max} + 0.001548 T_{min} + 0.11223]$	R <sub>s</sub> , α, T <sub>max</sub> , T <sub>min</sub>
<i>Makkink</i>	Makkink (1957)	$ET_o = 0.408 * 0.61 \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_s - 0.12$	Δ, γ, R <sub>s</sub>
<i>McGuinness-Bordne (MGB)</i>	McGuinness and Bordne (1972)	$ET_o = (0.005 T - .0838) R_s$	T, R <sub>s</sub>

ETo es la evapotranspiración de referencia en (mm d<sup>-1</sup>), Tmed la temperatura media (°C), Tmax es la temperatura máxima (°C), Tmin la temperatura mínima (°C), TD es la oscilación térmica (°C), HR la humedad Relativa en (%), e<sub>s</sub> la presión de vapor a saturación (kP) e<sub>a</sub> la presión de vapor actual (kP), Δ es la pendiente de la curva de presión a saturación, γ es la constante psicrométrica, Ra es la radiación solar extraterrestre en MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, R<sub>s</sub> es la radiación solar en MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, R<sub>n</sub> es la radiación neta en MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, G es flujo de calor en el suelo (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) y T<sub>1</sub>, α, a, b son coeficientes empíricos.

## 2.7. Grados días de desarrollo

El desarrollo se refiere al tiempo de eventos críticos en el ciclo de vida de la planta y crecimiento se refiere al incremento en biomasa (Ritchie and NeSmith, 1991). En el crecimiento y desarrollo de las plantas, los investigadores han encontrado que la temperatura del aire es un factor determinante. Para predecir el crecimiento de los cultivos con la temperatura del aire, es muy utilizado el concepto de grados días de desarrollo o un sistema similar (Madariaga and Knott, 1951; Hoover, 1955; Gilmore and Rogers, 1958; Hortik and Arnold, 1965).

### 2.7.1. Aspectos teóricos de los grados días de desarrollo

Los modelos de desarrollo dependientes de la temperatura, describen el progreso hacia un desarrollo objetivo, como en el caso de completar una etapa fenológica. Ecuaciones (2.17 a 2.23) son detalladas por Moore y Remais (2014).

Si  $\frac{1}{d}$  es la tasa de desarrollo ( $d^{-1}$ ) y está en función de la temperatura  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ). la ganancia de desarrollo  $D$  está dada por:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{1}{d}(T) \quad (2.17)$$

El completar el desarrollo está dado en el transcurso de un tiempo  $t_1$  a  $t_2$

$$D = \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{d}(T(t)) dt \quad (2.18)$$

Se estandariza a que  $D=0$  cuando inicia el desarrollo y  $D=1$  cuando se completa.

Como  $\frac{1}{d}(T)$  no es constante en todo el rango de temperaturas observadas durante el desarrollo, entonces:

$$\frac{1}{d}(T) = f(T, T_b, T_o, T_u) \quad (2.19)$$

Donde:  $T$  es la temperatura observada,  $T_b$  es la temperatura base,  $T_o$  es la temperatura óptima y  $T_u$  es la temperatura umbral máxima; todas expresadas en  $^{\circ}\text{C}$ .

Usualmente los modelos de GDD expresan la tasa de ganancia como una función lineal:

$$\frac{1}{d} = \begin{cases} \frac{T}{GDD} - \frac{T_b}{GDD}, & T_b < T(t) < T_u \\ 0, & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (2.20)$$

$$D(t) = \begin{cases} \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{T}{GDD} - \frac{T_b}{GDD} \right) dt, & T_b < T(t) < T_u \\ 0, & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (2.21)$$

Los grados días de desarrollo (GDD) dependen de la especie y del desarrollo objetivo y para este caso particular

$$GDD * D(t) = \int_{t_1}^{t_2} (T - T_b) dt \quad (2.22)$$

Cuando se llegue del t1 al t2 entonces D(t)=1, y los GDD

$$GDD = \int_{t_1}^{t_2} (T - T_b) dt \quad (2.23)$$

En términos generales:

$$GDD = \int_{t_1}^{t_2} (T(t)) dt \quad (2.24)$$

Donde:

$$T(t) = \begin{cases} T(t) - T_b, & \text{si } T_b < T(t) < T_u \\ T_u - T_b, & \text{si } T_u < T(t) \\ 0, & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (2.25)$$

### 2.7.2. Métodos para el cálculo de las temperaturas base, umbral máxima y óptima

Para la aplicación del método de GDD la selección adecuada de la temperatura base es fundamental, en la literatura se reportan varios métodos de los que se hace una

recopilación y descripción. También se presenta ecuaciones para determinar tanto la temperatura óptima como la temperatura umbral máxima.

**a) Mínima desviación estándar en grados**

Con datos de varias etapas y en base a la Ecuación (2.26)

$$SD_{gdd} = \frac{\sum_{i=1}^n (GDD_i - MGDD)^2}{n - 1} \tag{2.26}$$

Donde:  $SD_{gdd}$  es la mínima desviación estándar en grados días de desarrollo,  $GDD_i$  son los grados días de desarrollo de la repetición  $i$ ,  $MGDD$  es el promedio de los  $GDD_i$  obtenidos con la  $T_{bi}$ ,  $n$  es el número de repeticiones utilizadas.

Este método se utiliza para determinar la  $T_b$ , se proponen diferentes valores hasta encontrar el que genere el mínimo valor de  $SD_{gdd}$ , el valor corresponde a la  $T_b$  de la etapa del cultivo.

Yang *et al.*(1995) derivó la Ecuación (2.27) para el cálculo de  $T_b$  en la que evita proponer diferentes valores de temperatura candidatos a ser  $T_b$ :

$$T_b = \frac{\sum_1^n Tm_i d_i \sum_1^n d_i - n \sum_1^n Tm_i d_i^2}{(\sum_1^n d_i)^2 - n \sum_1^n d_i^2} \tag{2.27}$$

Donde:  $T_b$  es la temperatura base en (°C)  $Tm_i$  es la temperatura promedio de la repetición  $i$  (°C), y  $d_i$  es la duración de la etapa  $i$  (d).

**b) El método de los coeficientes de regresión**

Método para determinar el valor de la  $T_b$  y se basa en las Ecuaciones (2.28 y 2.29)

$$GDD_i = a + b * T_i \tag{2.28}$$

$$GDD_i = (T_i - T_b) * d_i \tag{2.29}$$

Donde:  $a$  y  $b$  son coeficientes de regresión,  $T_i$  es la temperatura media de la repetición  $i$ , y  $GDD_i$  son los grados días de desarrollo obtenidos en la repetición  $i$ .

En este método (Ecuaciones 2.28 y 2.29), la variable independiente es la temperatura media de la etapa fenológica ( $T_i$ ) y la variable dependiente es los grados días de desarrollo ( $GDD_i$ ). La  $T_b$  propuesta que corresponda al coeficiente de regresión ( $b$ ) más cercano a cero o cero, es la  $T_b$  (Yang *et al.*, 1995).

De acuerdo con Yang *et al.* (1995) la Ecuación (2.30) permite determinar el valor de  $T_b$  es:

$$T_b = \frac{\sum_1^n T m_i \sum_1^n T m_i d_i - n \sum_1^n d_i T m_i^2}{\sum_1^n d_i \sum_1^n T m_i - n \sum_1^n d_i T m_i} \quad (2.30)$$

### **c) Método de Arnold (Arnold, 1959)**

Basado en las Ecuaciones:

$$\frac{1}{d_i} = a + b * T_i \quad (2.31)$$

Donde:  $d_i$  es el número de días de la etapa fenológica de la repetición  $i$ ,  $a$  y  $b$  son coeficientes de regresión, y  $T_i$  es la temperatura media observada durante la etapa fenológica de la repetición  $i$ .

En el método de la Ecuación 2.31),  $\frac{1}{d}$  es la tasa de desarrollo, por lo que cuando:  $\frac{1}{d} = 0$ , la  $T_b$  es:

$$T_b = -\frac{a}{b} \quad (2.32)$$

Donde:  $T_b$  es la temperatura base.

Este método requiere al menos tres repeticiones en el que los datos en su diagrama de dispersión muestren tendencia ascendente, por lo que se utiliza pares de temperaturas medias y tasas de desarrollo en el rango sub óptimo y óptimo.

### **d) Modelo curvilíneo de temperatura**

Descrito por Robertson (1983) es con base en la ecuación cuadrática siguiente:

$$\frac{1}{d} = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 T^2 \quad (2.33)$$

Donde:  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  son coeficientes de la regresión cuadrática.

Donde la temperatura base se calcula con la expresión:

$$Tb = \frac{\beta_1 + (\beta_1^2 - 4\beta_0\beta_2)^{0.5}}{2\beta_2} \quad (2.34)$$

La temperatura óptima es:

$$T_o = \frac{-\beta_1}{2\beta_2} \quad (2.35)$$

y la temperatura umbral máxima se obtiene con:

$$T_u = \frac{\ln(2C^{T_o} - C^{T_b})}{\ln C} \quad (2.36)$$

Donde: C es una constante de 1.15

En este método se utilizan pares ordenados de valores en los que el valor independiente es la temperatura y la relación  $1/d$  es el dependiente, se ajustan los datos al modelo de la Ecuación 2.33 y una vez determinados los valores de los  $\beta$ s con las Ecuaciones (2.34 a 2.36) se determina las temperaturas  $T_b$ ,  $T_o$  y  $T_u$ .

### 2.7.3. Métodos de cálculo de los grados días de desarrollo

Se describen tres métodos que son ampliamente utilizados.

#### a) Método residual

Es el más usado (Ortiz, 2011) y utiliza solo el umbral mínimo para el cálculo de los GDD de acuerdo a la siguiente expresión:

$$GDD = \sum_{i=1}^n (T_i - T_b) \quad (2.37)$$

Donde: GDD son los grados días de desarrollo ( $^{\circ}$  D),  $T_i$  es la temperatura media de cada día que dura la etapa fenológica ( $^{\circ}$ C),  $T_b$  es la temperatura base ( $^{\circ}$ C) y  $n$  el número de días de la etapa fenológica.

**b) Método seno simple**

Este método ajusta la función seno a las temperaturas mínimas y máxima diarias, se han corregido errores encontrados en otros métodos que utilizan umbrales máximos y mínimos. Las fórmulas y los detalles de la aplicación de este método se presentan por la Universidad de California Agricultural y Natural Resources UCANR (2018).

Durante los días que dura la etapa fenológica, se calcula el área con base en los datos de temperaturas máxima, mínima y las temperaturas umbrales, que corresponde a los grados días de desarrollo diarios. Al sumar los resultados parciales se obtiene los grados días de desarrollo de la etapa fenológica. En el cálculo de los GDD para cada día con este método se presentan seis posibles casos los que se esquematizan en la Figura 2.1.

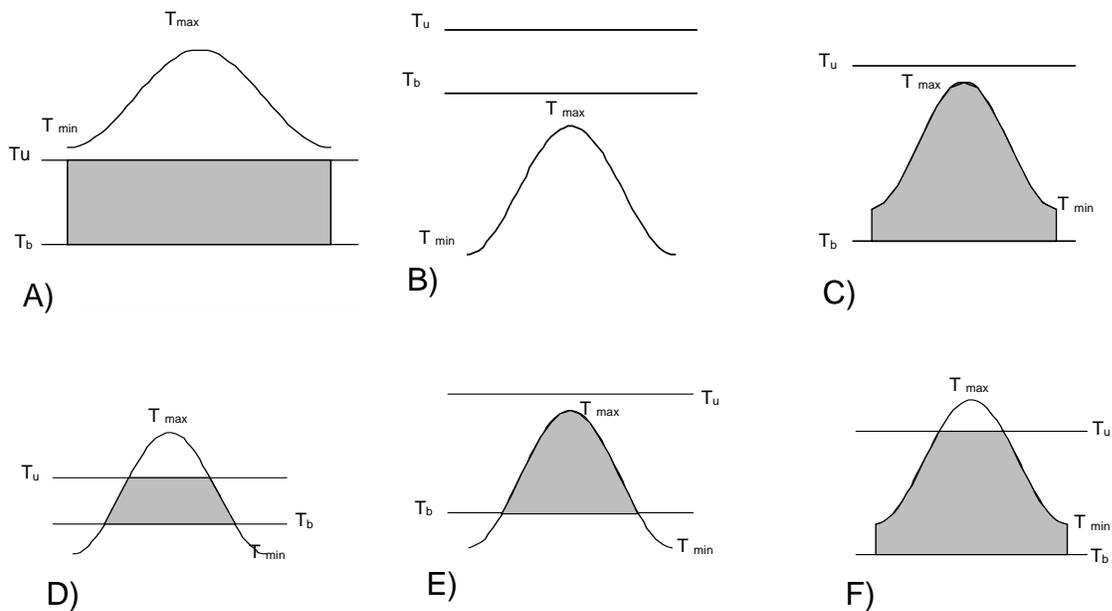


Figura 2.1. Esquematación del cálculo de los grados días de desarrollo con el método de seno simple, las  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ,  $T_u$ ,  $T_b$  corresponden a las temperaturas máxima, mínima, umbral máxima y base. Las fórmulas para cada caso ver en UCANR (2018).

Cuando la curva de temperaturas supera el valor de la  $T_o$ , Liu *et al.* (1997) proponen calcular los grados días de desarrollo de acuerdo a las áreas sombreadas que se muestran

en la figura 2.2. En las que se asume, que cuando lo anterior sucede en la acumulación de los GDD se debe descontar una cierta cantidad por concepto de estrés de la planta es en ocasiones la acumulación diaria de los GDD de cero como en la Figura 2.2 e), esta manera de acumular el tiempo térmico los autores indican que es la más adecuada.

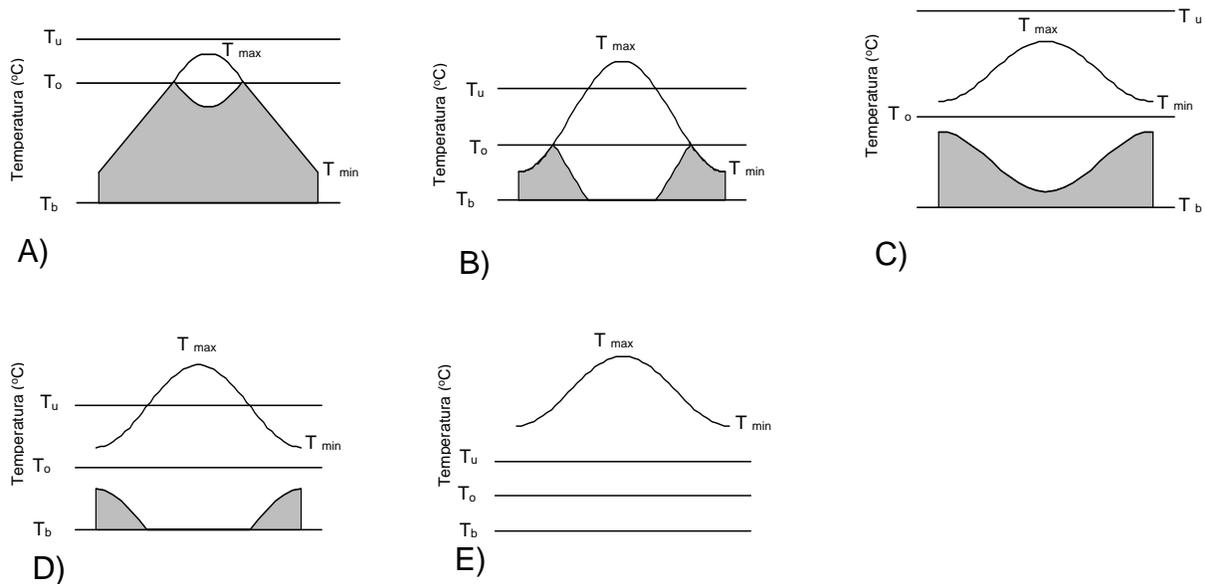


Figura 2.2. Propuesta del cálculo de los GDD de desarrollo de Liu *et al.* (1997), las  $T_{max}$ ,  $T_o$ ,  $T_{min}$ ,  $T_u$ ,  $T_b$  corresponden a las temperaturas máxima, óptima, mínima, umbral máxima y base en donde si la curva de temperaturas supera la  $T_o$  se descuenta una cierta área por concepto de los efectos adversos de estrés por altas temperaturas en la planta. Esquema tomado de Liu *et al.* (1997)

### c) Método triángulo simple

Este método simula una curva de temperatura durante un período de 24 horas. El triángulo se ajusta a las temperaturas mínimas y máximas durante un día, supone que las temperaturas son simétricas alrededor de la temperatura máxima. Los GDD son el valor del área bajo las líneas del triángulo y entre los umbrales. Las fórmulas y los detalles del método se presentan por la Universidad de California Agricultural y Natural Resources (2018).

Se calculan los grados días de desarrollo con datos diarios para cada día durante el periodo que dura la etapa fenológica. Al final se suman los datos diarios para obtener el total de grados días de desarrollo para la etapa. En este método en la determinación de los GDD diarios se presentan 6 casos posibles que se esquematizan en la Figura 2.3.

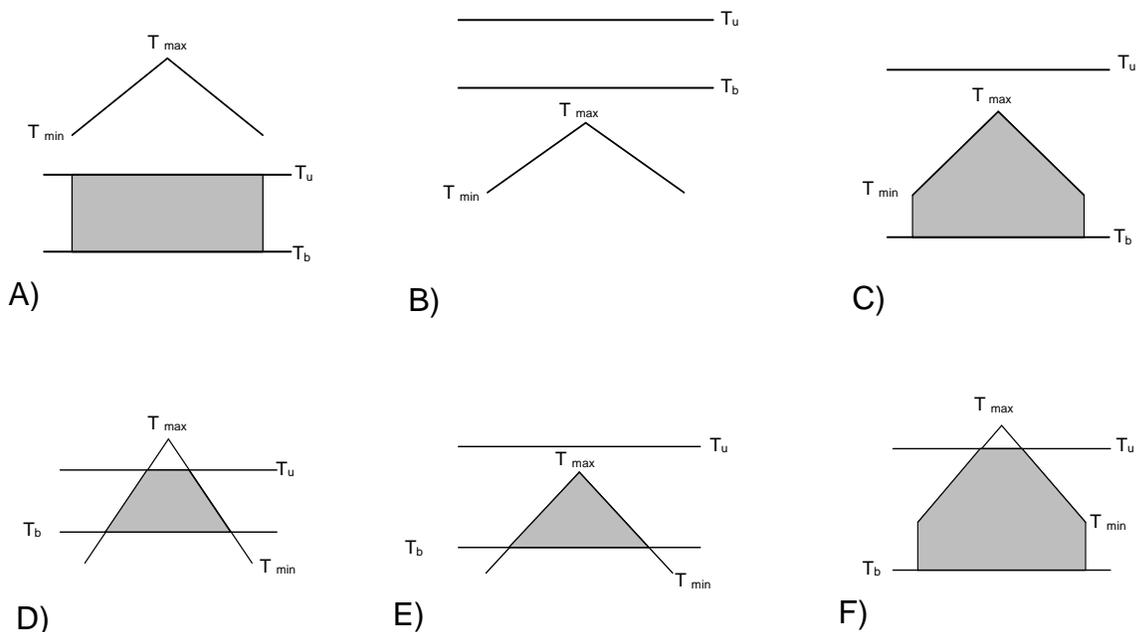


Figura 2.3. Esquematación del cálculo de los grados días de desarrollo con el método de triangulo simple, las  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ,  $T_u$ ,  $T_b$  corresponden a las temperaturas máxima, mínima, umbral máxima y base. Las fórmulas para cada caso ver en UCANR (2018)

La Universidad de California para el cálculo de los grados días de desarrollo en su página (<http://ipm.ucanr.edu/WEATHER/index.html>) hay un algoritmo online que está disponible al público de manera gratuita, se pueden calcular los grados días de desarrollo con los métodos: seno simple, seno doble, triangulo simple, triangulo doble y el método residual.

## 2.8. Conclusiones

La importancia y aprovechamiento del nopal verdura para los mexicanos viene desde los tiempos prehispánicos y por su resistencia a las sequias es un cultivo apropiado para las zonas áridas que en nuestro país son 48.29 por ciento del territorio.

El nopal verdura es un cultivo poco estudiado, los trabajos de evapotranspiración detallados son escasos y solo se han hecho cuantificaciones de los requerimientos de agua de la planta en términos de un porcentaje de la evaporación del lugar.

No hay tantos estudios detallados en nuestro país para el cultivo del nopal de los grados días de desarrollo en los que se incluya las temperaturas cardinales tanto la base como el umbral máximo. En los pocos trabajos que se han realizado se ha utilizado la temperatura base con un valor de 10 °C con el método residual.

## 2.9. Literatura citada

- Abtew, W. (1996). Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in South Florida. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 32(3): 465-473.
- Allen, R. G. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Vol. 56). Food & Agriculture Org
- Almaguer-Sierra, P., Rodríguez-Fuentes, Vidales-Contreras, J. A.H., Valdez, C. R. D., Aranda, R. J. Barrientos Lozano, L., Rodríguez, O. J. C. (2011). Estimación de Grados-Día Necesarios para Producción Comercial de Nopal Verdura (*Opuntia ficus-indica* L.). *RESPYN Revista Salud Pública y Nutrición* Edición Especial No. 5:261-264.
- Almaguer-Sierra, P., Rodríguez-Fuentes, H., Barrientos Lozano, L., Mora Ravelo, S. G., & Vidales-Contreras, J. A. (2014). Relación entre grados-día y la producción de *Opuntia ficus-indica* para consumo humano en Marín, Nuevo León. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(6): 1055-1065.
- Arnold, C. Y. (1959). The development and significance of the base temperature in a linear heat unit system. *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 74:430-445.
- Baier, W., & Robertson, G.W. (1965). Estimation of latent evaporation from simple weather observations. *Canadian Journal of Plant Science*, 45(3): 276–284.
- Blanco-Macías, F., Valdez-Cepeda, R. D., Vázquez-Alvarado, R. E., & Almaguer-Sierra, P. (2009). Establecimiento y manejo de nopalito para verdura. *VII Simposium-Taller "Producción y Aprovechamiento del Nopal en el Noreste de México". RESPYN. Edición Especial*, 2: 1-17.
- Blanco M. F., R.D. Valdez S., R. Magallanes Q., R.E Vázquez A., E. Olivares S., E. Gutiérrez O. y J. A. Vidales C. (2011). El Rendimiento e interacciones nutrimentales en nopal (*Opuntia ficus indica* L.). IX Simposium-Taller Nacional y Internacional de producción de nopal y maguey. 12 y 13 de noviembre.
- Becerra, G. (1994). Nopal verdura *Opuntia* spp: Cultivo alternativo para las zonas áridas y semiáridas de México. In *Nopal verdura Opuntia spp: Cultivo alternativo para las zonas áridas y semiáridas de México*. CONAZA. 31 pp.
- Becerra P. M., Sáinz Santamaría, J., & Muñoz Piña, C. (2006). Los conflictos por agua en México. Diagnóstico y análisis. *Gestión y política pública*, 15(1): 113-143.
- Berti, A., Tardivo, G., Chiaudani, A., Rech, F., Borin, M. (2014). Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in north-eastern Italy. *Agric. Water Manage.* 140: 20–25
- Bonhomme, R. (2000). Bases and limits to using "degree days" units. *European journal of Agronomy*. 13(1): 1-10.
- Bravo, (1978). Las cactáceas de México. Segunda edición. Volumen I. UNAM. 745p.
- Calderón P., N., A. A. Estrada L. y J. de J. Martínez H. (1997). Efecto de la salinidad en el crecimiento y absorción nutrimental de plantas micropropagadas de nopal (*Opuntia* spp.). pp. 165-166. In: R. Vázquez A., C. Gallegos V., N.E. Treviño H. y Y. Díaz T.

- (eds.). Conocimiento y aprovechamiento del nopal. Memorias del 7o Congreso Nacional y 5o Internacional. Universidad de Monterrey, NL, México.
- Caprio, J. M. (1974). The solar thermal unit concepting problems related to plant development and potential evapotranspiration *In*:H. Lieth (Ed.), Phenology and seasonality modeling. Ecological Studies (pp. 353–364). New York:Springer Verlag.
- CONAZA. (1994). Cultivo alternativo para las zonas áridas y semiáridas de México. Instituto nacional de ecología (primera edición). Saltillo, Coahuila. México. 18 pp.
- Consejo consultivo de agua A.C. (2019). Consultado en <http://www.aguas.org.mx/sitio/index.php/panorama-del-agua/diagnosticos-del-agua>.
- Cookpad. (2018). Recetas de nopales. consultada en línea. <https://cookpad.com/mx/buscar/nopales>.
- Corrales-García, J., Peña-Valdivia, C. B., Razo -Martínez, Y., & Sánchez- Hernández, M. (2004). Acidity changes and pH-buffering capacity of nopalitos (*Opuntia* spp.). *Postharvest Biology and Technology*, 32(2): 169-174.
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). Guidelines for predicting crop water requirements. Rome:FAO. *Irrigation and Drainage Paper. No. 52. Rome. FAO* (p. 156). ISBN 92-5-400279-8.
- Flores, C., De Luna, J. M., & Ramírez, P. P. (1995). Mercado mundial del nopalito. ASERCA-UACH-CIESTAAM. Chapingo, México. 176 pp.
- Flores V, C. (2001) Producción, industrialización y comercialización de nopalitos. Reporte de investigación 58. CIESTAAM. UACH. 28p.
- Flores V, C. A. (2002). El Nopal y la lucha contra la desertificación. Reporte de investigación 59. CIESTAAM. UACH. 39p.
- Flores, H. A., Trejo, C. R., Areola, A. J., Orona, C. I., Murillo, A. B., Rivera G. M., Martínez, R. G. y García, G. E. A. (2005). Producción estacional de nopal verdura (*Opuntia* spp.) bajo riego por goteo en una región agrícola de México. *J. PACD*.
- Gordillo Salinas, V. M., Flores Magdaleno, H., Tijerina Chávez, L., & Arteaga Ramírez, R. (2014). Estimación de la evapotranspiración utilizando un balance de energía e imágenes satelitales. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(1): 143-155.
- Gilmore, E.C. and Rogers, J.S., (1958). Heat units as a method of measuring maturity in corn. *Agron. J.*, 50(10): 611 615.
- Han, H. y Felker, P. (1997). Field validation of water use efficiency of CAM plant *Opuntia ellisiana* in south Texas. *Journal of Arid Environments*, 36(1): 133-148.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2): 96–99.
- Hoover, M.W., (1955). Some effects of temperature on the growth of southern peas. *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 66: 308-312.
- Hortik, H.J. and Arnold, C.Y., (1965). Temperature and the rate of development of sweet corn. *Am. Soc. Hort. Sci.*, 87(1): 303-312.

- Irmak, S., Irmak, A., Allen, R. G., & Jones, J. W. (2003). Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(5): 336–347.
- Jensen, M. E. y Haise. H. R. (1963). Estimating evapotraspiration from solar radiation. *J. of irrig. Drain. Div. ASCE*. 89: 25-38.
- Jones, J. W., & Ritchie, J. T. (1990). Crop growth models. Management of farm irrigation systemsIn: G. J. Hoffman, T. A. Howel, & K. H. Solomon (Eds.), ASAE Monograph No.9 (pp. 63–69).
- Liu, D. L., Kingston, G. and Bull, T. A. (1997). A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including suboptimum. *Agricultural and Forest Meteorology*.and supra-optimum temperature regimes. 90(1-2): 119-139.
- Luna, V. J. (2001). Producción Intensiva de Nopal Verdura. Folleto para productores No. 28. SAGARPA-INIFAP. *Fundación Produce*. 22 pp.
- Madariaga, F.J. and Knott, J.E., (1951). Temperature summations in relation to lettuce growth. *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 58(1):147 152.
- Makkink, G.F., (1957). Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Inst. Water Eng.*, 11(1): 277-288.
- McGuinness, J.L., & Bordne, E.F. (1972). A comparison of lysimeter derived potential evapotranspiration with computed values. Washington, DC: Agricultural Research Service, *US Department of Agriculture*.71 pp.
- Moore, J. L., Remais, J. V. (2014). Developmental models for estimating ecological response to environmental variability: structural, parametric, and experimental issues. *Acta Biotheor*. 62(1): 1-20.
- Neild, R. E., and Seeley, M. W. (1977). Growing degree-days predictions for corn and sorghum development and some applications to crop production in Nebraska. 12 pp.
- Nobel, P. S., Wang, N., Balsamo, R. A., Loik, M. E., & Hawke, M. A. (1995). Low-temperature tolerance and acclimation of *Opuntia* spp. after injecting glucose or methylglucose. *International Journal of Plant Sciences*, 156(4): 496-504.
- Orona C, I., A. Flores H., M. Rivera G., J. G. Martínez, J. J. Espinosa A. (2003). Productividad del agua en el cultivo del nopal con riego por goteo en la comarca lagunera. *Terra latinoamericana*, vol. 21(2). *Sociedad Mexicana de la ciencia del suelo a. c. Chapingo*, México: 195-201.
- Orona C. I; J.A. Cueto W., B. Murillo A., J. Santamaría C., A. Flores H., R. D. Valdez C., J. L. García H. y E. Troyo D. (2004). Mineral extraction of green prickly pear cactus under drip irrigation. *J. PACD*. 6(1): 90-101.
- Ortiz, S. C. A. (2011). Elementos de agroclimatología cuantitativa con aplicaciones en la República mexicana. 5<sup>ta</sup> ed. México. 219 pp.
- Orúe Gómez, R. J., & Rojas Serrano, E. J. (2008). Efecto de enmiendas nutricionales sobre el rendimiento del nopal (*Opuntia ficus indica* L.) en Diriamba, Carazo, 2007 (Doctoral dissertation, Universidad Nacional Agraria, UNA). 42 pp.

- Pedrero, E. (2018). China y Brasil compiten con México en producción de nopal. La Razón de México. <https://www.razon.com.mx/china-y-brasil-compiten-con-México-en-producción-de-nopal/>. (consultado el 24 de julio de 2017).
- Priestley, C.H.B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2):81–92.
- Ramírez, A. O., Figueroa, H. E., Espinosa, T. L. E. y Ortiz, R. M. A. (2012). Producción de Nopal Verdura en condiciones de Invernadero. Sexta Época. *J. PACD*. Volumen 31. 98 pp.
- Ravazzani, G., Corbari, C., Morella, S., Gianoli, P., Mancini, M., (2012). Modified Hargreaves-Samani equation for the assessment of reference evapotranspiration in Alpine River Basins. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 138 (7): 592–599
- Reyes-Agüero, J. A., Aguirre, R. J. R. & Valiente-Banuet, A. (2006). Reproductive biology of *Opuntia*: a review. *Journal of arid environments*, 64(4): 549-585.
- Ritchie, J. T. and NeSmith, D. S. (1991). Temperatura and Crop Development. *Modeling Plant and Soil Systems-Agronomy* Monograph no. 31:5-29
- Ríos, R. J., y V. Quintana M. (2004). Manejo general del cultivo de nopal. Secretaria de la Reforma Agraria. Colegio de posgraduados, montecillos, México. 81 pp.
- Robertson G. W. (1983) Weather-based mathematical models for estimating development and ripening of crops. *WMO*.180(620): 99
- Robles C. F., R. Macías D., y R. L. Grijalva C. (2008). Tecnología de producción de nopal verdura para el noroeste de Sonora. Centro de Investigación de Noroeste. Campo experimental costa de Hermosillo. Sitio experimental Caborca. SAGARPA-INIFAP-FUNDACION PRODUCE SONORA A.C. 35p.
- Romanenko, V. A. (1961). Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area. *Proc. of Ukrainian Hydrometeorological Research Institute*, 3(1): 12-25.
- Ruiz, E. F. H., Alvarado, M. J. F., Murillo, A. B.,..., Fenech, L. L. (2008). Rendimiento y Crecimiento de Nopalitos de Cultivares de Nopal (*Opuntia ficus-indica*) bajo Diferentes Densidades de Plantación. *J.PACD*: 22-35.
- Salazar S, E., M. Ortiz H., A. Vázquez A. y C. Vázquez V. (2003). Agricultura Orgánica. Sociedad Mexicana de la Ciencia Del Suelo. Facultad de agricultura y zootecnia de la UJED. 246: 37-49.
- Saravia, T, P. L. (2002). Agrupamientos productivos (cluster) del nopal. Secretaría de Economía (SE). [http://www.contactopyme.gob.mx/estudios/docs/nopal\\_mexico](http://www.contactopyme.gob.mx/estudios/docs/nopal_mexico). (consultado julio, 2018).
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2013). Estadísticas de producción agrícola 2013. <http://www.sagarpa.gob.mx/quienesomos/datosabiertos/siap/Paginas/estadistica.aspx>. (consultado julio, 2018)
- Secretaria de economía. (2006). Hortaliza Fresca-Nopal Verdura (*Opuntia* spp.) - ESPECIFICACIONES (CANCELA A LA NMX-FF-068-1988)).

- Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga, E., & Aceituno, C. (2007). Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of arid environments*, 68(4): 534-545.
- Stephens, J.C., 1965. Discussion of estimating evaporation from insolation. *J. Hydraul.*,91: 171-182.
- Trajkovic, S., (2007). Hargreaves versus Penman–Monteith under humid conditions. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133 (1), 38–42.
- Turc, L. (1961). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *Annals of Agronomy* 12: 13-49.
- University of California Agriculture & Natural Resources. UCANR. (2018). Consultado en [http://ipm.ucanr.edu/WEATHER/ddss\\_tbl.html](http://ipm.ucanr.edu/WEATHER/ddss_tbl.html).
- Valdez C. R. D., F. Blanco M., B. Murillo A., J. L. García H., R. R. Ruiz G., M. Márquez M., J. D. López M., J. C. Ledesma M. y F. J. Macías R. (2003) Fertilización y nutrición en tres variedades de nopal (*Opuntia ficus indica*). *Sistemas de producción agropecuaria- Agrofaz* Volumen 3 Número 2. 347-351.
- Vázquez, A. R. E., Valdez, C. R. D., Blanco, M. F., Ojeda, Z. M. C., Martínez, L. J. R. (2010). Producción Hidropónica de Nopal Verdura. *RESPYN Revista Salud Pública y Nutrición*, Edición Especial No. 5-2010. 22 pp.
- Yang, S., Logan, J., & Coffey, D. L. (1995). Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. *Agricultural and Forest Meteorology*, 74(1-2): 61-74.
- Zúñiga-Tarango, R., Orona-Castillo, I., Vázquez-Vázquez, C., Murillo-Amador, B., Salazar-Sosa, E., López-Martínez, J. D. & de Santa Rita, C. P. P. (2009). Desarrollo radical, rendimiento y concentración mineral en nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. en diferentes tratamientos de fertilización. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 11: 53-68.

### 3. SENSORES DE BAJO COSTO PARA MEDIR HUMEDAD RELATIVA Y TEMPERATURA

Martin Azúa Barrón<sup>1</sup>, Mario Alberto Vázquez Peña<sup>2</sup>

#### RESUMEN

##### Resumen

Para medir temperatura y humedad relativa hay sensores de gran precisión, pero sus costos limitan su uso. El objetivo fue caracterizar sensores de bajo costo con un patrón. Se registró información cada media hora durante 120 días. Se obtuvieron intervalos de confianza (IC) al 95 %. Dos métodos de corrección fueron utilizados: regresión lineal simple (RLS) y múltiple (RLM). Los IC del patrón están dentro de las especificaciones del fabricante, los de bajo costo indicaron la necesidad de corregir las mediciones. Las correcciones para temperatura con RLM dio  $R^2$  mayores en 0.02 y RSE menores en 0.8 con respecto a la RLS, Las correcciones para humedad relativa con RLM dio  $R^2$  mayores en 0.02 y RSE menores en 1.4 con respecto a la RLS. Los apegados al patrón según sus RSE son para temperatura el LM35DZ y para humedad relativa el HMZ-433A1. Los RSE y  $R^2$  de la validación para temperatura, todos fueron mayores o iguales a los de los modelos generados, solamente el sensor LM35DZ no, para la humedad relativa todos fueron mejores. Al caracterizar el desempeño de los sensores de bajo costo con respecto al patrón, determinó la necesidad de corregir sus mediciones en la mayoría de estos.

**Palabras Clave:** sensores, caracterización, estadística, comparación de sensores.

##### Abstract

To measure temperature and relative humidity, there are high precision sensors, but their costs limit their use. The objective was to characterize low cost sensors with a pattern. Information was recorded every half hour for 120 days. 95% confidence intervals (CI) were obtained. Two correction methods were used: simple linear regression (RLS) and multiple regression (RLM). The IC of the pattern are within the specifications of the manufacturer, the low cost indicated the need to correct the measurements. The corrections for temperature with RLM gave  $R^2$  higher in 0.02 and RSE lower in 0.8 with respect to the RLS, Corrections for relative humidity with RLM gave  $R^2$  greater in 0.02 and RSE lower in 1.4 with respect to the RLS. Those attached to the pattern according to their RSE are for temperature the LM35DZ and for relative humidity the HMZ-433A1. The RSE and  $R^2$  of the validation for temperature, all were greater or equal to those of the models generated, only the sensor LM35DZ no, for relative humidity all were better. By characterizing the performance of low-cost sensors with respect to the pattern, he determined the need to correct his measurements in most of these.

**Keywords:** sensors, characterization, statistics, sensor comparison.

<sup>1</sup>Tesista

<sup>2</sup>Director

### 3.1. Introducción

Los sensores electrónicos están presentes en todas las facetas de la vida desde los aparatos que se usan en el hogar, en vehículos de transporte, en computadoras y la industria, etc. Se han vuelto imprescindibles y de manera discreta apoyan la vida al hacerla más cómoda y de mejor calidad. Hay una gran variedad de sensores, algunos de ellos para detectar humedad del aire (Traversa 1993, Yeo *et al.*, 2005), humedad del suelo (Florentino, 2006; Schugurensky y Capraro, 2013), temperatura (Whiteman *et al.*, 2000), de gases reactivos como el óxido de estaño (Martinelli y Carotta, 1995), etc.

La temperatura (T) tiene un efecto directo en el metabolismo de las plantas y las temperaturas bajas o altas dañan los cultivos (Ferrante y Mariani, 2018). Tienen aplicaciones en meteorología para la predicción de heladas. Comprender las complejas interrelaciones entre la temperatura del aire con el ambiente y sus variaciones en microclimas como son las cubiertas vegetales y los ambientes controlados (Whiteman *et al.*, 2000). En la producción agrícola controlada los cultivos requieren de condiciones definidas de temperatura y humedad relativa, donde el uso de sensores electrónicos es fundamental. La humedad relativa y la temperatura tienen un efecto directo en los procesos biológicos como por ejemplo la enfermedad de la conidias (Latorre y Rioja, 2002). Por su parte, Lowen *et al.* (2007) realizaron experimentos controlados donde encontraron que la transmisión del virus de la influenza depende de la temperatura y la humedad relativa. En los sistemas no biológicos como son las estructuras de hormigón determinan la velocidad de corrosión debido a complejos procesos que se desarrollan simultáneamente con las variaciones de estas dos variables (Andrade *et al.*, 1998). Se han utilizado sensores de bajo costo para realizar el monitoreo de la temperatura de la nieve, con fines de modelar el deshielo (Lundquist and Lott, 2008). Son muchas las aplicaciones en la agricultura del monitoreo de la temperatura y la humedad relativa con el fin de incrementar la cantidad de alimentos con técnicas especializadas para la producción y es allí cuando los sensores tienen su aplicación (Abbasi *et al.*, 2014).

Ribeiro (2015) realizó una evaluación del sensor de humedad relativa y temperatura contenido en el dataloger HOBO con respecto a otros sensores patrones, coleccionó datos por un periodo de seis días de una manera simultánea e indicó que la radiación solar tiene efecto en la variabilidad de los sensores por lo que deben estar protegidos de esta. Las

mediciones de humedad del suelo a temperaturas bajas no son confiables, Miloshevich et al. (2001) con sondas Vaisala rs80-a a temperaturas del suelo de 0 °C a -70 °C caracterizaron y corrigieron estas. Por su parte Cruz et al. (2013) realizaron la calibración de un sensor de humedad del suelo (COSMOS CRS-1000) in situ al comparar la humedad obtenida con el método gravimétrico con la del sensor. González et al. (2012) construyeron un sistema de monitoreo en tiempo real para la medición de la temperatura con el sensor LM35 y la compararon con la medida por una termocupla en donde se calibró el sistema de adquisición de datos en el rango de 0 °C a 95 °C.

Cuando se utilizan sensores es necesario la caracterización y calibración de los mismos, al tomar como base una medida o método estándar (Singh et al., 2008). En el mercado existen diferentes sensores de bajo costo, por lo que es importante antes de iniciar una investigación conocer el error que cada uno tiene y seleccionar el que tenga el más bajo al compararlo con un sensor patrón, por lo que el objetivo del presente trabajo fue caracterizar el desempeño de sensores de bajo costo (LM35DZ, HMZ-433A1, DHT22, DHT11 y Type J) para medir la temperatura y humedad relativa en un invernadero de plástico y se validó su respuesta al comparar sus mediciones con las del sensor de referencia (Vaisala HMP45C).

### **3.2. Materiales y métodos**

El Trabajo se realizó en la estación meteorológica del departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. En un invernadero (Figura 3.1) con ventilación lateral, con un área de 105 m<sup>2</sup> para los cultivos, un volumen aproximado de aire 550 m<sup>3</sup>, con cubierta de plástico y estructura de metal con orientación Norte-Sur. La localización geográfica es latitud 19.483 N y longitud 98.900 W, con una altura de 2250 msnm. El clima de la localidad es de tipo Cb(Wo)(W)(i')g, templado subhúmedo con lluvias en verano, con una época seca en invierno y con una oscilación térmica que varía entre 5 a 7 °C . La temperatura media anual es de 17.2 °C, mayo es el mes más caliente con temperatura media de 19.7 °C y con 14.1 °C enero el más frío. La precipitación media anual es de 598 mm con vientos dominantes del Sur (Pulido y García, 2019).



Figura 3.1. Invernadero donde se realizó la toma de datos con una estación meteorológica automatizada.

### 3.2.1. Los sensores estudiados

**LM35DZ.** Es un circuito integrado de precisión para medir la temperatura, con salida de voltaje linealmente proporcional a la temperatura en grados celsius, la información de referencia presentada por NSC (2000) indica que no requiere una calibración externa, con una precisión de  $\pm 1/4$  °C a temperatura de alrededor de 25 °C y  $\pm 3/4$  °C en el rango de 2 a 150 °C en su configuración típica. Con un consumo de 60  $\mu$ A y menos de 0.1 grado de sobrecalentamiento en condiciones de viento quieto (NSC, 2010).

**Tipo J.** Es un termopar que mide la temperatura, construido con la unión física de dos materiales conductores (hierro que conforma el polo positivo y una aleación de aproximadamente 45% níquel y 55% cobre) que generan un voltaje proporcional a la temperatura. El rango de medición es de 0 a 750 °C, se tiene un error de 2.2 °C o 0.75 %, se alimenta con 5V (Tei, 2017).

**HMZ-433A1.** Este consiste de un sensor HCZ y un circuito integrado que tiene una respuesta lineal de voltaje para HR. Se alimenta con 5 V  $\pm$  5% de corriente directa, con un consumo de 5mA (máximo) y un promedio de 2 mA, con un rango de operación para temperatura de 0 a 60 °C y de 0 a 95% para HR, indican una precisión en la temperatura al utilizar una resistencia de  $50 \pm 0.5$  K $\Omega$  a 25 °C de 0.2 °C y en HR a 25 °C alimentado con 5 VDC a 50 % de  $\pm$  5% (Ghitron Technology, 2017).

**DHT22 (también llamado AM2302).** Es un módulo para medir temperatura y humedad relativa con salida digital vía bus simple para ambas variables. Utiliza una técnica propia

para coleccionar la señal digital y tecnología de sensor de humedad. Sus elementos sensores están conectados con un chip microprocesador (de 8 bit) que se compensa por temperatura. Se alimenta con 3.3 a 6 VDC, el elemento sensor es un capacitor polímero, el rango de humedad de 0 a 100% con un error máx. de  $\pm 2\%$  y el rango para la temperatura es de -40 a 80 °C con una precisión de  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  y con un periodo de medición de 2 s (Aosong Electronics Co, 2017).

**DHT11.** Es un módulo con salida de señal digital calibrada para medir temperatura y humedad relativa. Incluye un sensor resistivo del componente humedad y un dispositivo NTC para medir temperatura conectados con un microcontrolador de 8 bit de alto rendimiento. Con una precisión en Humedad relativa de 5% a 25 °C y en temperatura de  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  a 25 °C. Se alimenta con 5 a 5.5 VDC y con un consumo de 0.3 mA, (Aosong Electronics Co, 2017).

**HMP45C (6WCP).** Es una sonda para medir temperatura y humedad relativa, contiene un chip PRT para medir temperatura y utiliza un polímero capacitivo tipo H para medir la humedad relativa. El sensor se alimenta con 12V y 4 mA continuamente o cuando se va a medir para conservar la batería, requiere de 0.15 segundos para calentar. Tiene un rango de operación para temperatura de -40 °C a 60 °C con una salida en volts que va de 0.008 a 1.0, una precisión a 20 °C de  $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , conforme la temperatura se aleja de este valor hasta  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  a -40 °C y  $\pm 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  a 60 °C. Para la humedad relativa el rango de operación es de 0 a 100% sin condensación y la salida en volts va de 0.008 a 1.0, y garantiza una precisión de  $\pm 2\%$  en mediciones de 0 a 90% y de  $\pm 3\%$  de 90 a 100% (Campbell Sci Inc, 2009).

Los sensores, las variables que miden y sus costos en dólares se presentan en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1. Resumen de las características de los sensores y sus costos en dólares.

Sensor	Variabes	Rango de operación	de	Formato de señal de salida	Precisión	Costo (dólares)
LM35DZ	T	De 2 a 150 °C		Análoga de 0-10 mV	0.75 °C	1.70
TIPO_J	T	De -210 a 750 °C		Análoga de -8.095 a 42.281 mV	2.2 °C	15.00

HMZ-433A1	T y HR	T de 0 a 60 °C	Análoga 0 a 3.3 V	En T A 25 °C de 0.20 °C	4.50
DHT22	T y HR	HR de 0 a 95 % T de -40 a 80 °C	Digital vía bus simple	En HR A 25 °C de 5 % T de 0.5 °C	5.00
DHT11	T y HR	HR de 0 a 100 % T de 20 a 95 °C	Digital vía bus simple	HR máx. de 5 % En T A 25 °C de 2 °C	2.00
HMP45C	T y HR	HR de 0 a 50 % T de 0 a 60 °C	Análoga de 0 a 1000 mV	En HR A 25 °C de 5 % En T a 20 °C de 0.2 °C	630.00
		HR de 0 a 95 %		En HR a 20 °C de 2 % (0 90%)	

Se realizaron mediciones de temperatura y humedad relativa con seis sensores diferentes del 12 de noviembre del 2017 al 12 de marzo del 2018 (120 días), se sincronizaron el microcontrolador (arduino) y la estación automática para medir cada media hora. Los sensores instrumentados fueron: LM35DZ y Type J que solo miden temperatura y los HMP45C, HMZ-433A1, DHT22, DHT11 que miden temperatura y humedad relativa. Para los sensores LM35DZ, HMZ-433A1, DHT22 y DHT11 se utilizaron tres sensores de cada uno. En el caso del sensor HMZ-433A1 uno falló. En la estación automática se instrumentó el Vaisala HM45C y la sonda Type J, el resto se instrumentaron en el microcontrolador. El sensor patrón fue el HMP45C y el resto de los sensores se compararon con este de acuerdo al procedimiento siguiente:

Se obtuvieron los intervalos de confianza del patrón, de las diferencias (errores) entre las mediciones de cada uno de los sensores con el patrón, para lo anterior se utilizó una librería de R 3.5.0 (R Core Team., 2018).

Se elaboraron los diagramas de dispersión entre los datos medidos con el sensor HMP45C y con cada uno de los sensores trabajados.

Se obtuvo el modelo por regresión lineal simple al considerar el HMP45C como variable dependiente y el sensor en cuestión como variable independiente para corregir los datos de los sensores de bajo costo. Se obtuvieron los estadísticos  $R^2$  (coeficiente de determinación), a, b y RSE (residual estándar error) para cada uno de los modelos de la forma:

$$Y_i = aX_i + b + e_i \quad (3.1)$$

Donde:  $Y_i$  es el dato medido en el sensor HMP45C en el tiempo i,  $X_i$  es el dato medido en uno de los sensores en el tiempo i, a y b son coeficientes de regresión lineal simple y  $e_i$  es el error de la medición en el tiempo i.

Alternativamente se propone un modelo de regresión lineal múltiple también para corregir los datos en el que se incluye el dato anterior medido con el mismo sensor y se obtienen los estadísticos  $R^2$ , a, b, c y RSE:

$$Y_i = aX_i + bX_{i-1} + c + e_i \quad (3.2)$$

Donde:  $Y_i$  es el dato medido en el sensor HMP45C en el tiempo  $i$ ,  $X_i$  es el dato medido en uno de los sensores en el tiempo  $i$ ,  $X_{i-1}$  es el dato medido en uno de los sensores media hora antes, a, b y c son coeficientes de regresión lineal múltiple y  $e_i$  es el error de la medición en el tiempo  $i$ .

Detalles de la teoría de la regresión lineal simple y múltiple ver en Draper and Smith (2014).

La parte estadística computacional de este trabajo se realizó con apoyo del software libre R 3.5.0 (R Core Team., 2018).

La validación de los modelos obtenidos con las técnicas descritas (Ecuaciones 3.1 y 3.2) se realizó con una serie de datos no utilizados en la generación de estos (del 10 de febrero al 11 de marzo del 2018) y se calcularon los coeficientes de determinación y la raíz del cuadrado medio del error, estos se compararon con los determinados con los modelos generados con una prueba t de Student al 95%.

### **3.3. Resultados y discusión**

#### **3.3.1. Temperatura**

Con datos medidos del sensor HMP45C alrededor de 20 °C se calculó el intervalo de confianza del error al 95 %, donde se mostró que sus mediciones estuvieron de acuerdo a lo que indica su fabricante ( $\pm 0.2$  °C a 20 °C), con una media de 19.977 y un intervalo de confianza de  $\pm 0.146$  °C, lo que indica que el sensor está en condiciones adecuadas para medir esta variable. Además, el sensor Vaisala HMP45C tiene una calibración de fábrica certificada. Por su parte Savage (2010) obtuvo buenos resultados en laboratorio y en campo, en un rango de temperaturas similares a las de este trabajo.

Se calcularon los errores de los sensores con respecto al HMP45C a los que se les determinó su intervalo de confianza al 95 %, la media del error de los intervalos obtenidos

muestra que existen diferencias entre sensores y para el mismo sensor (Cuadro 3.2). Esto indica la necesidad de calibración de los sensores.

Cuadro 3.2. Intervalos de confianza de los errores de los sensores con respecto al sensor HMP45C en las mediciones de temperatura.

Diferencia	Límite inferior (°C)	Límite superior (°C)	Media (°C)
HMP45C-LM35DZ1	-0.44	-0.33	-0.39
HMP45C-LM35DZ2	0.37	0.47	0.42
HMP45C-LM35DZ3	0.30	0.41	0.36
HMP45C-HMZ_433A1	0.94	1.10	1.01
HMP45C-HMZ_433A1	1.60	1.69	1.65
HMP45C-DHT22 1	-0.06	0.28	-0.02
HMP45C-DHT22 2	-0.04	0.17	0.07
HMP45C-DHT22 3	-0.52	-0.29	-0.40
HMP45C-DHT11 1	0.76	0.91	0.83
HMP45C-DHT11 2	-0.49	-0.28	-0.39
HMP45C-DHT11 3	0.80	1.05	0.93
HMP45C-Type J	1.05	1.18	1.11

Los intervalos de confianza se calcularon al 95 %. Con datos de temperatura medidos próximo a 20 °C.

En los diagramas de dispersión entre los datos del sensor Vaisala (HMP45C) y los otros sensores (Figura 3.2) al considerar la línea roja con pendiente 1:1 y por el origen, se determinaron los que tuvieron mayor dispersión que se presentan en las Figuras 3.2 G, H, J y K, y los que menos 3.2 B, E, F y I. Lo anterior concuerda con los valores numéricos de sus RSE (Cuadro 3.3).

La irregularidad mostrada dentro de una elipse en la Figura 3.2 A y que también se aprecia en otros diagramas de dispersión, es porque el sensor HMP45C mide valores de temperatura menores a cero y los LM35dz, HMZ433A1 y DHT11 de acuerdo a sus respectivas hojas de datos y con la configuración utilizada, no los miden (Figura 3.2).

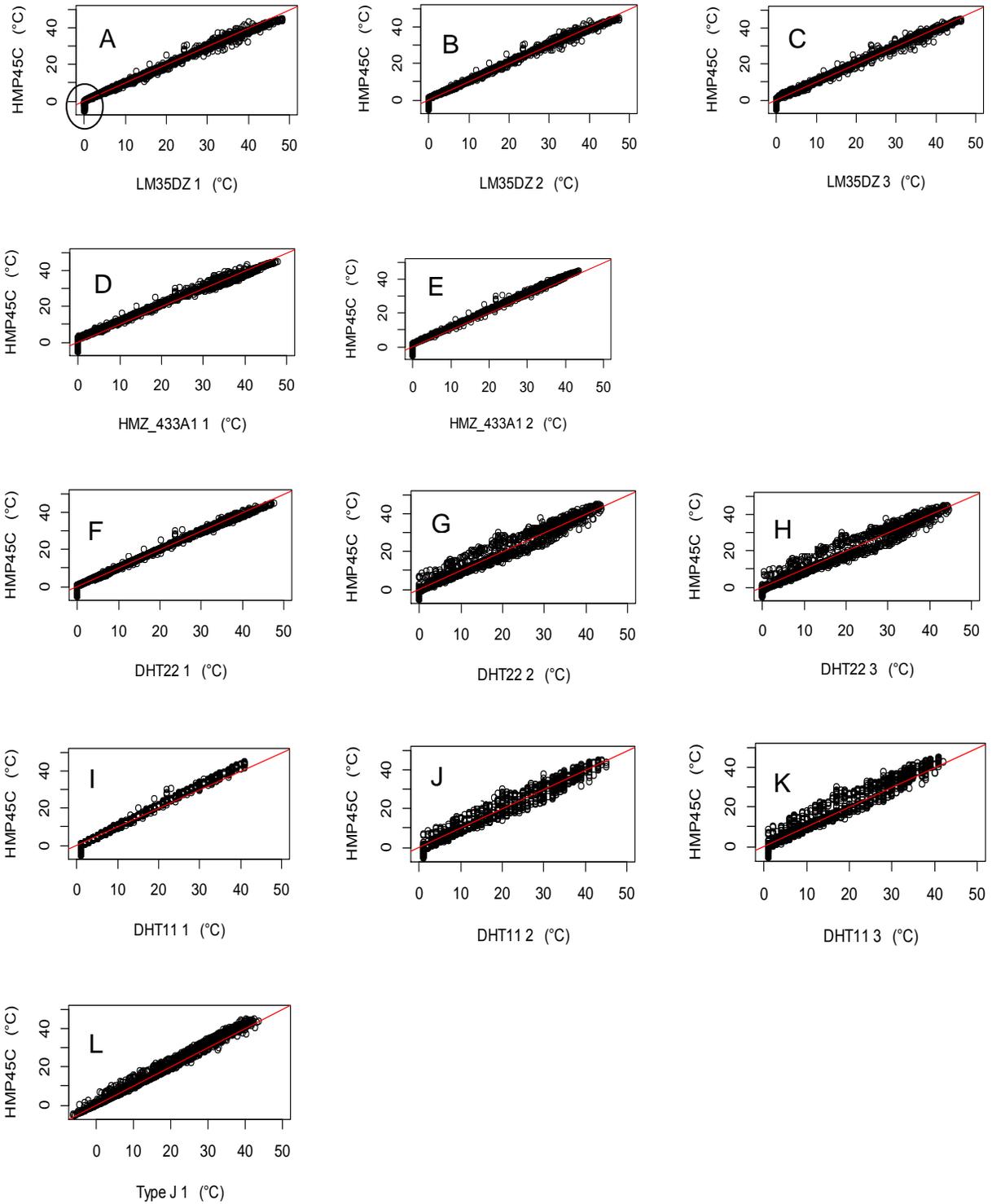


Figura 3.2. Diagramas de dispersión entre las temperaturas medidas con los sensores y el sensor patrón. La línea roja tiene pendiente 1:1 y pasa por el origen, (datos de 90 días) número de datos n=4320.

Cuadro 3.3. Estadísticos y coeficientes del modelo de regresión lineal simple para corregir los valores de los sensores al HMP45CT (Temperatura) número de datos n=4320 (90 días).

Figura 3.2	Relación	R <sup>2</sup>	a	b	RSE (°C)	EAF (°C)
A	HMP45C=f(LM35DZ1)	0.994	0.964	0.236	1.1	0.75
B	HMP45C=f(LM35DZ2)	0.994	0.971	0.900	1.0	
C	HMP45C=f(LM35DZ3)	0.993	0.980	0.689	1.1	
D	HMP45C=f(HMZ_433A1)	0.989	0.923	2.231	1.4	0.2
E	HMP45C=f(HMZ_433A2)	0.995	1.019	1.367	0.9	
F	HMP45C=f(DHT22T1)	0.996	0.967	0.542	0.9	0.5
G	HMP45C=f(DHT22T2)	0.967	1.024	-0.335	2.4	
H	HMP45C=f(DHT22T3)	0.961	1.022	-0.773	2.6	
I	HMP45C=f(DHT11T1)	0.996	1.115	-0.993	0.8	2.0
J	HMP45C=f(DHT11T2)	0.972	1.035	-0.982	2.2	
K	HMP45C=f(DHT11T3)	0.964	1.090	-0.494	2.5	
L	HMP45C=f(Type J)	0.990	1.065	0.094	1.3	2.2

Regresiones realizadas al 95% de nivel de confianza, EAF es el error admisible del fabricante.

Los parámetros de la regresión lineal simple para corregir los datos del LM35DZ1 y ajustarlos al HMP45C se obtiene del Cuadro 3.3 y el modelo es:

$${}^1\text{LM35DZ } 1_i = 0.964 * \text{LM35DZ } 1_i + 0.236$$

Donde:  ${}^1\text{LM35DZ } 1_i$  es el ajuste "i" de la medición de temperatura del sensor LM35DZ 1 al sensor patrón, LM35DZ  $1_i$  es la medición "i" obtenida en el LM35DZ 1,  ${}^1$  indica que es un valor corregido con el modelo lineal. Para los demás sensores se obtienen de forma similar.

Los parámetros de la regresión lineal múltiple para corregir los datos del LM35DZ1 y ajustarlos al HMP45C se toman del Cuadro 3.4 y el modelo es:

$${}^2\text{LM35DZ } 1_i = 0.853 * \text{LM35DZ } 1_i + 0.113 * \text{LM35DZ } 1_{i-1} + 0.201$$

Donde:  ${}^2\text{LM35DZ } 1_i$  es el ajuste "i" de la medición de temperatura del sensor LM35DZ 1 al sensor estándar, LM35DZ1 $_i$  es la medición obtenida con el sensor LM35DZ1, LM35DZ  $1_{i-1}$  es la medición media hora antes con el mismo sensor y el superíndice  ${}^2$  Indica la corrección con el modelo de regresión lineal múltiple.

La corrección con regresión lineal múltiple donde se involucró el valor anterior (Ecuación 3.2), mejoraron los valores de los RSE con respecto a la corrección con RLS (Cuadro 3.3),

fueron los DHT22 (Figuras 3.2 G y H) y DHT11 (Figuras 3.2 J y K). Los que cumplieron con los rangos de error que indica su fabricante fueron: el DHT11 y el Type J (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4. Estadísticos y coeficientes del ajuste con regresión lineal múltiple de los valores de los sensores al HMP45C (Temperatura) con el dato anterior.

Figura 2	Relación	R <sup>2</sup>	a	b	c	RSE(°C)	EAF (°C)
A	HMP45C=f(LM35DZ1)	0.994	0.853	0.113	0.201	1.0	0.75
B	HMP45C=f(LM35DZ2)	0.994	0.889	0.083	0.875	1.0	
C	HMP45C=f(LM35DZ3)	0.995	0.760	0.223	0.620	1.0	
D	HMP45C=f(HMZ_433A1 1)	0.989	0.848	0.076	2.209	1.4	0.2
E	HMP45C=f(HMZ_433A1 2)	0.995	1.033	-0.015	1.370	0.9	
F	HMP45C=f(DHT22T1)	0.996	0.969	-0.002	0.543	0.9	0.5
G	HMP45C=f(DHT22T2)	0.986	1.791	-0.779	-0.108	1.6	
H	HMP45C=f(DHT22T3)	0.985	1.897	-0.889	-0.519	1.6	
I	HMP45C=f(DHT11T1)	0.996	1.075	0.040	-1.004	0.8	2.0
J	HMP45C=f(DHT11T2)	0.985	1.646	-0.621	-0.789	1.6	
K	HMP45C=f(DHT11T3)	0.983	1.898	-0.821	-0.263	1.8	
L	HMP45C=f(Type J)	0.992	1.333	-0.273	0.176	1.1	2.2

Regresiones realizadas al 95% de nivel de confianza, EAF es el error admisible del fabricante.

Se muestra el desempeño de los dos modelos para corregir los datos de temperatura de tres sensores para ilustrar los ajustes. Se observa que, si los datos del sensor presentan buena tendencia con el patrón en los diagramas de dispersión ( $R^2 > 0.993$  and  $RSE < 1.4$  °C), la regresión lineal simple es un buen modelo para su corrección (Figuras 3.3 A y B).

El diagrama de dispersión entre las mediciones de temperatura del sensor HMP45C y las del DHT22 2 no muestra una tendencia deseable. El ajuste de los datos con el modelo de regresión lineal simple se observa en la Figura 3.3 C y al ser dispersos no se logra un buen ajuste ( $RSE = 2.4$  °C), con regresión lineal múltiple se tiene una mejora que se aprecia en la Fig. 3 D ( $RSE=1.6$  °C), con un mejor ajuste de los datos a la línea roja que tiene pendiente 1:1 y pasa por el origen, pero hay mediciones que no se corrigieron.

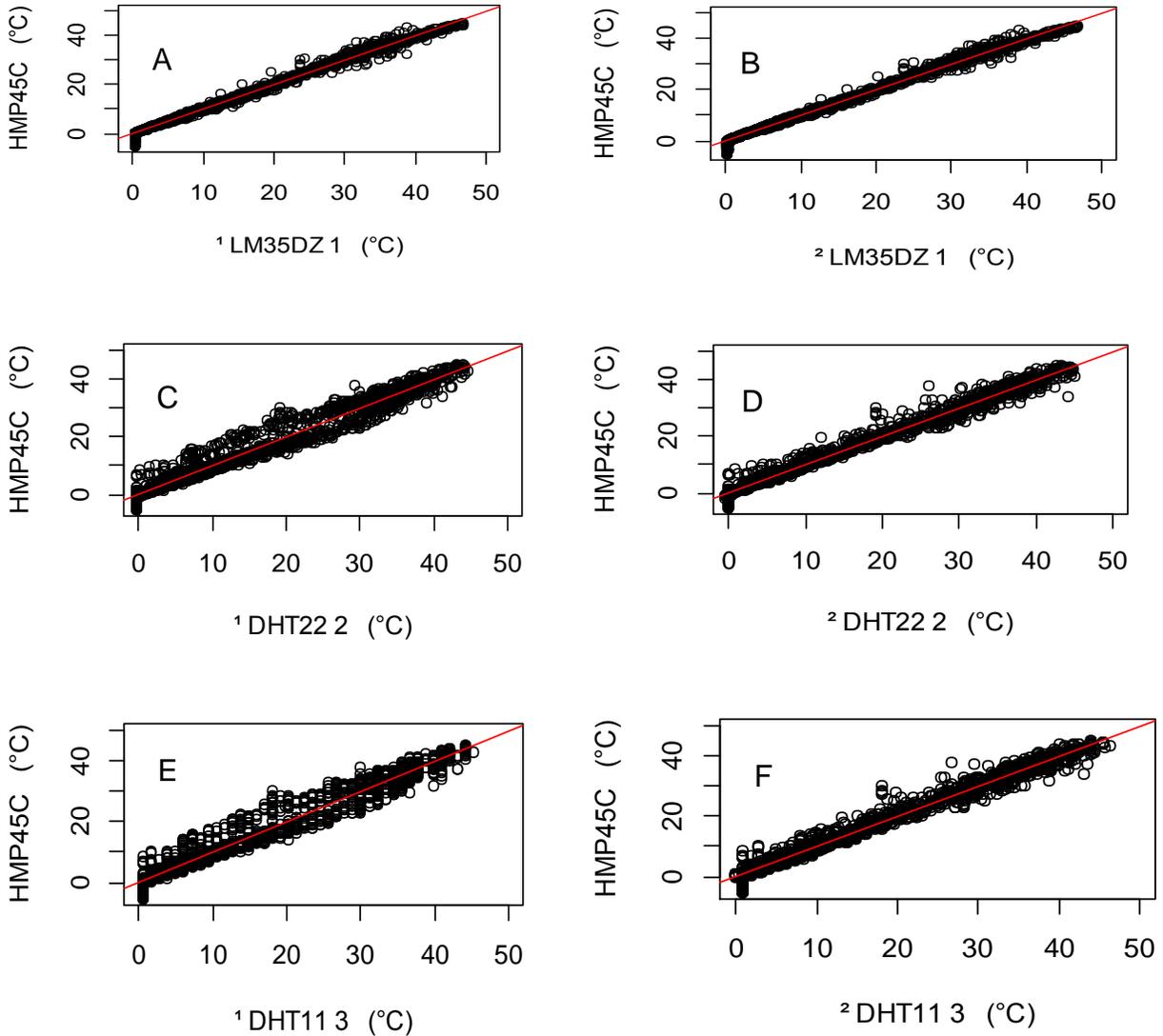


Figura 3.3. Diagramas de dispersión entre las mediciones de temperatura del sensor HMP45C y los datos medidos por los tres sensores, los corregidos con los métodos de regresión lineal simple y múltiple: A y B el sensor LM35DZ 1; C y D el DHT22 2 y E y F el DHT11 3 número de datos  $n=4320$ .

En el caso del sensor DHT11 3 (Figuras 3.3 E y F), su comportamiento fue muy similar al DHT22 2, en la regresión lineal simple se obtuvo un RSE de 2.5 °C y con la múltiple de 1.8 °C.

Cuando con la regresión lineal se obtuvo buen ajuste los RSE determinados con la regresión lineal múltiple fueron iguales o menores en 0.2 °C, para los RSE  $\geq 2.2$  obtenidos con la regresión lineal, con la RLM se obtuvieron RSE  $\leq 1.8$  °C.

### 3.3.2. Humedad relativa

Se determinó el intervalo de confianza al 95% de los datos de humedad relativa medidos alrededor del 20 °C del sensor del HMP45C, con una media de 33.57 % y un intervalo de confianza de  $\pm 1.970$  %, lo cual indica que cumple con su precisión de fábrica ( $\pm 2$  % a 20 °C).

La media del error de los intervalos de todos los sensores obtenidos muestra que existe diferencias entre sensores y para el mismo sensor (Cuadro 3.5), esto indica la necesidad de calibración de los sensores.

Tabla 5. Intervalos de confianza de los errores de datos de los sensores con respecto al sensor HMP45C en las mediciones de humedad relativa.

Cuadro 3.5. Intervalos de confianza de los errores de datos de los sensores con respecto al sensor HMP45C en las mediciones de humedad relativa.

Diferencia	Límite inferior (°C)	Límite superior (°C)	Media del error (°C)
HMP45C-HMZ_433A1 1	0.83	1.11	0.97
HMP45C-HMZ_433A1 2	2.76	3.00	2.88
HMP45C-HMZ_433A1 3	3.63	3.88	3.75
HMP45C-DHT22 1	-5.72	-5.49	-5.60
HMP45C-DHT22 2	-3.58	-3.22	-3.40
HMP45C-DHT22 3	-4.14	-3.73	-3.94
HMP45C-DHT11 1	4.46	5.00	4.73
HMP45C-DHT11 2	3.94	4.44	4.19
HMP45C-DHT11 3	3.94	4.52	4.23

Los intervalos de confianza se calcularon al 95%. Con datos de humedad relativa medidos alrededor de 20 °C de temperatura.

En los diagramas de dispersión entre los datos del sensor Vaisala (HMP45C) y los otros sensores (Figura 3.4) al considerar la línea roja con pendiente 1:1 y por el origen, se determinaron los sensores que tuvieron mayor dispersión que se observan en las Figuras 3.4 E, F, G, H y I, y los que menos A, B, C y D. Lo anterior coincide con los valores numéricos de sus RSE (Cuadro 3.4).

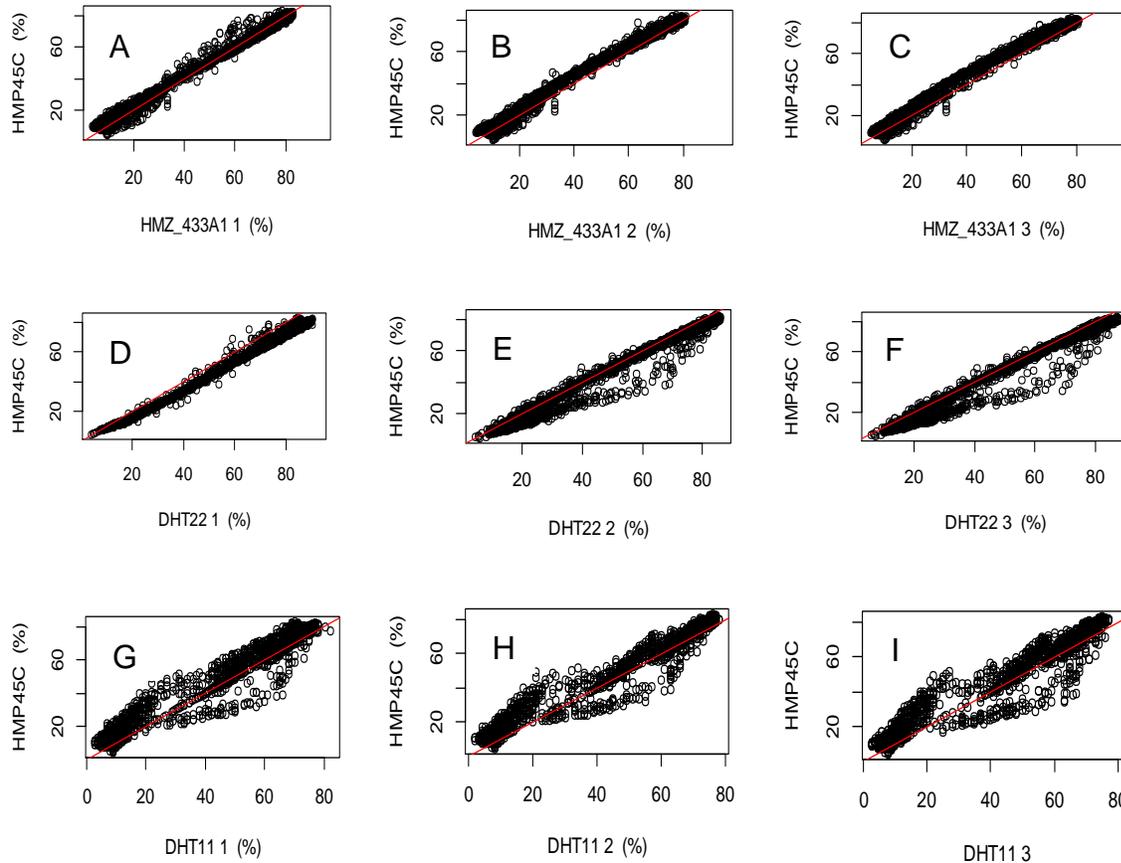


Figura 3.4. Diagramas de dispersión de humedad relativa del sensor HMP45C con: A, B) y C) sensores HMZ\_433A1; D), E) y F) sensores DHT22 y G), H) e I) sensores DHT11, número de datos n=4320.

En el cuadro 3.6, se presentan los estadísticos correspondientes a las regresiones lineales simples de los datos presentados en los diagramas de dispersión de la Figura 3.4.

Cuadro 3.6. Estadísticos y parámetro del modelo de ajuste por regresión lineal simple de la humedad relativa, número de datos n=4320.

Figura 4	Relación	R <sup>2</sup>	a	b	RSE (%)	EAF (%)
A	HMP45C=f(HMZ_433A1 1)	0.988	0.953	3.125	2.9	5
B	HMP45C=f(HMZ_433A1 3)	0.989	1.014	2.308	2.7	
C	HMP45C=f(HMZ_433A1 3)	0.988	1.020	2.889	2.8	
D	HMP45C=f(DHT22 1)	0.994	0.937	-2.347	2.1	2
E	HMP45C=f(DHT22 2)	0.970	0.997	-3.486	4.5	
F	HMP45C=f(DHT22 3)	0.960	1.010	-4.881	5.2	
G	HMP45C=f(DHT11 1)	0.937	0.946	7.723	6.5	5

H	HMP45C=f(DHT11 2)	0.950	0.930	7.103	5.9
I	HMP45C=f(DHT11 3)	0.928	0.944	6.648	7.0

Regresiones realizadas al 95% de nivel de confianza, EAF es el error admisible del fabricante.

Los parámetros de la regresión lineal simple para corregir los datos del HMZ\_433A1 1 y ajustarlos al HMP45C se obtiene de la Tabla 6 y el modelo es:

$${}^1\text{HMZ\_433A1 } 1_i = 0.953 * \text{HMZ\_433A1 } 1_i + 3.125$$

Donde:  ${}^1\text{HMZ\_433A1 } 1_i$  ajuste "i" del valor al sensor patrón (%),  $\text{HMZ\_433A1 } 1_i$  es la lectura "i" obtenida en el HMZ\_433A1 1 (%), el superíndice  ${}^1$  indica que es un valor corregido con el modelo lineal.

Los parámetros de la regresión lineal múltiple para corregir los datos del HMZ\_433A1 1 y ajustarlos al HMP45C se obtiene de la Tabla 7 y el modelo es:

$${}^2\text{HMZ\_433A1 } 1_i = 0.667 * \text{HMZ\_433A1 } 1_i + 0.290 * \text{HMZ\_433A1 } 1_{i-1} + 2.916$$

Donde:  ${}^2\text{HMZ\_433A1 } 1_i$  es el ajuste "i" de la medición de humedad relativa del sensor HMZ\_433A1 1\_i al sensor estándar (%),  $\text{HMZ\_433A1 } 1_i$  medida "i" obtenida con HMZ\_433A1 1 (%),  $\text{HMZ\_433A1 } 1_{i-1}$  medida i-1 del sensor HMZ\_433A1 1 (%) y el superíndice  ${}^2$  indica la corrección con el modelo de regresión lineal múltiple.

En la corrección con regresión lineal múltiple en la que se involucró el valor anterior (Ecuación 3.2), los sensores que mejoraron sus RSE con respecto a la corrección con RLS (Cuadro 3.6) fueron los DHT22 (Figuras 3.4 D, E, F) y DHT11 (Figuras 3.4 G, H, I) y el que cumplió con el rango de error que indica su fabricante fue el HMZ\_433A1. Los DHT22 y DHT11 no cumplieron en dos repeticiones. Lo anterior indica que se tiene una mejora con la corrección realizada con la regresión lineal múltiple (Cuadro 3.7).

Cuadro 3.7. Estadísticos y parámetro del ajuste con el modelo de regresión lineal múltiple de la humedad relativa, número de datos n=4320.

Figura 4 Relación		R <sup>2</sup>	a	b	c	RSE (%)	EAF (%)
A	HMP45C=f(HMZ_433A1 1)	0.991	0.667	0.290	2.916	2.5	5
B	HMP45C=f(HMZ_433A1 2)	0.990	0.943	0.072	2.653	2.7	
C	HMP45C=f(HMZ_433A1 3)	0.989	1.099	-0.081	2.960	2.8	
D	HMP45C=f(DHT22 1)	0.995	0.809	0.129	-2.406	1.8	2
E	HMP45C=f(DHT22 2)	0.985	1.457	-0.467	-2.927	3.2	

F	$HMP45C=f(DHT22\ 3)$	0.978	1.502	-0.499	-4.225	3.8	
G	$HMP45C=f(DHT11\ 1)$	0.951	1.178	-0.225	6.666	5.8	5
H	$HMP45C=f(DHT11\ 2)$	0.963	1.204	-0.271	7.011	5.0	
I	$HMP45C=f(DHT11\ 3)$	0.948	1.378	-0.435	6.635	6.0	

Regresiones realizadas al 95% de nivel de confianza, EAF es el error admisible del fabricante.

Se muestra datos de tres sensores con diferentes grados de dispersión y los ajustes de las mediciones de humedad relativa con los modelos de regresión lineal simple y múltiple (Figuras 3.5). La corrección con la regresión lineal múltiple de los sensores: HMZ\_433A1 1 (Figuras 3.5 A y B), DHT22 1 (Figuras 3.5 C y D) y DHT11 1 (Figuras 3.5 E y F) disminuyó el RSE en: 0.4, 0.3, y 0.7 % respectivamente con respecto a la regresión lineal simple.

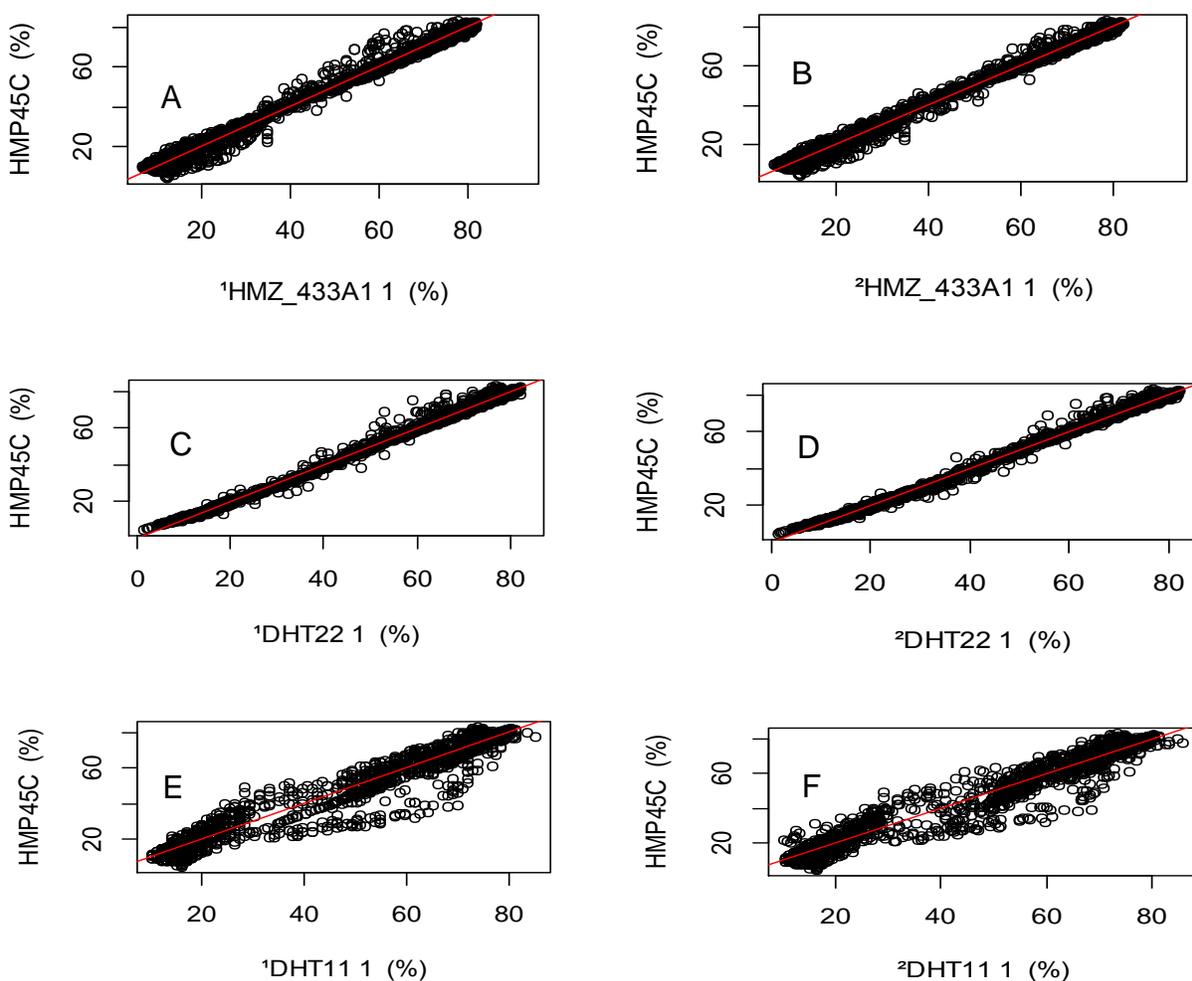


Figura 3.5. Diagramas de dispersión entre la humedad relativa medida con el sensor HMP45C y las medidas, las ajustadas con el modelo de regresión lineal simple y múltiple

de los sensores: A), B) y C) con el sensor HMZ\_433A1; D), E) y F) con el DHT22 1 y G), H) y I) con el DHT11 1, número de datos n=4320.

### 3.3.3. Validación de los modelos

Con datos medidos del 10 de febrero al 12 de marzo de 2018, cada media hora (n = 1440) y los estimados con los modelos obtenidos, se realizaron diagramas de dispersión y se calcularon los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y la raíz del cuadrado medio del error (RSE), se presentan los correspondientes a la variable temperatura (Cuadro 3.8).

Cuadro 3.8. Estadísticas RSE y  $R^2$  obtenidas en la validación de los modelos de temperatura con n = 1440.

Modelo del sensor	Regresión lineal simple		Regresión lineal múltiple	
	$R^2$	RSE	$R^2$	RSE
LM35DZ1	0.989	2.1	0.990	2.0
LM35DZ2	0.989	2.0	0.990	1.9
LM35DZ3	0.988	2.1	0.991	1.9
HMZ_433A1 1	0.995	1.1	0.996	1.1
HMZ_433A1 2	0.997	0.7	0.998	0.6
DHT22 1	0.997	0.9	0.997	0.8
DHT22 2	0.987	1.6	0.987	1.5
DHT22 3	0.983	1.8	0.987	1.5
DHT11 1	0.997	0.7	0.998	0.7
DHT11 2	0.989	1.4	0.987	1.6
DHT11 3	0.984	1.6	0.985	1.7
Type J	0.991	1.4	0.993	1.3

Al comparar los estadísticos ( $R^2$  y RSE) de los modelos calculados en la validación de temperatura (Cuadro 3.8) con los obtenidos en la generación (Cuadros 3.3 y 3.4), los primeros tienen valores de RSE menores o iguales con excepción de los LM35DZ que aumentaron estos. Los modelos para humedad relativa mostraron RSE menores en la validación (Tabla 9) que los obtenidos en la generación (Cuadros 3.6 y 3.7).

Cuadro 3.9. Estadísticas RSE y  $R^2$  obtenidas en la validación de los modelos de humedad relativa con n = 1440.

Modelo del sensor	Regresión lineal simple		Regresión lineal múltiple	
	$R^2$	RSE	$R^2$	RSE
HMZ_433A1 1	0.993	3.2	0.995	2.9
HMZ_433A1 2	0.996	3.1	0.995	3.1

HMZ_433A1 3	0.991	2.8	0.993	2.6
DHT22 1	0.997	1.6	0.997	1.5
DHT22 2	0.998	2.7	0.991	2.3
DHT22 3	0.983	3.2	0.991	2.4
DHT11 1	0.966	4.9	0.969	4.6
DHT11 2	0.973	4.4	0.972	4.4
DHT11 3	0.953	5.6	0.957	5.9

Las pruebas estadísticas de comparación de medias al 95% del RSE y  $R^2$ , entre los calculados con los modelos generados y los de la validación para la temperatura, arrojaron que los de estos últimos todos fueron iguales o mejores con excepción de los correspondientes al sensor LM35DZ y que los RSE fueron mayores y los  $R^2$  menores tanto para la RLS como para la RLM.

Para la humedad relativa con los resultados de comparación de medias se determinó que para los RSE y  $R^2$  de los modelos de validación todos fueron mejores.

### 3.4. Conclusiones

Los intervalos definidos (Temperatura y humedad relativa) para el sensor de referencia (HMP45C) evidencian que sus errores están dentro de la precisión certificada por el fabricante, lo que permite que se use como patrón. Las medias de los errores de los intervalos determinados para los sensores de bajo costo en las variables temperatura y humedad relativa indican que todos deben ser calibrados antes de iniciar las mediciones en un experimento. La corrección realizada con la regresión lineal múltiple en las dos variables reduce los errores estándar de los residuales (RSE) obtenidos con la regresión lineal simple o en su defecto son iguales. Los RSE de la regresión lineal múltiple para la temperatura define que los tres sensores DHT11 y el Type J están dentro de la precisión definida por su fabricante. Para la humedad relativa los sensores que cumplen con la precisión que indican cada uno de sus fabricantes al realizar la corrección con regresión lineal múltiple son: tres HMZ\_433A1, un DHT22 y un DHT11. Los RSE y  $R^2$  de la validación para la temperatura, todos fueron mayores o iguales solamente los del sensor LM35DZ no, para la humedad relativa todos fueron mejores.

De todo lo anterior se deduce lo importante que es realizar la calibración de los sensores de bajo costo con un patrón, y además se tiene elementos para decidir cuál usar en función de las restricciones del proyecto a realizar.

### 3.5. Literatura citada

- Abbasi, A. Z., Islam, N., & Shaikh, Z. A. (2014). A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces*, 36(2): 263-270.
- Andrade, C.; Alonso, C. y Sarria, J. (1998). Influencia de la humedad relativa y la temperatura en las velocidades de corrosión de estructuras de hormigón. *Materiales de construcción*. 8(251): 5-17.
- Aosong Electronics Co. (2017). Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302). 1: 1-10.
- Aosong Electronics Co. 2017. Temperature and humidity module DHT11 Product Manual. 1: 1-8.
- Campbell, Sci Inc. (2009). Model HMP45C Temperature and Relative Humidity probe. Instruction Manual. 1: 1-20.
- Core Team R. (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. (consultado el 1/08/2017)
- Cruz, B. F.; Rodríguez, J. C.; Whatts, C. J.; Vivoni, E. R.; Yepes, E. A.; Robles, M. A.; Garatuza, P. J.; Tarin, T. y Schreiner, M. A. P. (2013). Calibración *in situ* del sensor cosmos para determinar humedad del suelo en escalas intermedias (~1 km). *Terra latinoamericana*. 31 (4): 315-324.
- Draper, N. R.; Smith, H. (2014). Applied regression analysis, 2nd ed. John Wiley & Sons (Vol. 326).;Wisconsin, USA, 2014. 709 pp.
- Ferrante, A.; Mariani, L. (2018). Agronomic Management for Enhancing Plant Tolerance to Abiotic Stresses: High and Low Values of Temperature, Light Intensity, and Relative Humidity. *Horticulturae*, 4(21): 2-19.
- Florentino, A. 2006. Métodos para medir el contenido de agua en el suelo. *Venezuelos*. 14: 48-70.
- Ghitron Techology Co. (2017). Product Specifications HMZ-433A1. 1: 1-5.
- González, C. J., Núñez, P. B y Vilorio, M, P. 2012. Sistema de monitoreo en tiempo real para la medición de temperatura. *Scientia et Technica* Año XVII, No 50: 128-131
- Latorre, B. A. y Rioja, M. E. (2002). Efecto de la temperatura y de la humedad relativa sobre la germinación de conidias de botrytis cinerea. *Ciencia e Investigación Agraria*. 29: 67-71.
- Lowen AC, Mubareka S, Steel J, Palese P. (2007). Influenza Virus Transmission Is Dependent on Relative Humidity and Temperature. *PLoS Pathog* 3(10): pp151. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.0030151>

- Lundquist, J. D., and Lott, F. (2008). Using inexpensive temperature sensors to monitor the duration and heterogeneity of snow-covered areas. *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 44: 1-13.
- Martinelli, G. and Carotta, M. C. (1995). Thick-film gas sensors. *Sensors and Actuators. B* 23: 157-161.
- Miloshevich, L. M.; Vomel, H.; Paukkunen, A.; Heymsfield, A. J. and Oltmans, S. J. (2001). Characterization and Correction of Relative Humidity Measurements from Vaisala RS80-A Radiosondes at Cold Temperatures. *American Meteorological Society*. 1: 135-156.
- Nacional Semiconductor Corporation (NSC). (2000). LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. Data Sheet. 1. 13 pp.
- Pulido, A. R. y García, P. Y. (2019). H Ayuntamiento de Texcoco. consulta en línea en <https://es.wikipedia.org/wiki/Texcoco>.
- Quiñones, A. P., Godoy, D. A., & Sosa, E. O. (2013). Redes Inalámbricas de Sensores: Una experiencia en la Industria del Té. *42 jornada argentina de informática*. 161-171.
- Ribeiro da Cunha, A. (2015). Evaluation of measurement errors of temperature and relative humidity from HOBO data logger under different conditions of exposure to solar radiation. *Environ Monit Assess*. 187(5): 236:1-11.
- Savage, M. J. Field evaluation of polymer capacitive humidity sensors for Bowen ratio energy balance flux measurements. *Sensors* (2010), 10(8): 7748-7771.
- Schugurensky, C. y Capraro, F. (2013). Control Automático de Riego Agrícola con Sensores Capacitivos de Humedad de Suelo. Aplicaciones en Vid y Olivo. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/228374116>
- Singh, B.; Kishan, H. and Singh, Y. P. (2008). Calibration of Spetial Relative Humidity and Temperature (RHT) Sensors and Evaluation and Expression of Uncertainty in the Measurement. *Journal of Metrology Society of India*. 23(2): 115-121.
- Tei. (2017). Tipo J Especificación Técnica Tablas de Referencia N. I. S. T. 1:1-4
- Traversa E. (1993). Ceramic Sensors for humidity detection: the sate-of-the-art and future developments. *Sensors and Actuators. B* 23:135-156.
- Whiteman, C. D.; Hubbe J. M. and Shaw W.J. (2000). Evaluation of an inexpensive Temperature Datalogger for Meteorological applications. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 7:77-80.
- Yeo, T. L.; Sun, T. Grattan, K.T.V.; Parry, D.; Lade, R. and Powel, B. D. (2005). Characterisation of a polymer-coated fibre Bragg grating sensor for relative humidity sensing. *Sensors and Actuators. B* 110: 148–155.

## 4. MODELO EMPÍRICO PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA HORARIA EN INVERNADERO

Martin Azúa Barrón<sup>1</sup>, Mario Alberto Vázquez Peña<sup>2</sup>

### RESUMEN

#### Resumen

En México el 70 % de los invernaderos son menores a 0.5 ha y con escasa tecnología, por lo que es necesario generar procedimientos en apoyo a estos productores como evaluar la evapotranspiración de referencia. El objetivo fue generar un modelo empírico para estimar la evapotranspiración de referencia en invernadero. Toda vez que no hay un método estándar como el de Penman-Monteith para estas condiciones, algunas investigaciones en este sentido proponen modelos donde la velocidad del viento es cercana a cero. Se generó un modelo con el método de regresión lineal al usar como variables independientes la temperatura, humedad relativa y el déficit de presión de vapor y como dependiente la evapotranspiración de referencia estimada con Penman-Monteith, medidos en el interior de un invernadero en el estado de México. Se encontró que el modelo tiene un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.85 con respecto al modelo de Penman-Monteith cuando se incluyen las tres variables. El modelo generado se validó al utilizar valores horarios con respecto a los de Penman-Monteith, Abtew y Bonachela y se obtuvieron valores de  $R^2$  de: 0.92, 0.93 y 0.88 y de RSE ( $\text{mm h}^{-1}$ ) de: 0.021, 0.019 y 0.025 respectivamente.

**Palabras clave:** Evapotranspiración de referencia, invernadero, Estación automática, modelo.

<sup>1</sup>Tesista

<sup>2</sup>Director

#### Abstract

In Mexico 70% of the greenhouses are less than 0.5 ha and with little technology, so it is necessary to generate procedures in support of these producers as to evaluate the reference evapotranspiration. The objective was to generate an empirical model to estimate the reference evapotranspiration in the greenhouse. Since there is no standard method such as Penman-Monteith for these conditions, some research in this regard proposes models where the wind speed is close to zero. A model with the linear regression method was generated by using temperature, relative humidity and vapor pressure deficit as independent variables and as a dependent reference evapotranspiration estimated with Penman-Monteith, measured inside a greenhouse in the state from Mexico. It was found that the model has a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.85 with respect to the Penman-Monteith model when all three variables are included. The model generated was validated by using hourly values with respect to those of Penman-Monteith, Abtew and Bonachela and values of  $R^2$  were obtained of: 0.92, 0.93 and 0.88 and of RSE ( $\text{mm h}^{-1}$ ) of: 0.021, 0.019 and 0.025 respectively.

**Keywords:** Reference evapotranspiration, greenhouse, automatic station, model.

## 4.1. Introducción

El término evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) se define como la cantidad de agua evapotranspirada por un cultivo de referencia como el pasto con una altura de 0.12 m, con una resistencia de la superficie de 70 s m<sup>-1</sup> y un albedo de 0.23, muy parecida a la evaporación de una superficie de pasto de altura uniforme y creciendo activamente, que sombrea la superficie del suelo y sin limitantes de agua, (Allen *et al.*, 2006).

La evapotranspiración es uno de los componentes de los balances de agua en los suelos cultivados, por lo que su medición o estimación diaria es necesario, en el diseño y manejo del sistema de irrigación, la simulación del cultivo y los estudios hidrológicos (Allen *et al.*, 1989), en climatología y agricultura (Scheff and Dargan, 2014) y en la evaluación de los efectos del cambio climático en los cultivos, donde se espera que las condiciones más calurosas y secas aumenten las demandas de agua (Espadafor *et al.*, 2011; Moreno *et al.*, 2011). En regiones donde hay escasez de agua se requiere optimizar las prácticas de irrigación y suministrar al cultivo en la medida de lo posible el agua que necesita, al evitar el desperdicio (Orgaz *et al.*, 2005).

Para aquellas estructuras que modifiquen las condiciones de microclima donde se producen cultivos, es necesario hacer estudios específicos para estimar adecuadamente las necesidades de agua de estos, mejorar el manejo de riego y la eficiencia del uso del agua (Moran, *et al.*, 2014). Aunque se han diseñado aparatos llamados Atmómetros estos cuando han sido evaluados dan resultados poco satisfactorios (Mendonca *et al.*, 2003). Los lisímetros son adecuados para determinar la evapotranspiración, pero son caros y difíciles de construir (Eslamian *et al.*, 2009). El agua en zonas áridas es un insumo muy valioso por lo que entender y cuantificar la ET<sub>o</sub> es una necesidad. Vásquez *et al.* (2011) indican que para condiciones particulares se han evaluado diferentes métodos a fin de determinar el más adecuado y mencionan los siguientes: Penman, Romanenko, Jensen y Haise, McGuinness y Bordne, Hargreaves y Samani, Kimberly-Penman, Penman-Monteith y Oudin. Muchas veces el balance vertical de energía no es adecuado para estimar la evapotranspiración de pequeñas áreas y la aplicación del balance completo de energía presenta serias limitaciones (Tanner, 1960).

Los modelos que predicen las condiciones al interior de los invernaderos de plástico es un quehacer que ha sido abordado por algunos investigadores (Reyes-Rosas *et al.*, 2009; Fernández *et al.*, 2010; Allen *et al.*, 1998). Los modelos que relacionan las condiciones meteorológicas del exterior con las propiedades dentro de las estructuras (invernaderos o mallas sombra), para estimar la ETo en el interior han sido desarrolladas exitosamente con errores menores al 10 por ciento (Moran *et al.*, 2014). Aunque el método de Penman-Monteith es el más recomendado, este requiere de datos meteorológicos que muchas veces no están disponibles en países en desarrollo, por lo que se hace necesario utilizar modelos que permitan estimar la ETo en función de la temperatura (T), humedad relativa (HR) y la altura del lugar sin involucrar datos de radiación (Segura y Ortiz, 2017; Ahmadi and Fooladmand, 2008).

La ETo se estima por muchos métodos, pero en cultivo en invernaderos es muy común la práctica de utilizar el tanque tipo A por su simplicidad, bajo costo y la posibilidad de obtener estimaciones diarias, aunque su uso es objeto de controversia al no saber con exactitud cuál factor utilizar para estimar la ETo y el área que se deja de producir por el espacio que ocupa en el interior del invernadero (Fernandes *et al.*, 2003). La evapotranspiración de referencia al interior de los invernaderos es siempre menor que en el exterior (Fernandes *et al.*, 2003, Orgaz *et al.*, 2005). Se ha encontrado que el tanque tipo A en el interior del invernadero con un factor de 0.79 es adecuado para climas mediterráneos (Fernández *et al.*, 2010). La ETo al variar con las condiciones climáticas tiene un comportamiento estacional muy diferente tanto en verano como en invierno (Li *et al.*, 2003).

En México en el 2010 se contaba con 18,127 unidades de producción de agricultura protegida cubriendo una superficie de 12,540 ha, lo que indica un promedio de superficie de 0.69 ha por unidad de producción (FIRA, 2010). Según González (2013), se estimó en México una superficie bajo la modalidad de agricultura protegida de 20,000 ha. La mayoría son unidades de producción menores a 0.5 ha, las que tienen limitado acceso a la tecnología, capacitación y asistencia técnica (Cedillo y Calzada, 2012).

Por esto último se relacionó la evapotranspiración de referencia calculada con el método de Penman-Monteith al utilizar los datos de una estación meteorológica automática que se ubicó en el interior del invernadero con los datos de temperatura (T), humedad relativa

(HR) y déficit de saturación (DS) para encontrar un modelo en función de estas variables que estime la ETo al interior del invernadero de una manera aceptable. Toda vez que se ha vuelto relativamente fácil medir T, HR y DS al interior de los invernaderos, cosa que no sucede con las variables que tienen que ver con la radiación neta debido a los altos costos que aún significa la adquisición de radiómetros netos.

## 4.2. Materiales y métodos

El trabajo se realizó en la estación meteorológica del departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo en un invernadero (Figura 4.1) con ventilación lateral, con un área útil para el cultivo de 105 m<sup>2</sup>, un volumen aproximado de aire 550 m<sup>3</sup>, cubierta de plástico y estructura de metal con orientación Norte-Sur. La localización geográfica es latitud N 19.483 y longitud W 98.900° con una altura de 2250 msnm. El clima de la localidad es de tipo Cb(Wo)(W)(i')g, que corresponde a un templado subhúmedo con lluvias en verano, una época seca en invierno y con oscilación térmica que varía entre 5 a 7 °C. La temperatura media anual es de 17.2 °C, el mes más caliente es mayo con una temperatura media de 19.7 °C y con 14.1 °C enero es el más frío. La precipitación media anual es de 598 mm con vientos dominantes del Sur (Pulido y García, 2019).



Figura 4.1. Vista general del Invernadero.

### 4.2.1. Instrumentación y equipo de medición

La toma de datos se realizó con una estación meteorológica automática ubicada en el interior del invernadero (Figura 4.2), equipada con un datalogger Campbell CR10x, con un sensor HMP45C para la medición de temperatura y humedad relativa, el piranómetro SP-LITE para la radiación solar, anemómetro para la velocidad y veleta para la dirección del viento. Se midieron las variables indicadas cada hora desde el primero de septiembre al

13 de diciembre de 2017 y del 28 de enero al 2 de diciembre de 2018 con la ventilación totalmente cerrada, para evaluar el modelo en la estimación de  $ET_0$  cuando hay manejo de la ventilación, las ventanas laterales se abrieron a 25, 50 y 75 % durante dos días cada apertura en el mes de septiembre de 2017.



Figura 4.2. Estación automática al interior del invernadero.

#### 4.2.2. Ecuación de Penman-Monteith para el cálculo de la $ET_0$

Las condiciones en invernaderos son diferentes en el cálculo de la  $ET_0$ , el aire se mueve a bajas velocidades, cercanas a cero, lo que afecta el componente aerodinámico de la ecuación de Penman-Monteith.

El equipo CR10x según Campbell (1995) tiene programado un algoritmo para calcular la  $ET_0$  con la Ecuación (4.1):

$$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G)}{\lambda(\Delta + \gamma^*)} + \frac{\gamma^* M_w(e_a - e_d)}{R\Theta r_v(\Delta + \gamma^*)} \quad (4.1)$$

Donde:  $ET_0$  es la Evapotranspiración de referencia ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$  o  $\text{mm s}^{-1}$ );  $R_n$  es la Radiación Neta ( $\text{kW m}^{-2}$ );  $G$  es la densidad de flujo de calor del suelo ( $\text{kW m}^{-2}$ );  $M_w$  masa molecular del agua ( $0.018 \text{ kg mol}^{-1}$ );  $R$  constante de los gases ( $8.31 \times 10^{-3} \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );  $\Theta$  es la temperatura Kelvin (293K);  $(e_e - e_d)$  déficit de presión de vapor del aire (kPa);  $\lambda$  calor latente de vaporización del agua ( $2450 \text{ kJ kg}^{-1}$ );  $r_v$  es la resistencia de la superficie a la vaporización ( $\text{s m}^{-1}$ );  $\Delta$  pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) y  $\gamma^*$  es la constante psicométrica aparente ( $\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

### 4.2.3. Otros modelos propuestos

Al no existir un método estandarizado para estimar la evapotranspiración de los cultivos en los invernaderos, otros autores han propuesto ecuaciones para estimar la  $ET_0$  al interior de estos, como la de Bonachela *et al.* (2006), consta de dos partes:

$$DJ \leq 220 \quad ET_0 = (0.288 + 0.0019 * DJ) * Ra * \tau \quad (4.2) \text{ a)}$$

$$DJ > 220 \quad ET_0 = (1.339 - 0.00288 * DJ) * Ra * \tau \quad \text{b)}$$

Donde:  $ET_0$  Evapotranspiración en  $\text{mm d}^{-1}$ ; DJ día juliano;  $Ra$  Radiación global en  $\text{mm d}^{-1}$  y  $\tau$  la transmisibilidad del invernadero la cual se obtiene dividiendo la radiación solar del interior y exterior.

O la propuesta por Liu *et al.* (2015) que es:

$$ET_0 = k(0.019T + 0.08)Q/59 + c \quad (4.3)$$

Donde:  $Q$  es la radiación solar total en  $\text{Cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$ ;  $T$  es la temperatura media en  $^{\circ}\text{C}$ ;  $k$  y  $c$  son constantes que se obtienen al resolver la Ecuación (4.3) con regresión lineal. Una vez obtenidos los últimos la ecuación queda en función de  $Q$  y  $T$ .

Abtew (1996) propuso una expresión para la estimación de la  $ET_0$ , en la que no incluye la velocidad del viento ni la humedad relativa, fue derivada para las condiciones del sur de Florida de HR alta y velocidad del viento baja por lo anterior resulta atractiva para utilizarse en invernaderos:

$$ET_0 = 0.408 * 0.01786 * R_s * T_{max} \quad (4.4)$$

Donde:  $ET_0$  es la evapotranspiración en  $(\text{mm d}^{-1})$ ,  $R_s$  es la Radiación solar  $(\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1})$  y  $T_{max}$  es la temperatura máxima del aire  $(^{\circ}\text{C})$ .

### 4.2.4. Déficit de saturación (DS)

Una metodología detallada del cálculo del déficit de saturación del aire se presenta en Allen *et al.* (1998):

$$DS = (e_s - e_a) \quad (4.5)$$

Donde:  $DS$  es el déficit de saturación en  $\text{mmHg}$ ;  $e_s$  la tensión de vapor a saturación del aire y  $e_a$  la tensión de vapor del aire, ambas en  $\text{mmHg}$ .

#### 4.2.5. Regresión lineal

La técnica de regresión lineal simple o múltiple es muy utilizada y donde los parámetros y estadísticos de regresión se estiman con software (por ejemplo, Excel, R Project, Open Office, etc). Para la teoría ver Draper and Smith (2014), en forma general se establece la regresión lineal múltiple de la siguiente manera:

$$y = b_0x_1 + b_1x_2 + \dots + b_nx_{n+1} + b_{n+1} + \varepsilon_i \quad (4.6)$$

Donde:  $x_i$  son variables independientes simples o compuestas,  $y$  es la variable dependiente,  $b_i$  son parámetros de regresión y  $\varepsilon_i$  son los errores.

#### 4.2.6. Desarrollo teórico de los modelos

Se realizaron diagramas de dispersión entre la ETo estimada con P-M en función de las variables (T, HR y DS) para ver sus tendencias.

Con los datos (T, HR y DS) correspondientes a los primeros 313 días de los años 2017 y 2018, se propusieron modelos con variables simples y complejas que se ajustaron al modelo general (ecuación 6), y se obtuvieron los parámetros de regresión y los estadísticos para cada modelo.

#### 4.2.7. Validación del modelo seleccionado

De los modelos generados se seleccionó el mejor, se calculó la ETo (Cuadro 4.1) horaria y diaria con los datos (últimos 100 días de la serie) que no se utilizó para la generación de los modelos y se hicieron las gráficas temporales con la ETo calculada con Penman-Monteith. También se obtuvieron los diagramas de dispersión para obtener los parámetros de ajuste con la regresión lineal simple, al tomar como variable dependiente el valor de ETo del modelo seleccionado y como variable independiente el calculado con la estación automática.

#### 4.2.8. Desempeño del modelo

Se compararon los valores estimados de la ETo del modelo generado (horaria y diaria) con los valores de ETo calculados con los métodos de Abtew (1996) y Bonachela *et al.* (2006), Que se representaron en gráficas temporal y de dispersión a las que se les obtuvo los coeficientes y estadísticos de regresión.

Adicionalmente se midió (T y HR) durante seis días en el invernadero del mes de septiembre (del 1 al 6), donde se hizo un manejo de la ventilación lateral, cada dos días se varió el porcentaje de apertura (25, 50 y 75 %). Donde se calculó la ETo con el método propuesto y se comparó a través de regresión lineal simple con el método de Penman-Monteith para evaluar su ajuste.

### 4.3. Resultados y discusión

Los datos medidos (Radiación, T y HR) con la estación automática al interior del invernadero se obtuvieron cada hora a partir del día juliano 244 del 2017 al 336 del 2018 con un número de datos horarios (N) de 9912. Se muestran datos (parciales) en la Figuras 4.3 para radiación y la 4.4 para temperatura y humedad relativa, así mismo para la ETo calculada con el método de Penman-Monteith (Figura 4.5).

Donde la velocidad del viento se manifestó con valores muy bajos y por tal razón no se presentan.

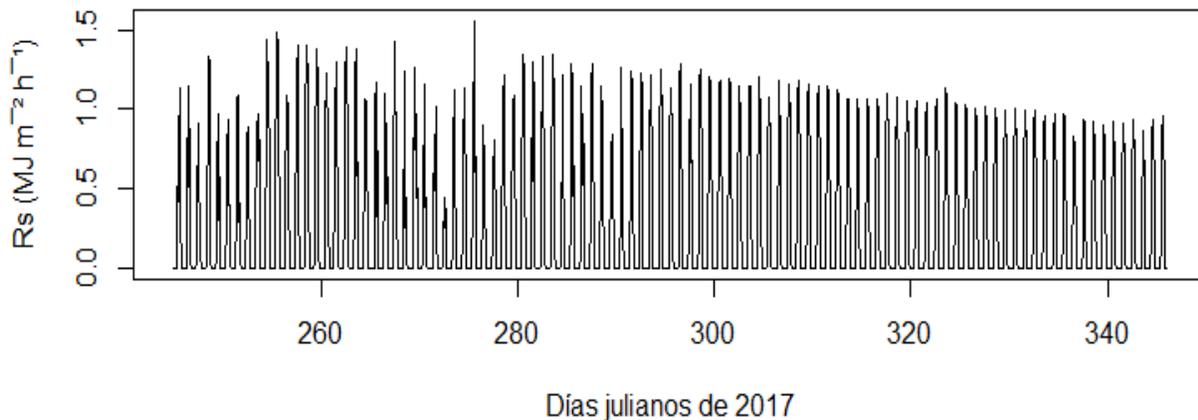


Figura 4.3. Variación temporal de la radiación solar horaria en el invernadero en 2017 (100 días) con n=2400.

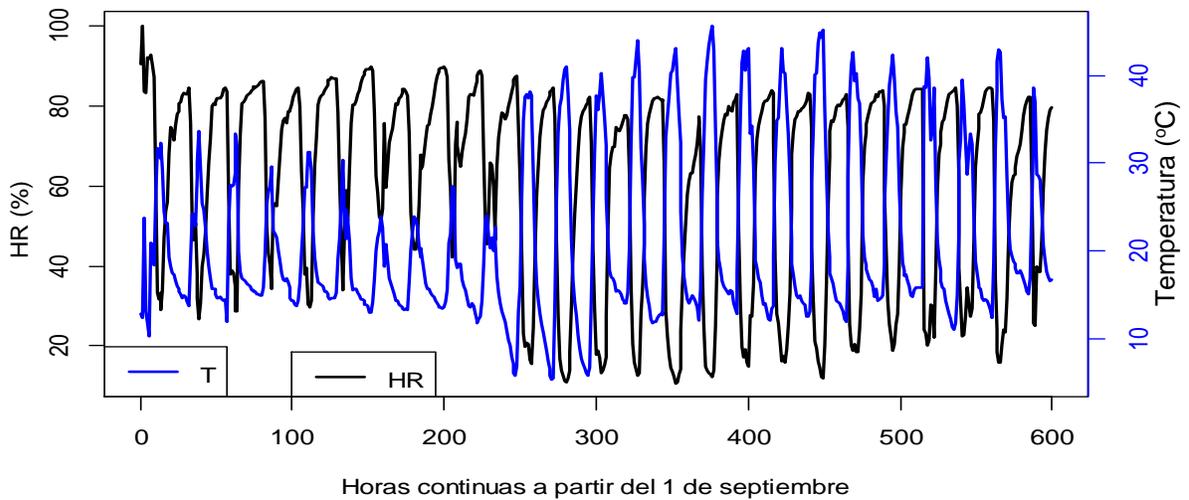


Figura 4.4. Variación temporal de la T y la HR medidas cada hora en el invernadero el mes de septiembre de 2017 (primeros 25 días), temperatura en °C (azul) y humedad relativa en % (negro) con n=600.

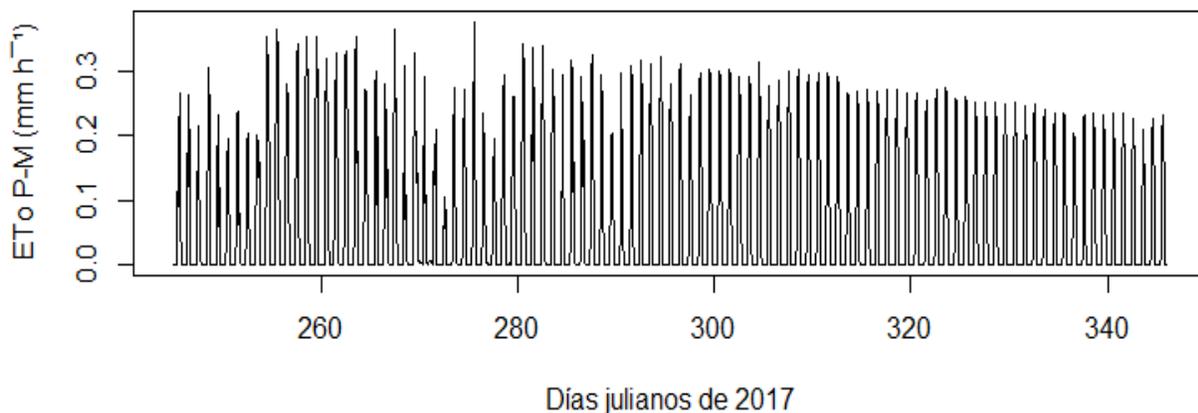


Figura 4.5. Variación temporal de la ETo horaria estimada con Penman-Monteith en el invernadero en 2017 (100 días) con n=2400.

#### 4.3.1. Visualización del comportamiento de la ETo en función de la HR, la T y DS

La relación entre la ETo con la temperatura es: al aumentar la T aumenta la ETo y se relacionan con un polinomio de segundo grado, (Figura 4.6 A).

Para la variación de la ETo con respecto a la HR, se observa que porcentajes bajos de HR se relaciona con valores altos de evapotranspiración y su relación es logarítmica (Figura 4.6 B), la relación entre la ETo con el DS es un polinomio de segundo grado, se observa que para valores del DS altos se tiene ETo altos (Figura 4.6 C).

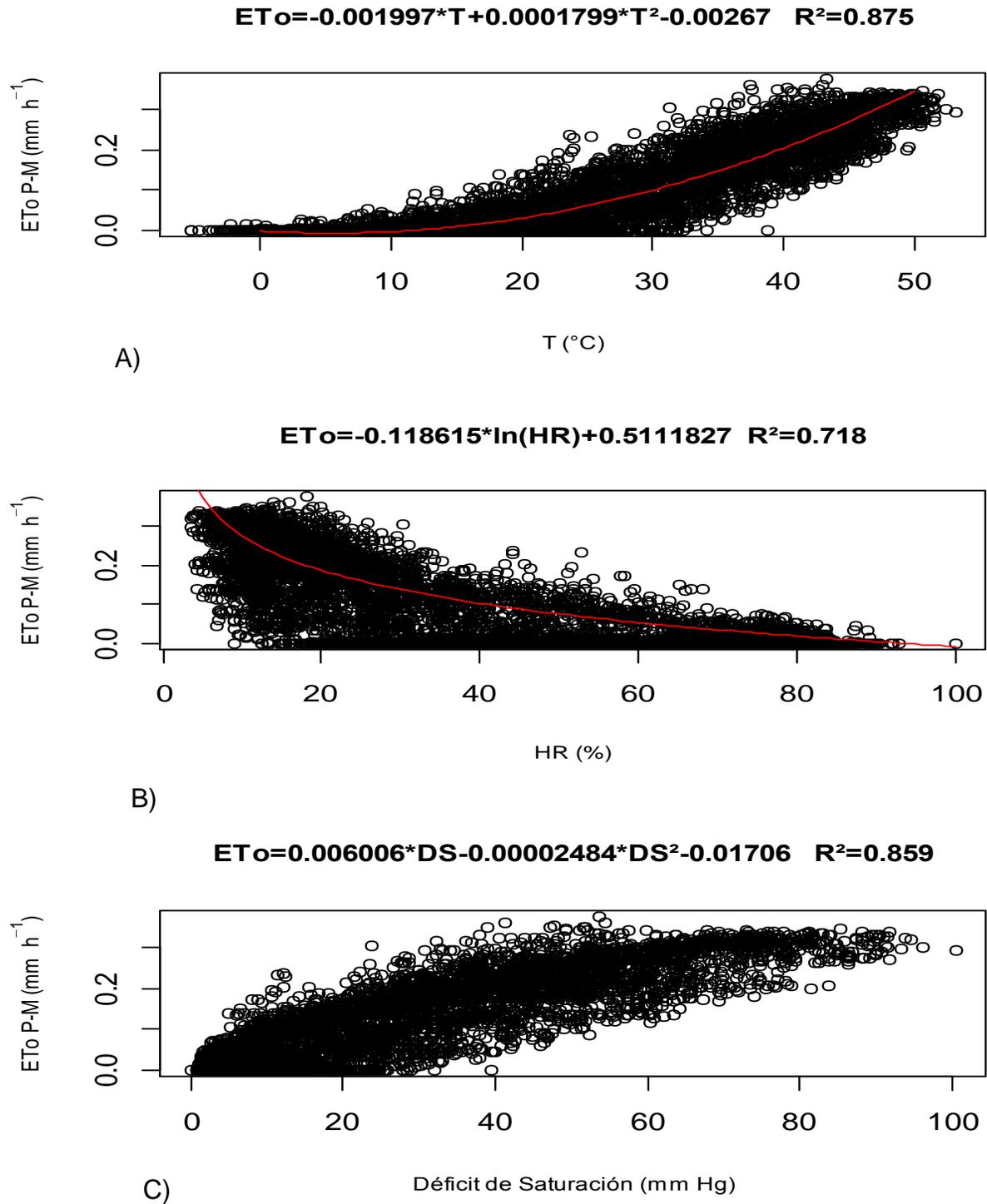


Figura 4.6. Relación de la  $ET_o$  calculada con Penman-Monteith con respecto a las variables A) Temperatura, B) Humedad Relativa y C) Déficit de Saturación (DS) con datos cada hora durante el periodo de medición (413 días)  $n = 9912$ .

### 4.3.2. Generación de los modelos en función de la T, HR y DS

Se utilizaron los datos horarios de T, HR, DS y ETo calculados con la estación automática de los primeros 313 días de la serie, los que se ajustaron a diferentes modelos mediante la regresión lineal simple y múltiple, a cada modelo se le obtuvo los coeficientes de regresión, el coeficiente de determinación y los errores típicos (Cuadro 4.1). Al observar los modelos lineales de una sola variable (ET<sub>01</sub>, ET<sub>02</sub> y ET<sub>03</sub>) se tiene mejor ajuste con ET<sub>03</sub> donde la variable independiente es DS. Además, se tiene que una regresión lineal simple (ET<sub>03</sub>) en función de DS, logra mejor ajuste que una regresión lineal múltiple (ET<sub>04</sub>) cuando las variables independientes son la HR y T. Al comparar los diferentes modelos, se determina que la ETo está ligada estrechamente con el DS en forma lineal (ET<sub>03</sub>) con un R<sup>2</sup>=0.84 y un error típico muy similar a los modelos que dependen de más variables. Conforme el número de variables aumenta y el modelo se hace más complejo, los modelos incrementan su ajuste, lo cual se manifiesta en la R<sup>2</sup> que numéricamente aumenta de 0.63 a 0.88 y el error típico disminuye de 0.064 a 0.036 mm h<sup>-1</sup>.

Cuadro 4.1. Coeficientes de determinación y error típico de los modelos generados con relación a ETo de Penman-Monteith estimados por la estación automática.

Modelo	R <sup>2</sup>	Error típico (mm h <sup>-1</sup> )
$ET_{01} = f(T)$	0.80	0.047
$ET_{02} = f(HR)$	0.63	0.064
$ET_{03} = f(DS)$	0.84	0.042
$ET_{04} = f(T + HR)$	0.81	0.047
$ET_{05} = f(HR + DS)$	0.84	0.042
$ET_{06} = f(T + HR + DS)$	0.85	0.041
$ET_{07} = f(T + HR + DS + T^2)$	0.88	0.037
$ET_{08} = f(T + HR + DS + T^2 + HR^2)$	0.88	0.037
$ET_{09} = f(T + HR + DS + T^2 + HR^2 + DS^2)$	0.88	0.036
$ET_{010} = f(T + HR + DS + T^2 + HR^2 + DS^2 + THR)$	0.88	0.036
$ET_{011} = f(T + HR + DS + T^2 + HR^2 + DS^2 + THR + TDS)$	0.88	0.036
$ET_{012} = f(T + HR + DS + T^2 + HR^2 + DS^2 + THR + TDS + HRDS)$	0.88	0.036

### 4.3.3. Análisis del modelo $ET_{o6}$

Al hacer el análisis del Cuadro 4.1 se define que la  $ET_{o6}$  tiene un  $R^2$  y un error típico de 0.85 y 0.041 respectivamente, esto indica que es un modelo adecuado, aunque se tienen otros con  $R^2$  mayores en 0.03 y error típico menor en 0.005, lo que no justifica su uso. El modelo  $ET_{o6}$  se seleccionó para hacer un análisis más detallado y se compara con los modelos de Abtew (1996) y Bonachela *et al.* (2006).

$$ET_{o6} = f(T, HR, DS) \quad (4.7)$$

### 4.3.4. El modelo $ET_{o6}$ y sus coeficientes

$$ET_{o6} = 0.002905T + 0.0004172HR + 0.003150DS - 0.07103 \quad (4.8)$$

Con la condición de si  $ET_{o6} < 0$ , entonces  $ET_{o6} = 0$

Donde:  $ET_{o6}$  ( $\text{mm h}^{-1}$ ),  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y  $HR$  (%) y  $DS$  ( $\text{mmHg}$ )

El peso de las variables en la varianza de  $ET_{o6}$  es: temperatura 31.62, humedad relativa 9.23 y  $DS$  de 59.15 %.

### 4.3.5. Validación del modelo

Con los datos medidos de los días julianos del 237 al 336 del 2018 (que no se utilizaron para la generación del modelo  $ET_{o6}$ ) se estimó la  $ET_{o6}$  horaria y se comparó con las estimaciones de los métodos de: Penman-Monteith (Campbell., 1995), de Abtew (1996) (ecuación 4) y el de Bonachela *et al.* (2006) (Ecuaciones 4.2 a y 4.2 b) (Figura 4.7).

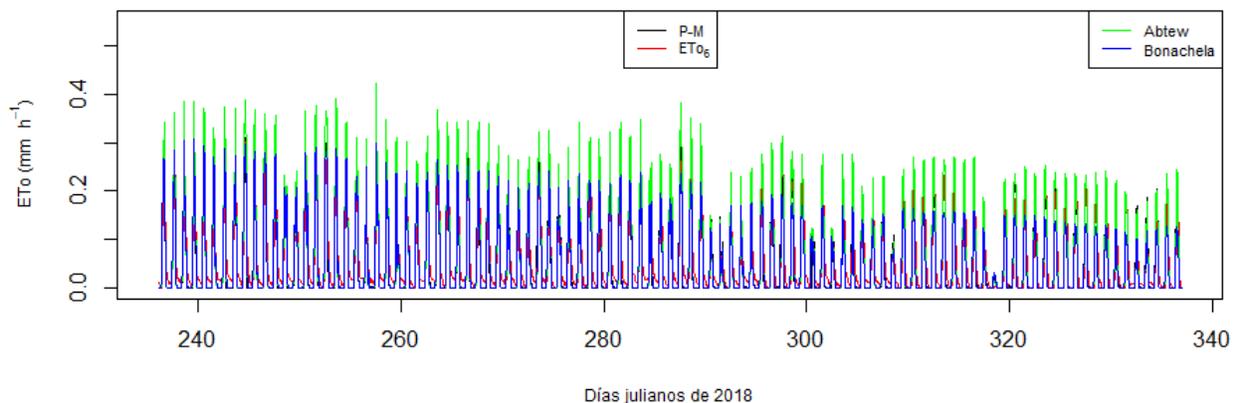


Figura 4.7. Variación temporal de los datos del método de Penman-Monteith y los estimados con los modelos  $ET_{o6}$ , Abtew y Bonachela *et al.* (2006) (100 días del 2018)  $n=2400$ .

En los que dependiendo de los datos meteorológicos con los que se cuente se hacen simplificaciones y por tal razón se generan diferencias en el cálculo de la ETo. En la figura 4.7 se aprecia el ajuste temporal de los diferentes modelos.

En la Figura 4.8 se presentan los diagramas de dispersión entre los datos horarios del modelo propuesto ( $ET_{o6}$ ) con los de: P-M, Abtew y Bonachela, además los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y los errores típicos. Entre  $ET_{o6}$  y Penman-Monteith se tiene un  $R^2$  de 0.92 y error típico de 0.021 (Figura 4.8 A) con los modelos de Abtew y Bonachela sus estadísticos  $R^2$  y error típico son 0.93, 0.019 y 0.88, 0.025 respectivamente (Figura 4.8 B y Figura 4.8 C). Con estos resultados se observa que el modelo propuesto para estimar la  $ET_{o6}$ , presenta valores muy similares con los modelos comparados, por lo que se recomienda su uso.

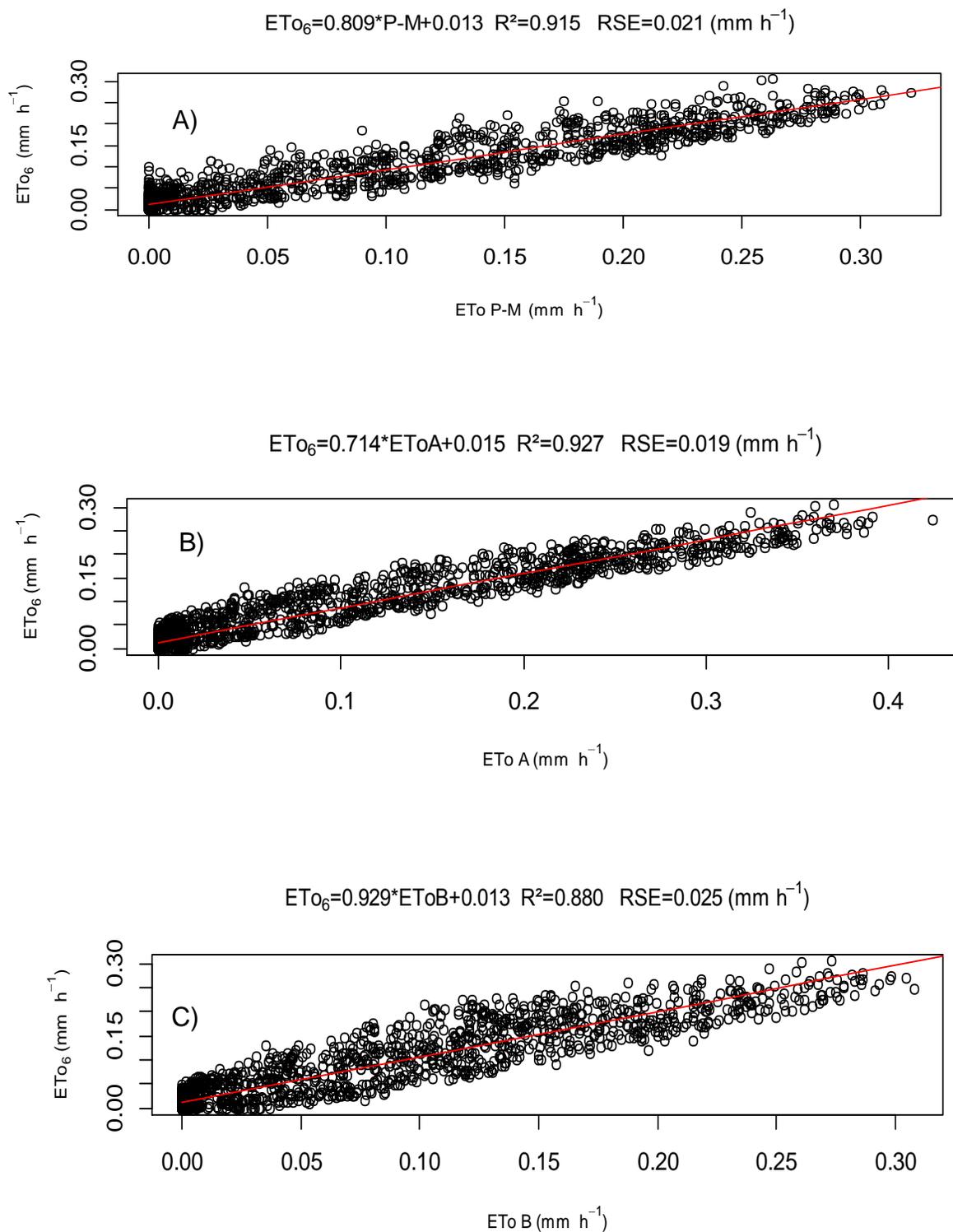


Figura 4.8. ETo horarias estimados con el modelo  $ET_{o6}$  y los calculados con: A) Penman-Monteith, B) Abtey y C) Bonachela para el periodo de validación (100 días)  $n = 2400$ .

Los estadísticos calculados con Excel (Microsoft., 2007) que presenta el modelo lineal de la Figura 4.8 A se tienen en el Cuadro 4.2.

Cuadro 4.2. Estadísticos correspondientes a la regresión de los datos mostrados en la Figura 4.8 A.

Resumen	
<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0.957
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.916
R <sup>2</sup> ajustado	0.915
Error típico	0.021
Observaciones	2400

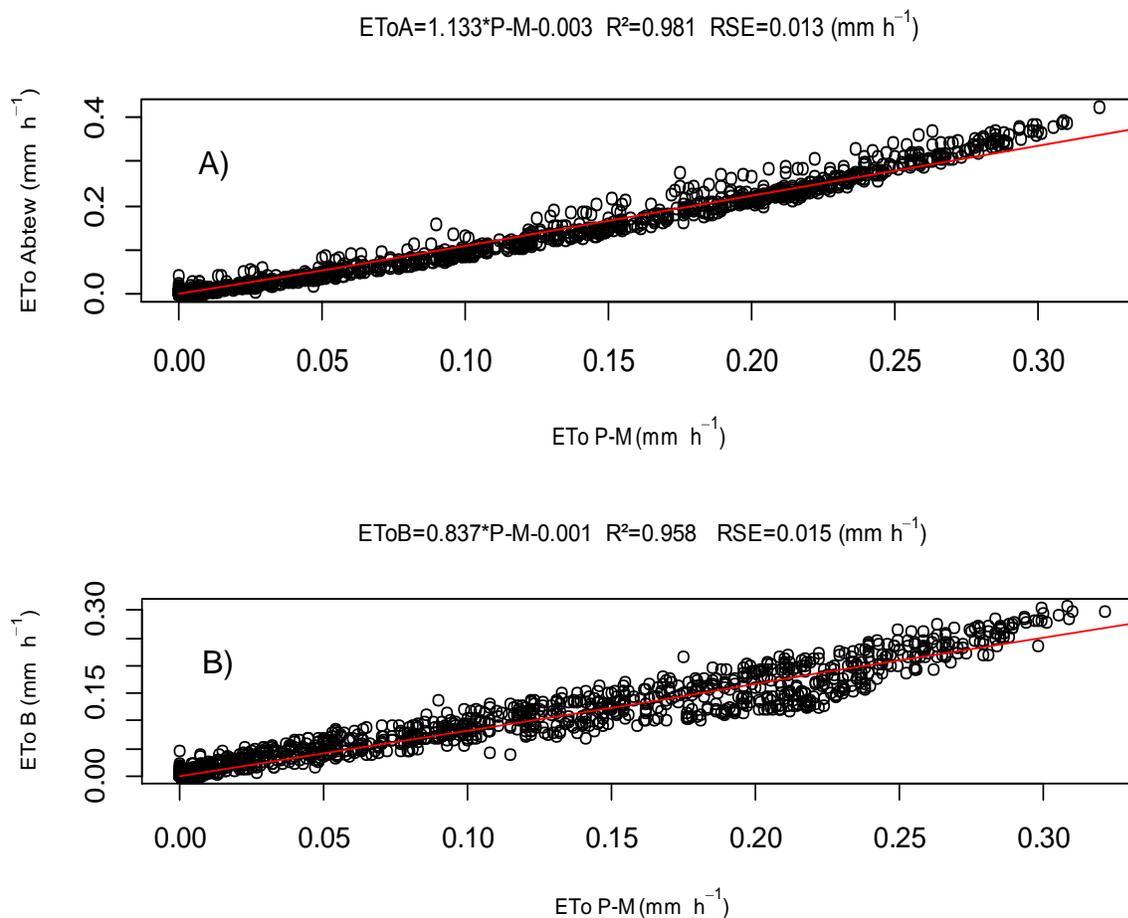


Figura 4.9. A) Tendencia entre la ETo P-M (Penman-Monteith) y ETo Abtew, B) ETo P-M y ETo Bonachela para el periodo de validación (100 días) n=2400.

En la Figura 4.9, se observa la tendencia entre los valores horarios de la ETo de Penman-Monteith y los valores horarios calculados con los modelos de: A) Abtew y B) Bonachela así como, su  $R^2$  y error típico. Al comparar los estadísticos ( $R^2$ ) y el error típico de Penman-Monteith versus los modelos de: Abtew (Figura 4.9 A), Bonachela (Figura 4.9 B) y ETo<sub>6</sub> (Figura 4.8 A) se define que los tres tienen un comportamiento semejante con los datos obtenidos con Penman-Monteith.

#### 4.3.6. Comportamiento de los modelos a nivel diario

Se acumuló diariamente los datos horarios de los valores de ETo de los métodos: Penman-Monteith, ETo<sub>6</sub>, Abtew y Bonachela de los últimos días (utilizados para la validación de los modelos) (Figura 4.10).

Los valores diarios de los modelos de Abtew y ETo<sub>6</sub> sobrestiman a los de Penman-Monteith y los del modelo de Bonachela subestiman (Figura 4.10).

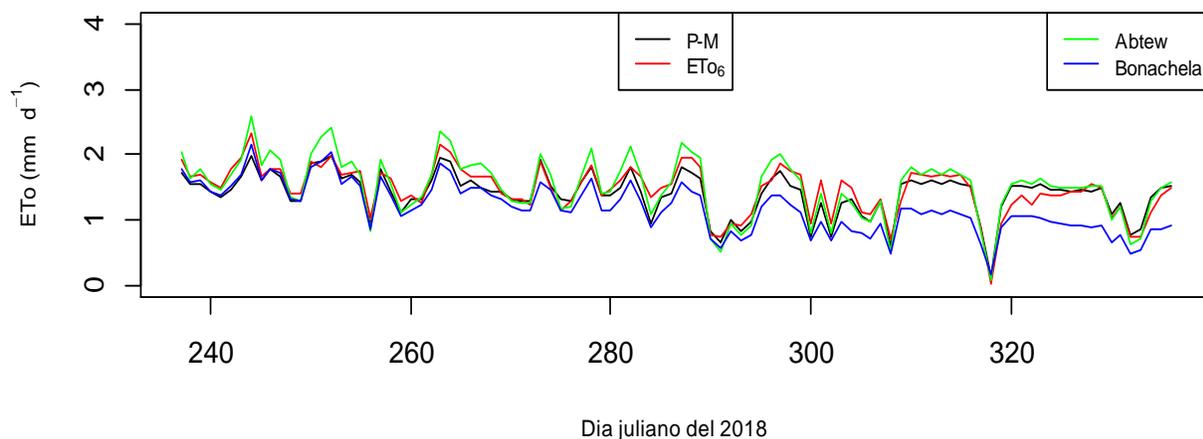


Figura 4.10. Comportamiento diario de la ETo estimada con los diferentes métodos para el periodo de validación (100 días).

En la Figura 4.11, se presentan las relaciones entre los datos diarios de ETo<sub>6</sub> con Penman-Monteith, Abtew y Bonachela. Además, se indican sus respectivos coeficientes de determinación, los métodos ETo<sub>6</sub> y Abtew obtuvieron valores de  $R^2 > 0.9$  y errores típicos menores a 0.186 ( $\text{mm d}^{-1}$ ), el de Bonachela tuvo un ajuste menor.

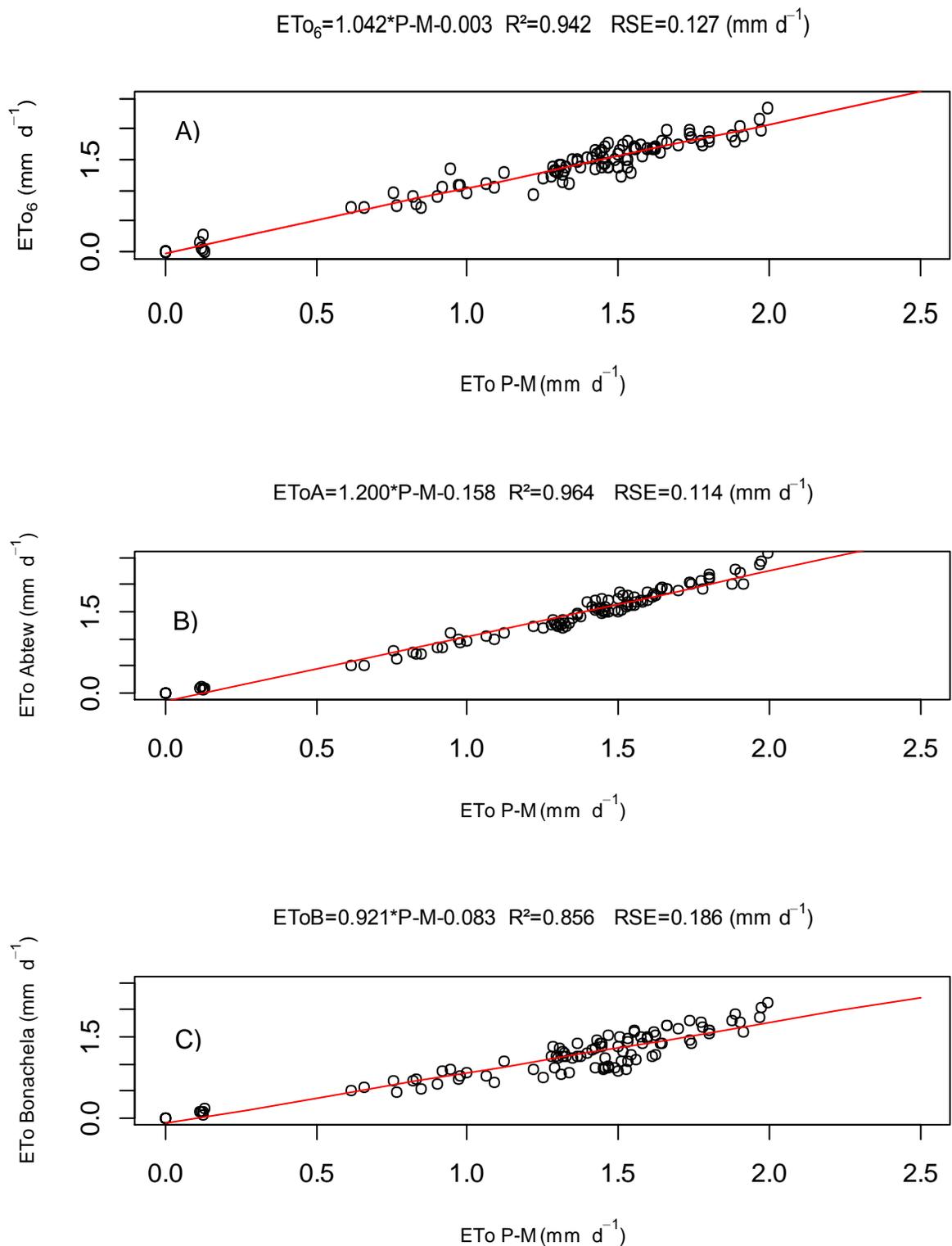


Figura 4.11. Diagramas de dispersión y coeficientes de determinación ( $R^2$ ) del modelo de Penman-Monteith con: A)  $ET_{o6}$ , B) Abtew y C) Bonachela en el periodo de validación (100 días)  $n=100$ .

#### 4.3.7. Desempeño del modelo a diferentes porcentajes de apertura de la ventilación lateral

La apertura de la ventilación lateral del invernadero se varió en 25, 50 y 75%, cada una durante dos días, esto en los primeros seis días de septiembre de 2017. Para cada porcentaje de apertura se calculó  $ET_{O6}$  y se comparó con la de P-M, obteniéndose los estadísticos que se presentan en el Cuadro 4.3, de estos se deduce que el modelo presenta un buen desempeño cuando se hace manejo de la ventilación en las tres aperturas, el error típico fue bajo numéricamente menor a 0.018 mm y los  $R^2$  mayores a 0.80.

Cuadro 4.3. Estimaciones horarias del modelo  $ET_{O6}$  vs  $ET_{O}$  Penman-Monteith a tres porcentajes de apertura de la ventilación lateral.

APERTURA	$R^2$	Error típico (mm)
25	0.94	0.018
50	0.96	0.013
75	0.81	0.011

#### 4.4. Conclusiones

La evapotranspiración de referencia horaria como diaria dentro del invernadero se estima a partir de datos de temperatura, humedad relativa y déficit de saturación con el modelo lineal obtenido, en ambos casos el error es bajo. Lo mismo se presenta con los modelos de Abtew y Bonachela.

La ventilación lateral del invernadero se varió en tres porcentajes de apertura (25, 50 y 75 %) y el modelo propuesto predice aceptablemente la evapotranspiración de referencia al comparar sus datos con los de Penman-Monteith.

#### 4.5. Literatura citada

- Abtew, W. (1996). Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in south Florida. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 32(3): 465-473.
- Ahmadi, S. H., & Fooladmand, H. R. (2008). Spatially distributed monthly reference evapotranspiration derived from the calibration of Thornthwaite equation: a case study, South of Iran. *Irrigation Science*, 26(4): 303-312.
- Allen, R. G.; Jensen, M. E.; Wright, J.L. and Burman, R. D. (1989). Operational Estimates of Reference Evapotranspiration. *Agron J.* 81(4): 650-662.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage

- Paper 56, FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome: 15pp.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. FAO: 322 pp.
- Bonachela S.; González A.M. and Fernández M.D. (2006). Irrigation scheduling of plastic greenhouse vegetable crops based on historical weather data. *Irrig Sci* 25(1): 53–62.
- Campbell Sci Inc. (1995). On line estimation of grass reference evapotranspiration with the Campbell Scientific Automated Weather Station. App. Note: 4-D. Whashington State University. 1: 1-33.
- Cedillo, E., y Calzada, M. (2012). La horticultura protegida en México situación actual y perspectivas. *Encuentros UNAM*. 10 pp.
- Draper, N. R.; Smith, H. (2014). Applied regression analysis, 2nd ed. John Wiley & Sons (Vol. 326). Wisconsin, USA, 2014. 709 pp.
- Eslamian, S. S.; Abedi-Koupai, J.; Amiri, M. J. and Gohari, S. A. (2009). Estimation of Daily Reference Evapotranspiration Using Support Vector Machines and Artificial Neural Networks in Greenhouse. *Research Journal of Environmental Science*. 3(4): 439-447.
- Espadafor, M.; Lorite, I. J.; Gavilan, P. and Berenjena, J. (2011). An Analysis of the Tendency of Reference Evapotranspiration Estimates and other Climate Variables During the last 45 Years in Southern Spain. *Agricultural Water Management*. 98 (6): 1045-1061.
- Fernandes, C.; Cora, J. E.; Campos de Araujo, J. A. (2003). Reference Evapotranspiration Estimation Inside Greenhouses. *Scientia Agricola*. 60(3): 591-594
- Fernández, M. D.; Boachela, S.; Orgaz, F.; Thompson R.; López, J. C.; Granados, M. R.; Gallardo, M. and Ferreres, E. (2010). Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *IrrigSci*. 28: 497-509.
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). (2010). Oportunidades de negocio en la agricultura protegida. Boletín informativo No 7. 100 pp.
- González, N.J.F. 2013. 20,000 has. Bajo agricultura protegida. Horticultivos. Editorial Agro Síntesis S.A. de C.V. México, D.F: 8-10.
- Li, Y. S.; Aydin, M.; Yano, T, and Li, X. (2003). Evapotranspiration of oranges trees in greenhouse lysimeters. *Irrig Sci*. 21(4): 145-149.
- Lui, X. F.; Liu, Z. G.; Duan, A. W.; Sun, J. S.; Liu, H.; Chen, Z. F.; Zhang, J. Y.; Shen, X. J.; Adobi, U. P. and Uzokwe, V. N. E. (2015). Simulation of crop evapotranspiration in a plastic solar greenhouse using a simplified energy balance approach. *The Journal of Animal & Plant Sciences*, Special Issue 25 (3 SuJppl. 1) : 141-145.
- Mendonca, J. C.; de Sousa, E. F.; Bernardo, S.; Días, P. G. & Grippa S. (2003). Comparación entre Métodos de Estimación de la Evapotranspiración de Referencia

- (ETo) en la Región Norte Fluminense. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 7(2): 275-279.
- Morán, P, Dicken, U and Tanny J. (2014). Penman-Monteith approaches for estimating crop evapotranspiration in screenhouses—a case study with table-grape. *Int J Biometeorol*. 58 (5): 725-737.
- Moreno, R. A.; Aguilar, D. J. y Luevano, G. A. (2011). Características de la Agricultura Protegida y su Entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*. 15 (29):763-774.
- Orgaz, F.; Fernández, M. D.; Bonachela, S.; Gallardo, M. and Fereres, E. (2005). Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. *Agricultural water management*. 72 (2): 81-96.
- Pulido, A. R. y García, P. Y. (2019). H Ayuntamiento de Texcoco. consulta en línea en <https://es.wikipedia.org/wiki/Texcoco>.
- Reyes-Rosas, A.; Rodríguez-García, R.; Zermeño-González, A.; Jaso-Cantú, D.; Cadena-Zapata, M. y Burgueño-Camacho, H. (2009). Evaluación de un Modelo para Estimar la Temperatura y Humedad Relativa en el Interior de un Invernadero con ventilación Natural. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 18(1): 125-140.
- Scheff, J. and Dargan M. W. F. (2014). Scaling Potential Evapotranspiration with Greenhouse Warming. *American Meteorological Society*. 27(4): 1539-1558.
- Segura-Castruita, M. y Ortiz-Solorio, C. A. (2017). Modelación de la Evapotranspiración Potencial mensual a partir de temperaturas máximas -mínimas y altitud. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 8(3): 93-110.
- Tanner, C. B. (1960). Energy Balance Approach to Evapotranspiration from Crops. *Soil Science society of America*. 24(1): 1-9.
- Vásquez-Méndez, R.; Ventura-Ramos, E. J. y Acosta-gallegos, J. A. (2011). Habilidad de Estimación de los Métodos de Evapotranspiración para una Zona Semiárida del Centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 2(3): 399-415.

# 5. PARÁMETROS MODIFICADOS DE VARIOS MODELOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA EN INVERNADEROS

Martin Azúa Barrón<sup>1</sup>, Mario Alberto Vázquez Peña<sup>2</sup>

## RESUMEN

### Resumen

La evapotranspiración de referencia es una variable para estimar y planear los volúmenes de agua de riego y frecuencia de aplicación, por lo que es importante su estudio. En México la superficie de agricultura protegida ha tenido un incremento anual del 20 al 25 por ciento, el 44 por ciento son invernaderos con unidades de producción que en promedio son menores a 0.5 ha, lo que sugiere que tienen una tecnología limitada. Para los invernaderos no hay un método estándar para la estimación de la evapotranspiración de referencia como el de Penman-Monteith para campo abierto. Se han propuesto ecuaciones para estimar la evapotranspiración de referencia, con base en datos de: temperatura, radiación y combinados. Con la finalidad de estimar la evapotranspiración de referencia en el interior de un invernadero ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo, en el Estado de México, se modificó los valores numéricos de los parámetros de varios modelos reportados en la literatura. Los basados en radiación de: Abtew, Jensen-Haise, Caprio, Irmak, Sthepen, Priestley-Taylor y Makkink que mostraron un buen ajuste cuando sus datos de ETo se compararon con los calculados por la estación Campbell que tiene un programa interno para el cálculo de esta variable con el método de Penman-Monteith que utiliza las variables de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación medidas en el interior del invernadero, al validar los modelos se obtuvieron ( $R^2$ ) mayores a 0.787 y RSE menores a 0.21 mm d<sup>-1</sup>. Los basados en temperatura como los de: Baier-Robertson, Romanenko y Hargreaves mostraron ajustes menores con  $R^2$  menores a 0.461 y RSE mayores a 0.31 mm d<sup>-1</sup>. El modelo modificado de Abtew fue el mejor para estimar la ETo en invernadero con un  $R^2$  de 0.947 y un RSE de 0.06 mm d<sup>-1</sup>.

**Palabras clave:** invernadero, métodos, estimación, condiciones de invernadero, Penman-Monteith

### Abstract

The reference evapotranspiration is a variable to estimate and plan the volumes of irrigation water and frequency of application, so its study is important. In Mexico, the area of protected agriculture has had an annual increase of 20 to 25 percent, 44 percent are greenhouses with production units that on average are less than 0.5 ha, which suggests that they have limited technology. For greenhouses there is no standard method for estimating reference evapotranspiration such as Penman-Monteith for open field. Equations have been proposed to estimate the reference evapotranspiration, based on data of temperature, radiation and combined. In order to estimate the reference evapotranspiration inside a greenhouse located in the Autonomous University Chapingo, in the State of Mexico, the numerical values of the parameters of several models reported in the literature were modified. Those based on radiation from: Abtew, Jensen-Haise, Caprio, Irmak, Sthepen, Priestley-Taylor and Makkink showed a good fit when their ETo data were compared with those calculated by the Campbell station that has an internal program for calculation of this variable with the Penman-Monteith method that uses the variables of temperature, relative humidity, wind speed and radiation measured inside the greenhouse, when validating the models were obtained ( $R^2$ ) greater than 0.787 and RSE less than 0.21 mm d<sup>-1</sup>. Those based on temperature such as those of: Baier-Robertson, Romanenko and Hargreaves showed minor adjustments with  $R^2$  lower than 0.461 and RSE greater than 0.31 mm d<sup>-1</sup>. The modified model of Abtew was the best to estimate ETo in the greenhouse with an  $R^2$  of 0.947 and an RSE of 0.06 mm d<sup>-1</sup>.

**Keywords:** greenhouse, methods, estimation, greenhouse-conditions, Penman-Monteith

<sup>1</sup>Tesista

<sup>2</sup>Director

## 5.1. Introducción

La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) es la cantidad de agua evapotranspirada por un cultivo de referencia como el pasto con una altura de 0.12 m, con una resistencia de la superficie de 70 s m<sup>-1</sup> y un albedo de 0.23, muy parecida a la evaporación de una superficie de pasto de altura uniforme y creciendo activamente, que sombrea la superficie del suelo y sin limitantes de agua, (Allen *et al.*, 2006), e independiente del cultivo (Allen *et al.*, 2006; Zotarelli, 2010).

La evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) y la ET<sub>o</sub>, para un cultivo se relacionan a través de un coeficiente denominado de cultivo (K<sub>c</sub>) que depende de las características de este. La ET<sub>o</sub> incorpora la mayoría de los efectos meteorológicos y es un indicador de la demanda atmosférica (Allen *et al.*, 2006). Conocer la ET<sub>c</sub> es fundamental para ajustar los volúmenes y la frecuencia de riegos a las necesidades del cultivo. El manejo correcto del riego conduce a la obtención de altos rendimientos, calidad óptima y un uso racional de los recursos al minimizar el desperdicio de agua y energía (García y Puppo, 2010).

Donohue *et al.* (2010) indican que la demanda *evaporativa* de la atmósfera es un proceso que está influenciado por las variables: radiación neta, presión de vapor de agua, velocidad del viento y temperatura del aire. Cervantes *et al.* (2013) y De la Casa y Ovando (2016) mencionan que en muchas estaciones meteorológicas no se dispone de mediciones completas de temperatura (T), humedad relativa (HR), radiación solar (R<sub>s</sub>) y velocidad del viento; por lo que se han propuesto modelos con un número menor de variables.

Sin datos de radiación solar (R<sub>s</sub>) medidos en el interior del invernadero, estos se estiman al multiplicar los datos de R<sub>s</sub> medidos por una estación meteorológica cercana por el coeficiente de transmisibilidad de la cubierta del invernadero. El coeficiente de transmisibilidad del plástico tiene un promedio de 0.56 con una varianza de 0.025 (Flores *et al.*, 2012).

El método de Penman-Monteith (PM) tiene la ventaja de estimar las demandas de agua atmosféricas en diferentes condiciones climáticas (De la Casa y Ovando, 2016), es el método estándar para cultivos al aire libre, también ha dado buenos resultados para estimar la ET<sub>o</sub> en el interior de los invernaderos en regiones con clima mediterráneo

(Fernández *et al.*, 2010). Para invernaderos no existe un método similar, más aún cuando dichas estructuras tienen una gran variabilidad en su geometría (Gavilán *et al.*, 2014).

Djaman *et al.* (2015) evaluaron diferentes modelos para estimar ETo bajo condiciones muy específicas, donde algunos: subestiman, sobrestiman y se ajustan con relación al modelo de Penman-Monteith. El modelo de Hargreaves por su simplicidad es una opción para estimar la ETo en invernaderos bajo ciertas consideraciones (Fernández *et al.*, 2010).

Los modelos de evapotranspiración se han agrupado en tres tipos con base a: temperatura, radiación, y combinados. El uso de uno en particular dependerá de las condiciones meteorológicas y la disponibilidad de información (Djaman *et al.*, 2015 y Pandey *et al.*, 2016). Los modelos empíricos son confiables en las áreas y periodos en que se desarrollaron, pero si se extrapolan a otras regiones sin recalibrar, es de esperarse errores y sesgos de las pendientes de regresión (Xu & Singh, 2001).

Juárez *et al.* (2011) indican que la superficie de agricultura protegida en México tiene un crecimiento anual de 20 a 25 por ciento, y que el 44 por ciento son invernaderos. No hay exactitud de la superficie bajo esta modalidad, en 2017 se reportaron 11,100.25 ha en 25,055 unidades de producción (De Anda y Harvey, 2017), de acuerdo con Berger (2018) el promedio de superficie por unidad de producción en México es menor a 1 ha, con unidades de producción menores a 0.5 ha, limita el acceso a tecnología, capacitación y asistencia técnica, así como el acceso a mercados más exigentes (Cedillo y Calzada, 2012). Por lo que, para las estructuras que modifican las condiciones de microclima donde se producen cultivos, es necesario hacer estudios específicos para estimar las necesidades de agua de estos, mejorar el manejo de riego y la eficiencia del uso del agua (Moran *et al.*, 2014).

Si las condiciones en el exterior del invernadero condicionan el microclima en el interior, es posible ajustar los parámetros de los modelos que se generaron para estimar la evapotranspiración al aire libre, para predecir la ETo en el interior del invernadero.

El objetivo de este trabajo fue modificar los parámetros de once modelos: Baier-Robertson (1965), Romanenko (1961), Hargreaves y Samani (1985), Turc (1961), Abtew (1996), Jensen y Haise (1963), caprio (1974), Irmak *et al.* (2003), Stephen (1965), Priestley y Taylor (1972) y Makkink (1957), para estimar la ETo en el interior del invernadero.

## 5.2. Materiales y métodos

El trabajo se realizó en la estación meteorológica del departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo en un invernadero (Figura 5.1) con ventilación lateral, con un área útil para el cultivo de 105 m<sup>2</sup>, un volumen aproximado de aire 550 m<sup>3</sup>, cubierta de plástico y estructura de metal con orientación Norte-Sur. La localización geográfica es latitud 19.483° N y longitud 98.900° W con una altura de 2250 msnm. El clima de la localidad es de tipo Cb(Wo)(W)(i')g, templado subhúmedo con lluvias en verano, una época seca en invierno y con oscilación térmica que varía entre 5 a 7 °C . La temperatura media anual es de 17.2 °C, el mes más caliente es mayo con una temperatura media de 19.7 °C y con 14.1 °C enero es el más frío. La precipitación media anual es de 598 mm con vientos dominantes del Sur (Pulido y García, 2019).



Figura 5.1. Vista panorámica del Invernadero.



Figura 5.2. Estación automática al interior del invernadero.

La medición de los datos se realizó con una estación meteorológica automática Campbell CR10x ubicada en el interior del invernadero (Figura 5.2), las variables registradas fueron: temperatura (°C), humedad relativa (%), velocidad (m s<sup>-1</sup>) y dirección del viento (°) y radiación solar (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>). La estación automática se ubicó en la parte central del invernadero. La velocidad del viento fue baja y la estación meteorológica automática no fue capaz de medirla, por lo que no se obtuvo registros.

### 5.2.1. La ecuación de Penman-Monteith (P-M)

El equipo CR10x de Campbell (1995) tiene programado el algoritmo para calcular la ETo según Penman Monteith (PM) con la ecuación (5.1):

$$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G)}{\lambda(\Delta + \gamma^*)} + \frac{\gamma^* M_w(e_a - e_d)}{R \theta r_v(\Delta + \gamma^*)} \quad (5.1)$$

Donde:  $ET_0$  es la Evapotranspiración de referencia ( $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$  o  $\text{mm s}^{-1}$ ),  $R_n$  es la Radiación Neta ( $\text{kW m}^{-2}$ ),  $G$  es la densidad de flujo de calor del suelo ( $\text{kW m}^{-2}$ ),  $M_w$  masa molecular del agua ( $0.018 \text{ kg mol}^{-1}$ ),  $R$  constante de los gases ( $8.31 \times 10^{-3} \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ),  $\theta$  es la temperatura Kelvin (293K),  $(e_a - e_d)$  déficit de presión de vapor del aire (kPa),  $\lambda$  calor latente de vaporización del agua ( $2450 \text{ kJ kg}^{-1}$ ),  $r_v$  es la resistencia de la superficie a la vaporización ( $\text{s m}^{-1}$ ),  $\Delta$  pendiente de la curva de presión de vapor del aire en función de la temperatura ( $\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) y  $\gamma^*$  es la constante psicométrica aparente ( $\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

Para el cálculo manual de la  $ET_0$  con el método de Penman-Monteith para condiciones similares a los invernaderos, en el boletín 56 de la FAO (Allen *et al.*, 2006) se recomienda utilizar  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  como valor mínimo para la velocidad del viento, lo que mejora las estimaciones de la  $ET_0$ .

## 5.2.2. Modelos de $ET_0$

Se incluyen los modelos con base en temperatura y radiación (Cuadro 5.1), que fueron propuestos para condiciones diferentes a las de un invernadero, pero que no incluyen velocidad del viento, para estimar  $ET_0$  a nivel diario.

Cuadro 5.1. Detalle de los modelos empíricos incluidos, sus parámetros y su referencia.

Modelo	Referencia	Formula	Variables
<b>Basadas en Temperatura</b>			
<i>Baier-Robertson</i>	Baier and Robertson (1965)	$ET_0 = 0.157 * Tmax + 0.158(TD) + 0.109 * Ra - 5.39$	Tmax,TD,Ra
<i>Romanenko</i>	Romanenko (1961)	$ET_0 = 0.00006(Tmed + 25)^2(100 - HR)$	Tmed, HR
<i>Hargreaves</i>	Hargreaves y Samani, 1985	$ET_0 = 0.0023 * Ra (Tmed + 17.8) (Tmax - Tmin)^{0.5}$	Ra,Tmed,Tmax, Tmin
<b>Basados en Radiación</b>			
<i>Turc</i>	Turc (1961)	$ET_0 = (0.3107 Rs + 0.65) \left( \frac{T1}{Tmed * 15} \right)$	Rs, Tmed, T1
<i>Abtew</i>	Abtew (1996)	$ET_0 = 0.408 - 0.01786 Rs Tmax$	Rs, Tmax
<i>Jensen-Haise</i>	Jensen-Haise (1963)	$ET_0 = 0.408 * Rs (0.025 Tmed + 0.08)$	Rs,Tmed
<i>Caprio</i>	Caprio (1974)	$ET_0 = (0.01092708 Tmed + 0.0060706) Rs$	Tmed, Rs
<i>Irmak</i>	Irmak <i>et al.</i> (2003)	$ET_0 = 0.149 Rs + 0.079 * Tmed - 0.611$	Rs, Tmed
<i>Stephen</i>	Stephen (1965)	$ET_0 = 0.408(0.0158 * Tmed + 0.09)Rs$	Rs, Tmed

<i>Priestley–Taylor</i>	Priestley–Taylor (1972)	$ET_o = 0.408(1.26 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right)(R_n - G))$	$\Delta, \gamma, R_n, G$
<i>Makkink</i>	Makkink (1957)	$ET_o = 0.408 * 0.61 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right) R_s - 0.12$	$\Delta, \gamma, R_s$

ETo es la evapotranspiración de referencia en (mm d<sup>-1</sup>), Tmed la temperatura media (°C), Tmax es la temperatura máxima (°C), Tmin la temperatura mínima (°C), TD es la oscilación térmica (°C), HR la humedad Relativa en (%), es la presión de vapor a saturación (kP) ea la presión de vapor actual (kP), Δ es la pendiente de la curva de presión a saturación, γ es la constante psicométrica, Ra es la radiación solar extraterrestre en MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, Rs es la radiación solar en MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, Rn es la radiación neta en MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, G es flujo de calor en el suelo (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>) y T1 es un coeficiente empírico.

Con dos series: una del 2 de septiembre al 12 de diciembre de 2017 y otra del 4 de marzo al 23 de abril de 2018, con datos diarios medidos de (T, HR, Rs) y calculados (ETo P-M). Con los datos de la primera se modificaron los parámetros de los modelos y con los de la segunda se evaluaron los modelos con los parámetros definidos en este trabajo.

Con los valores de ETo de los modelos del Cuadro 5.1 (calculados con los datos meteorológicos medidos por la estación automática) y los de P-M que fueron calculados por la estación automática, se construyeron los diagramas de dispersión entre los datos de ETo de los modelos y P-M, y se calcularon los estadísticos: raíz del cuadrado medio del error (RSE) y coeficiente de determinación R<sup>2</sup>, los detalles para el cálculo de estos estadísticos ver Draper and Smith (2014).

### 5.2.3. Modificación de los parámetros

Para la modificación de los parámetros de los modelos de ETo se utilizaron los datos meteorológicos medidos y los estimados por la estación Campbell CR10x destinados para esta tarea. Se realizó un programa en lenguaje R para este propósito, en el que se trabajó un modelo a la vez, con el siguiente procedimiento:

Se identificaron los parámetros de uno de los modelos propuestos (ETox) para su modificación. Para cada parámetro se definió un rango en el que el límite inferior fue el valor numérico original del parámetro menos 10 y el límite superior el valor numérico más 10. Una vez definidos los rangos se dividieron en 80 000 partes con los que se construyó un vector, lo que definió propuestas del parámetro con incrementos de 0.00025.

Se programaron 20 000 ciclos para cada modelo, donde el programa asignó un valor a cada parámetro en forma aleatoria tomado del vector correspondiente. Se sustituyeron los

valores de los parámetros seleccionados en el modelo y se evaluó con los datos meteorológicos de 2017 obteniéndose 102 datos de ET<sub>ox</sub>. Con los datos de la ET<sub>ox</sub> y los datos de ET<sub>o</sub> calculados con el método de Penman-Monteith (P-M) se determinó el coeficiente de correlación (R) entre estos. El valor numérico de R se compara con el valor de R<sub>o</sub> (que al inicio del programa se le asignó el valor numérico de cero), si  $R > R_o$ , entonces  $R_o = R$  y los valores de los parámetros se almacenan en variables de programación definidas para tal fin, estos valores se actualizan solo si en el ciclo se obtiene un R mayor al almacenado en R<sub>o</sub>. El ciclo se repite 20 000 veces y al final de este proceso computacional se obtiene el valor del coeficiente de correlación y los valores de los parámetros propuestos aleatoriamente correspondientes.

En el modelo se sustituye los parámetros almacenados al final de los 20 000 ciclos, que corresponden a los que generaron el valor mayor de R y con los datos meteorológicos se generó los ET<sub>ox</sub>.

Con los datos de ET<sub>o</sub> P-M (variable dependiente) y los calculados con el modelo y los parámetros (ET<sub>ox</sub> variable independiente) se realizó una regresión lineal. Finalmente se obtuvieron los valores numéricos de los parámetros al ser afectados por el coeficiente de regresión y con la suma del término independiente.

Se esquematiza el procedimiento de obtención de los parámetros modificados de los modelos de ET<sub>o</sub> para estimar en invernadero (Figura 5.3).

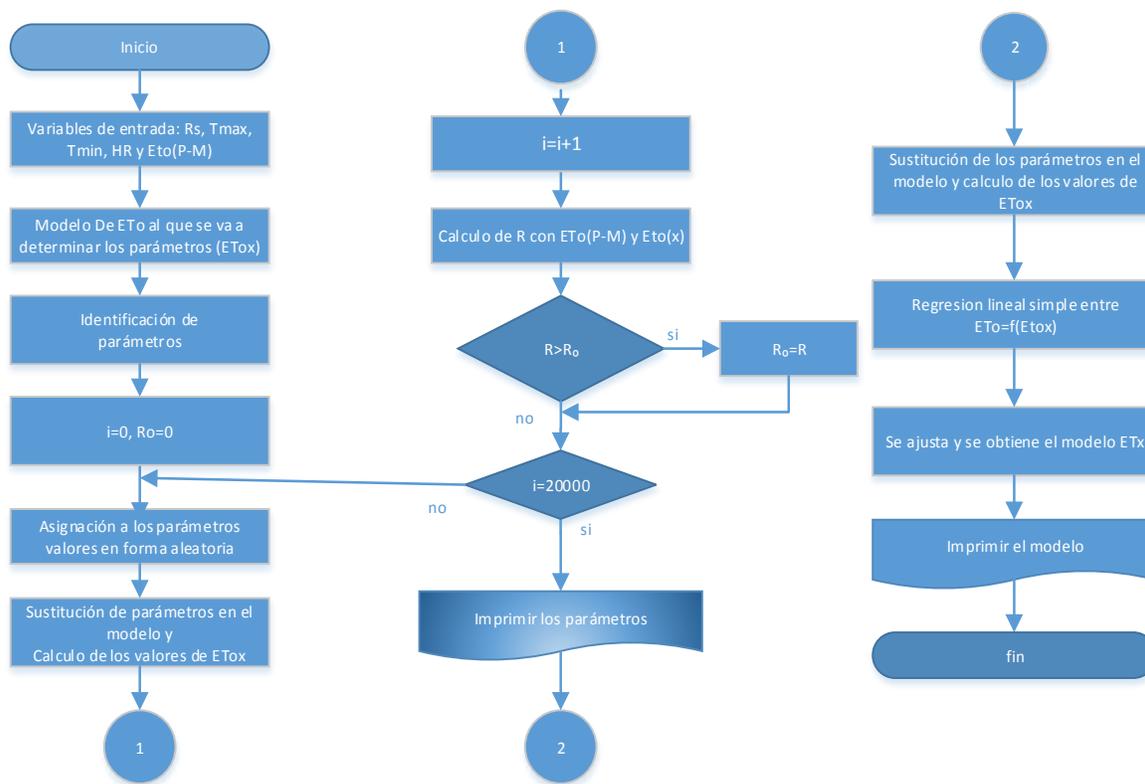


Figura 5.3. Diagrama de flujo simplificado para la obtención de los modelos de ETo modificados para estimar la ETo en el interior de un invernadero.

Los modelos obtenidos para ser utilizados en la estimación de la ETo en invernadero, se validaron con datos estimados con Penman-Monteith con la serie del 2018 (51 datos) por medio del diagrama de dispersión, coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la raíz del cuadrado medio del error (RSE).

### 5.3. Resultados y discusión

#### 5.3.1. Diagramas de dispersión entre los datos de ETo de los modelos con sus parámetros originales y los datos de ETo calculados con Penman-Monteith.

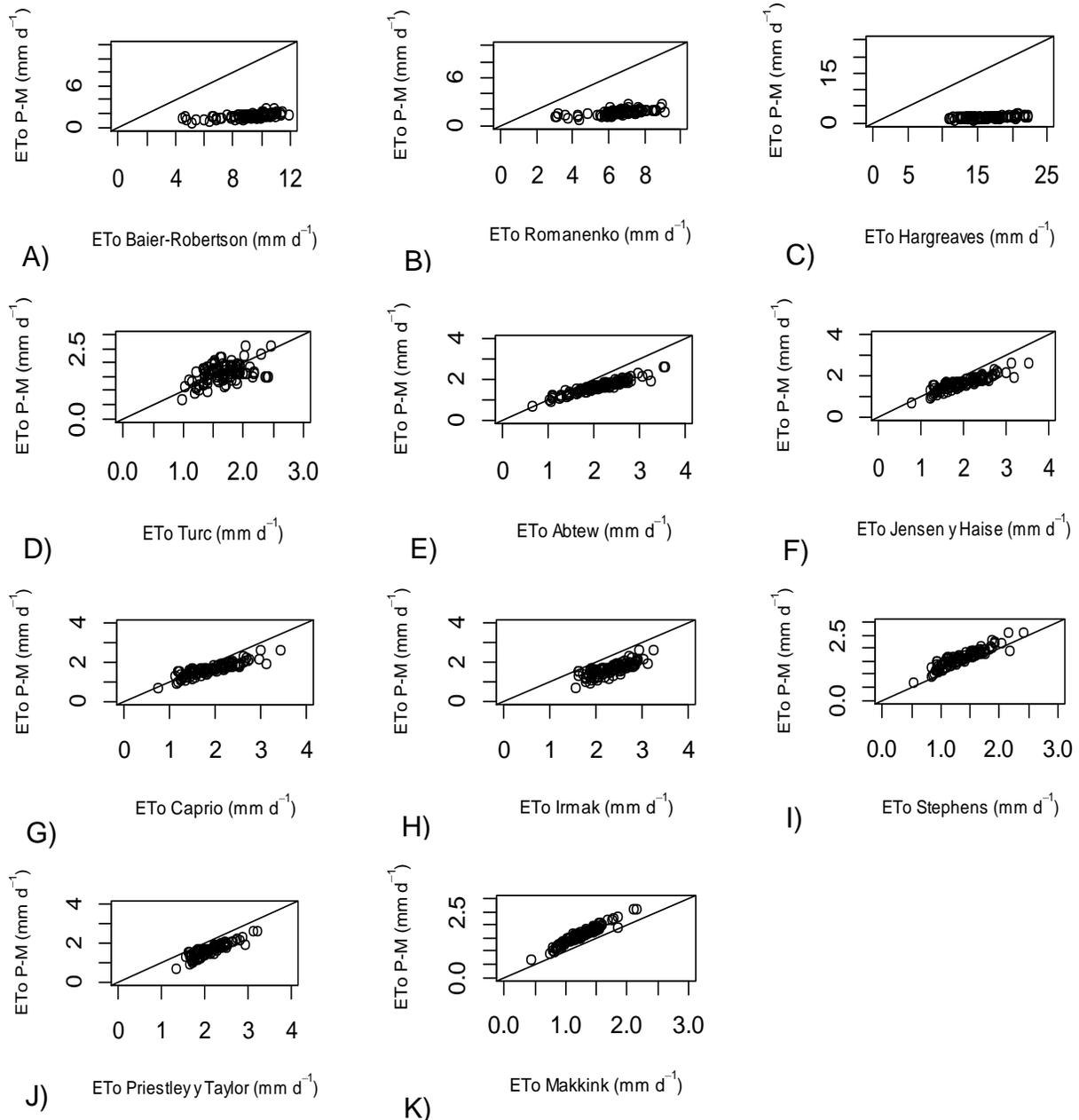


Figura 5.4. Diagramas de dispersión entre los valores de ETo calculados con los modelos del Cuadro 5.1 y los del método de P-M: A), B) y C) con base en la temperatura y de la D) a la K) en radiación (n=102).

Los modelos con base en temperatura de las Figuras 5. 4 A) a la C) se aprecia que los modelos de Baier-Robertson, Romanenko y Hargreaves sobrestiman los valores de ETo calculados con P-M. Los con base en radiación de las Figuras 5.4 E), 5.4 F), 5.4 G), 5.4 H), 5.4 I) y 5.4 J) se aprecia que los datos calculados con los modelos de Abtew, Jensen y Haise (J y H), Caprio, Irmak y Priestley-Taylor (P y T) sobrestiman los valores de la ETo con P-M, en la Figura 5.4 D) el método de Turc tiene datos que sobrestiman y que subestiman, también se aprecia que los datos tienen una dispersión mayor a los otros métodos y en la Figura 5.4 K) los datos de los modelos de Makkink y Stephen subestiman los valores de ETo con P-M.

Los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y la raíz del cuadrado medio del error (RSE) de los diagramas de dispersión (Cuadro 5.2 y Figura 5.4), indican que los datos calculados con los modelos de Abtew, Jensen-Haise, Caprio, Irmak, Priestley-Taylor y Makkink son parecidos a los de P-M. Tienen coeficientes de determinación que van de 0.625 a 0.939 y los RSE son menores a  $0.72 \text{ mm d}^{-1}$ , el modelo mejor con sus parámetros originales es el de Makkink. El modelo de Turc tiene un valor de RSE de 0.34 y de  $R^2$  de 0.198. Los datos de los modelos con base en temperatura obtuvieron valores menores de los coeficientes de determinación que los de radiación. Los RSE fueron más altos para los modelos con base en la temperatura, donde el modelo de Hargreaves obtuvo el valor de RSE más alto ( $15.26 \text{ mm d}^{-1}$ ).

Cuadro 5.2. Estadísticos de los datos de ETo calculados con los modelos del Cuadro 5.1 con respecto a los de P-M.

	Modelo	$R^2$	RSE ( $\text{mm d}^{-1}$ )
<b>Con base en la temperatura</b>			
A)	<i>Baier-Robertson</i>	0.523	7.82
B)	<i>Romanenko</i>	0.499	5.14
C)	<i>Hargreaves</i>	0.463	15.26
<b>Con base en la radiación</b>			
D)	<i>Turc</i>	0.198	0.34
E)	<i>Abtew</i>	0.918	0.53
F)	<i>Jensen-Haise</i>	0.823	0.42
G)	<i>Caprio</i>	0.799	0.38
H)	<i>Irmak</i>	0.625	0.72

I)	<i>Stephen</i>	0.798	0.31
J)	<i>Priestley–Taylor</i>	0.665	0.45
K)	<i>Makkink</i>	0.939	0.39

Los errores se calcularon de acuerdo a  $e_i = ETo_{PM_i} - X_i$  donde:  $X_i$  es el valor obtenido con el modelo con sus parámetros originales,  $ETo_{PM_i}$  es el valor de  $ETo$  calculado con el método de Penman-Monteith. Para el cálculo de RSE se consideró la media de los errores igual a cero,  $n=102$ .

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) no depende de las unidades de medición de las variables independiente y dependiente, por lo que aun cuando se tuvo un valor de RSE entre los datos de  $ETo_{PM}$  y *Stephen* de 0.31, el de  $R^2$  fue de 0.798. Por lo anterior, el análisis del estadístico  $R^2$  no debe usarse por sí solo para decidir si el modelo es correcto o no (Infante y Zarate, 2011).

Los modelos del Cuadro 5.1, no son de aplicación general por su dependencia meteorológica local, estudios en diferentes condiciones indican que se deben calibrar (Irmak *et al.*, 2003; Trajkovic, 2005; Xu & Singh, 2001). Se aprecia (Figura 5.4 y Cuadro 5.2) que si se calcula los datos de  $ETo$  con los modelos con base en radiación y temperatura sin recalibrar las constantes o parámetros de las formulas se obtienen errores en la estimación de la  $ETo$  lo cual concuerda con lo indicado por Xu & Singh (2001).

### 5.3.2. Modificación de los parámetros de los modelos

Los valores de la raíz del cuadrado medio del error (RSE) de los modelos de  $ETo$  con sus parámetros modificados con base en temperatura de Baier-Robertson, Romanenko y Hargreaves fueron de: 0.21, 0.23, 0.20  $mm\ d^{-1}$  respectivamente. Para estos modelos los  $R^2$  variaron entre 0.501 y 0.626 (Cuadro 5.3).

De los modelos para estimar  $ETo$  con base en la radiación los RSE fueron: de 0.19 y 0.09  $mm\ d^{-1}$  para el de Priestley-Tylor y Abtew respectivamente y de 0.08  $mm\ d^{-1}$  para los demás. El método de Irmak presentó el ajuste mayor a los valores de  $ETo$  calculados con Penman-Monteith. En general los métodos con base a la radiación fueron mejores que con respecto a la temperatura (Cuadro 5.3).

Con los valores calculados con los modelos modificados de: Turc, Abtew, Jensen-Haise, Caprio, Irmak, Stephens y Makkink se obtuvo un ajuste bueno con los estimados por el método de P-M, en todos los ( $R^2$ ) fueron mayores a 0.918.

De acuerdo a los estadísticos del Cuadro 5.3, los datos de ETo obtenidos con los modelos con base a la radiación tienen un mejor nivel de ajuste con los de ETo con P-M. Los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) al ser todos menores a la unidad indican que los datos presentan dispersión con respecto a la recta 1:1.

Cuadro 5.3. Los modelos con sus parámetros modificados para estimar de la ETo diaria (mm) dentro del invernadero n=102.

Modelo	Formula Modificada	R <sup>2</sup>	RSE (mm d <sup>-1</sup> )
<b>Con base en la temperatura</b>			
<i>Baier-Robertson</i>	$ET_o = 0.0160 T_{max} + 0.0344(TD) + 0.0471 Ra - 1.559$	0.599	0.21
<i>Romanenko</i>	$ET_o = 0.0000202752(T_{med11} + 18.68)^{1.909}(100 - HR11) + 0.4345$	0.501	0.23
<i>Hargreaves</i>	$ET_o = 2.086 * 10^{-5} Ra (T_{med} + 27.64) (T_{max} - T_{min})^{1.031} + 0.4694$	0.626	0.20
<b>Con base en la radiación</b>			
<i>Turc</i>	$ET_o = (0.2570 R_s - 2.0772) \left( \frac{303.2}{15T_{med}} \right) + 1.851$	0.934	0.08
<i>Abtew</i>	$ET_o = 0.408 * 0.0099 R_s T_{max} + 0.473$	0.918	0.09
<i>Jensen-Haise</i>	$ET_o = 0.4081 * 0.0542 R_s (0.0784 T_{med} + 8.002) + 0.068$	0.945	0.08
<i>Caprio</i>	$ET_o = (0.0017 T_{med} + 0.1780) R_s + 0.067$	0.945	0.08
<i>Irmak</i>	$ET_o = 0.2189 * R_s + 0.0127 * T_{med} - 0.233$	0.946	0.08
<i>Stephen</i>	$ET_o = 0.408 * R_s (0.0041 * T_{med20} + 0.4389) + 0.065$	0.945	0.08
<i>Priestley-Taylor</i>	$ET_o = 0.408 \left( 1.0269 \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (R_n) \right) - 0.023$	0.665	0.19
<i>Makkink</i>	$ET_o = 0.408 * 0.6695 \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_s + 0.122$	0.939	0.08

De los estadísticos (Cuadros 5.2 y 5.3) se observa el comportamiento de los modelos para predecir los valores de ETo con P-M en el interior de un invernadero, con sus parámetros originales (Cuadro 5.2) y los modificados (Cuadro 5.3). Los modelos con base en temperatura pasaron de valores de  $R^2$  entre 0.463 y 0.523 a valores entre 0.501 y 0.626 y sus RSE de 5.14 a 15.26 a valores entre 0.20 y 0.23. En todos estos modelos hubo una mejora del modelo con los parámetros modificados en la estimación de la ETo. Los basados en radiación también mostraron una mejora para predecir los valores de ETo con P-M cuando se usan los modelos con los parámetros modificados, se pasó de RSE con

valores entre 0.31 a 0.72 a valores entre 0.08 a 0.19 y los  $R^2$  se mejoraron de valores entre 0.198 y 0.939 a valores de 0.665 a 0.946.

### 5.3.3. Evaluación del desempeño de los modelos

#### *Modelos con base en temperatura*

En la marcha temporal de los valores de la ETo obtenidos con los modelos con base en temperatura y los obtenidos con la expresión de Penman-Monteith (P-M), se observa que los tres modelos sobrestimaron los valores de P-M durante los 51 días utilizados para evaluar los modelos (Figura 5.5). En el Cuadro 5.3 los que muestran mejor ajuste son las estimaciones hechas con los modelos de Baier-Robertson y Hargreaves, pero los datos de los dos modelos sobrestiman los valores de P-M (Figuras 5.6 A y C). El Modelo de Romanenko en la mayoría de sus datos sobrestima a P-M y solo en cuatro datos subestima (Figura 5.6 B).

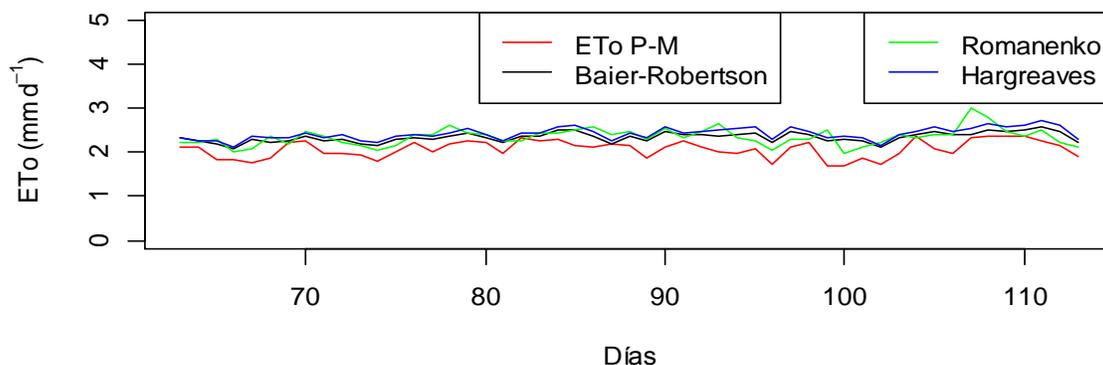


Figura 5.5. Ajuste temporal entre las mediciones de ETo de la estación automática (P-M) y los modelos modificados basados en temperatura para predecir la ETo diaria en el interior de un invernadero de: Baier-Robertson, Romanenko y Hargreaves, n=51.

Los diagramas de dispersión entre las estimaciones de ETo de los modelos con base en temperatura y la estimación de ETo con P-M se aprecian en la Figura 5.6 A, B y C. El que presentó mejor tendencia fue el que corresponde a los datos entre el método de P-M y el de Baier-Roberston, y el diagrama tiene los puntos más apegados a la línea 1:1.

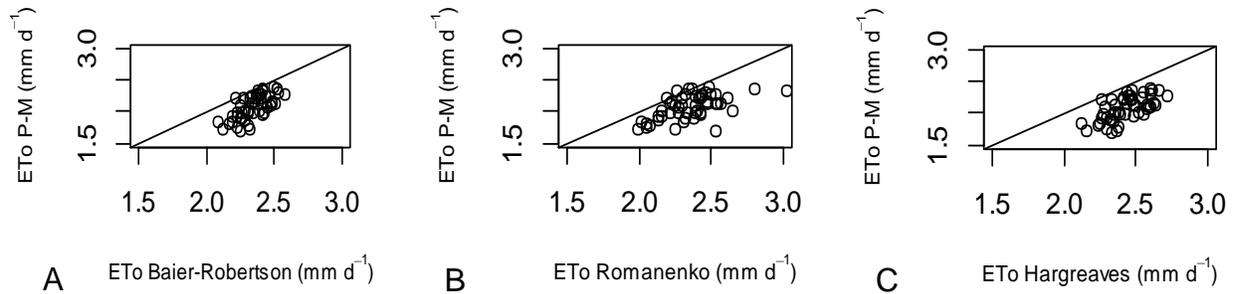


Figura 5.6. Diagramas de dispersión entre los valores predichos por los modelos modificados y las mediciones en el interior del invernadero con la estación automática (P-M): A) entre el método de Baier-Robertson y P-M, B) entre Romanenko y P-M, C) entre Hargreaves y P-M, n=51.

Los estadísticos de la evaluación de los modelos con datos de 51 días, los modelos de Baier-Robertson y Hargreaves obtuvieron coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de 0.461 y 0.411 y sus RSE de 0.31 y 0.39 mm d<sup>-1</sup> respectivamente. Los estadísticos del método de Romanenko son ( $R^2$ ) de 0.300 y RSE de 0.34 mm d<sup>-1</sup> fue el mejor método basado en temperatura.

#### *Evaluación del desempeño de los modelos con base en radiación*

La relación temporal entre ETo de los modelos con base en radiación y el método de Penman-Monteith (P-M), en el periodo de evaluación, el que mostró menor ajuste fue el de Turc (línea verde) ya que en todos sus datos subestimó el valor de ETo P-M (línea roja). Los datos del método de Abtew se apegaron a los de P-M y en términos generales el modelo tiene ajuste a los valores de P-M. Los modelos de Jensen-Haise, Caprio, Irmak, Stephens, Makkink, mostraron marchas temporales de sus datos que subestiman a los de P-M. El método de Priestley-Taylor mostró en su marcha temporal apego a los datos del modelo de P-M, en valores de ETo menores a 1.9 mm d<sup>-1</sup> sobreestimó y a mayores de 2.1 mm d<sup>-1</sup> subestimo (Figura 5.7).

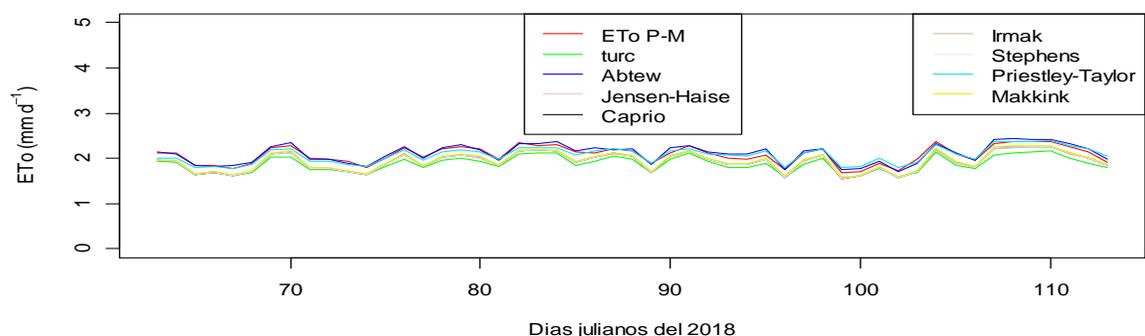


Figura 5.7. Ajuste temporal entre las mediciones de ETo de la estación automática (P-M) y los modelos modificados con base en radiación para predecir la ETo diaria en el interior de un invernadero, n=51.

En los diagramas de dispersión entre las estimaciones de los modelos modificados con base en radiación y Penman-Monteith, se aprecia que en general presentaron tendencia y seis de los ocho modelos subestimaron los valores de ETo de P-M (Figura 5.8). Los modelos que tuvieron comportamientos mejores en la etapa de evaluación fueron: Abtew, Priestley-Taylor y Makkink (Figuras 5.8 B, G y H).

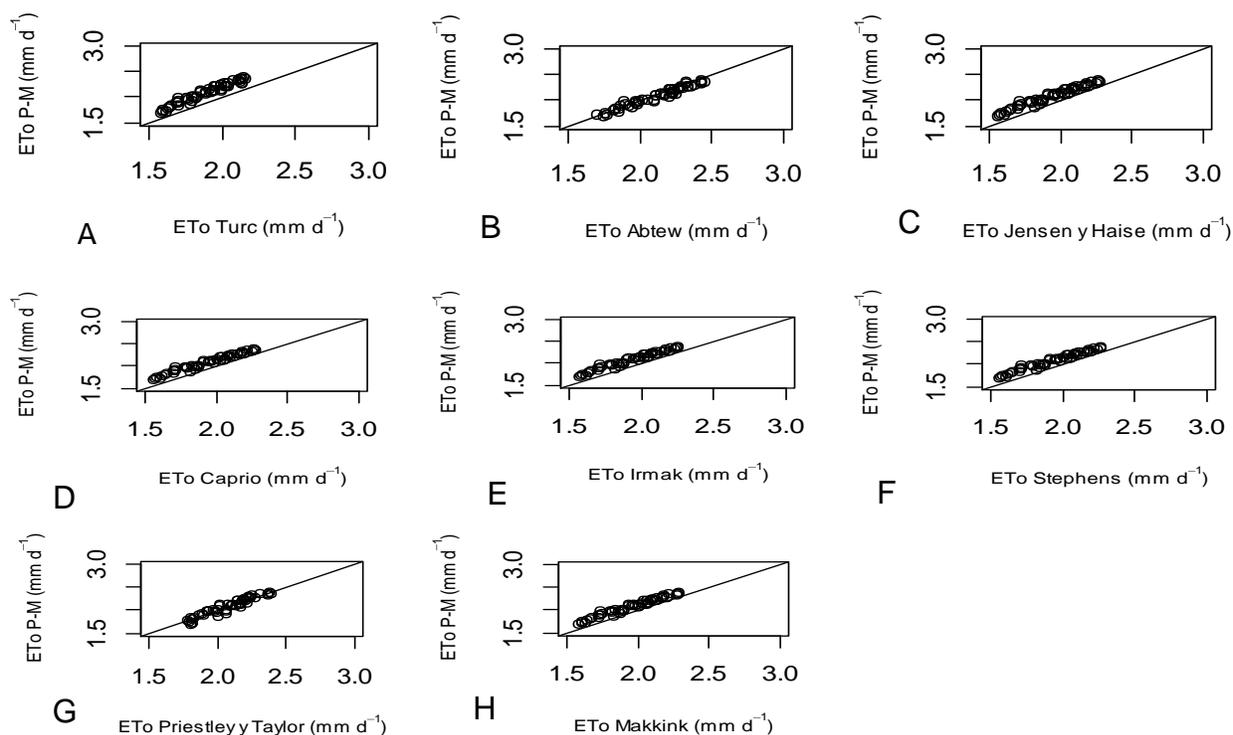


Figura 5.8. Diagramas de dispersión entre los valores predichos por los modelos modificados y las mediciones en el interior del invernadero con la estación automática (P-M): A) Turc y P-M, B) Abtew y P-M, C) Jensen-Haise y P-M, D) Caprio y P-M, E) Irmak y P-M, F) Stephens y P-M, G) Priestley-Taylor y P-M y H) Makkink y P-M, n=51.

El modelo de Turc con un  $R^2$  de 0.943 y un RSE de 0.21 mm d<sup>-1</sup> fue el que se ajustó menos, el resto de los modelos obtuvieron  $R^2$  mayores a 0.787 y RSE menores a 0.16 mm d<sup>-1</sup> (Cuadro 5.4).

Cuadro 5.4. Estadísticos obtenidos entre los valores de los modelos modificados para estimar ETo en el interior del invernadero y las mediciones de ETo de la estación meteorológica automática (Método de P-M).

Modelo modificado	$R^2$	RSE (mm d <sup>-1</sup> )
<i>Turc</i>	0.943	0.21
<i>Abtew</i>	0.947	0.06
<i>Jensen-Haise</i>	0.956	0.15
<i>Caprio</i>	0.956	0.16
<i>Irmak</i>	0.956	0.16
<i>Stephen</i>	0.956	0.16
<i>Priestley–Taylor</i>	0.787	0.11
<i>Makkink</i>	0.956	0.14

Al comparar los estadísticos de los modelos modificados, se aprecia que los modelos con base en la radiación se apegan más a los valores calculados con Penman-Monteith, y todos sus coeficientes de determinación ( $R^2$ ) son mayores a 0.787 y sus RSE menores a 0.21. El modelo de Abtew con un  $R^2$  alto y un RSE bajo fue el que predijo mejor los valores de ETo de P-M en invernadero.

## 5.4. Conclusiones

Para utilizar modelos para estimar la evapotranspiración en condiciones para las cuales no fueron desarrollados es necesario calibrarlos y validarlos.

En condiciones de invernadero y con parámetros originales los modelos de evapotranspiración con base en temperatura no dieron buenos resultados y de los basados en radiación el de Makkink fue el mejor.

Los modelos para estimar la evapotranspiración con base en radiación y parámetros modificados fueron los mejores en condiciones del invernadero.

## 5.5. Literatura citada

Abtew, W., (1996). Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in South Florida. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 32(3): 465-473.

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Roma, Italia. 323 pp.
- Baier, W., & Robertson, G.W. (1965). Estimation of latent evaporation from simple weather observations. *Canadian Journal of Plant Science*, 45(3): 276–284
- Berger. (2018). Estado Actual de la Agricultura Protegida en México. Consultado en <https://www.berger.ca/es/estado-actual-la-agricultura-protegida-mexico/>
- Campbell Sci Inc. (1995). App. Note: 4-D. Whashington State University. 1: 1-35,
- Caprio, J.M. (1974). The solar thermal unit concepting problems related to plant development and potential evapotranspiration *In*:H. Lieth (Ed.), Phenology and seasonality modeling. *Ecological Studies*. New York:Springer Verlag: 353–364
- Cedillo, E., y Calzada, M. (2012). La horticultura protegida en México situación actual y perspectivas. Encuentros UNAM: 1-10. Consultado en [https://issuu.com/fesaragon/docs/horticultura\\_protegida\\_en\\_mexico](https://issuu.com/fesaragon/docs/horticultura_protegida_en_mexico).
- Cervantes, O. R., Arteaga, R. R., Vázquez, P. M. A., Ojeda, B. W y Quevedo, N. A. (2013). Modelos Hargreaves Priestley-Taylor y redes neuronales artificiales en la estimación de la evapotranspiración de referencia. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. 15 (2): 163-176.
- De Anda, J. y Harvey Shear. (2017). Tecno agro: La agricultura protegida en México. Consultado en <https://tecnoagro.com.mx/revista/2017/no-117/la-agricultura-protegida-en-mexico/>
- De la Casa, A. C y Ovando, G. G. (2016). Variation of reference evapotranspiration in the central region of Argentina between 1941 and 2010. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 5(1): 66–79.
- Djaman, K., Sow, A., Muller, B., Irmak, S., N'Diaye, M. K., Manneh, B., ... & Saito, K. (2015). Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. *Journal of Hydrology: regional studies*, 3: 139-159.
- Donohue, R.J., McVicar, T.R., Roderick, M.L. (2010). Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate. *J. Hydrol.* 386(1-4): 186–197.
- Draper, N. R.; Smith, H. (2014). Applied regression analysis, 2nd ed. John Wiley & Sons (Vol. 326). Wisconsin, USA, 2014. 709 pp.
- Fernández, M. D., Bonachela, S., Orgaz, F., Thompson, R., López, J. C., Granados, M. R., ... & Fereres, E. (2010). Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrigation Science*, 28(6): 497-509.
- Flores Ortega, A., Martínez Soto, G., Quiroz Ramírez, J. C., Díaz Serrano, F. R., & Romero Valdez, M. E. (2012). Análisis de la transmitancia de luz en un invernadero para producción de jitomate. *Acta Universitaria*, 22(1): 10 pp. ISSN 2007-9621.

- García, P. M y Puppo, L. (2010). Determinación del consumo de agua del durazno por lisimetria. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. V. 14 (1): 25-31
- Gavilán, P., Lozano, D., Ruiz, N. (2014). Estimación de la evapotranspiración del cultivo de la fresa basada en pronósticos meteorológicos. Validación con datos experimentales. *V Jornadas de Agrometeorología. Valencia*, 13 y 14 de noviembre de 2014. 12 pp.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2): 96–99.
- Infante, S. G. y Zarate, de L, G. P. (2011). Métodos estadísticos: un enfoque interdisciplinario. Ed Trillas. 643p. ISBN 968-24-3838-1.
- Irmak, S., Irmak, A., Allen, R. G., & Jones, J.W. (2003). Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(5): 336–347.
- Jensen, M. E. y Haise. H. R. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. *J. of irrig. Drain. Div. ASCE*. 89(1): 25-38.
- Juárez, L. P., Bugarin, M. R., Castro, B. R., Sanchez-Monteon, A. L. Cruz-Crespo, E., Juárez, R. C. R., Alejo, S. G. y Balois, M. R. (2011). Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. *Revista Fuente Año*, 3(8): 21-27.
- Makkink, G.F., (1957). Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Inst. Water Eng.* 11(1): 277-288.
- Moran, P, Dicken, U and Tanny J. (2014). Penman-Monteith approaches for estimating crop evapotranspiration in screenhouses—a case study with table-grape. *Int J Biometeorol.* 58(5): 725-737.
- Pandey, P. K; Dabral, P. P. and Pandey, V. (2016). Evaluation of reference evapotranspiration methods for the northeastern region of India. *International Soiland Water Conservation Research* 4(1): 52–63.
- Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2): 81–92
- Pulido, A. R.; García, P. Y. 2019. H Ayuntamiento de Texcoco. Consultado en <https://es.wikipedia.org/wiki/Texcoco>.
- Romanenko, V. A. (1961). Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area. *Proc. of Ukrainian Hydrometeorological Research Institute*, 3(1): 12-25.
- Stephens, J.C. (1965). Discussion of estimating evaporation from insolation. *J. Hydraul.*, 504(91): 171-182.
- Trajkovic, S. (2005). Temperature based approaches for estimation of reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(4): 316–323.
- Turc, L. (1961). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *Annals of Agronomy* 12(1): 13-49.

- Xu, C. Y., & Singh, V. P. (2001). Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrological Processes*, 15(2): 305–319
- Zotarelli, L., Dukes, M. D., Romero, C. C., Migliaccio, K. W., & Morgan, K. T. (2010). Step by step calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method). *Institute of Food and Agricultural Sciences*. University of Florida:10 pp.

## 6. TEMPERATURAS CARDINALES Y GRADOS DÍAS DE DESARROLLO DEL NOPAL VERDURA VARIEDAD ATLIXCO

Martin Azúa Barrón<sup>1</sup>, Mario Alberto Vázquez Peña<sup>2</sup>

### RESUMEN

#### Resumen

El nopal se considera originario de México, su metabolismo propio de las crasuláceas lo hace una planta resistente a la sequía y muy adaptado a las condiciones de nuestro país, para los mexicanos es de gran importancia y se le ha dado usos desde tiempos prehispánicos. Es una planta poco estudiada si se compara con cultivos como los cereales u oleaginosas. En la producción intensiva de cultivos el conocer las necesidades de la planta es fundamental para una producción óptima. La temperatura es una variable que tiene efectos tanto positivos como negativos en las plantas, el nopal no es la excepción y reacciona a los estímulos de esta. El objetivo fue determinar las temperaturas cardinales del nopal verdura y los grados días de desarrollo necesarios entre cortes consecutivos de nopalitos tiernos para consumo humano, al utilizar diferentes métodos de cálculo. Con mediciones realizadas al nopal verdura variedad Atlixco bajo condiciones de invernadero y al aire libre de variables meteorológicas, en la Universidad Autónoma Chapingo en el Estado de México y con las metodologías: mínima desviación estándar en grados, método de Arnold y modelo curvilíneo de temperatura reportadas en la literatura. Se determinaron los valores de la temperatura base de 6.34 °C, la óptima de 29.02 °C y la temperatura umbral de 33.13 °C. Los grados días de desarrollo obtenidos fueron: 702.3, 735.6 y 817.12 al aplicar los métodos: Seno simple, Triangulo Simple y Residual respectivamente. El valor numérico de las temperaturas cardinales y los grados días de desarrollo necesarios para completar la etapa fenológica dependen del método utilizado.

**Palabras clave:** nopal verdura, temperaturas cardinales, temperatura base, temperatura óptima, grados días de desarrollo.

#### Abstract

The nopal is considered native of Mexico, its own metabolism crassulacean makes it a drought resistant plant and very adapted to the conditions of our country, for Mexicans is of great importance and has been given use since pre-Hispanic times. It is a little studied plant if it is compared with crops such as cereals or oilseeds. In the intensive production of crops knowing the needs of the plant is essential for optimal production. The temperature is a variable that has both positive and negative effects on plants, the cactus is not the exception and reacts to the stimuli of this. The objective was to determine the cardinal temperatures of the nopal vegetable and the necessary days of development between consecutive cuts of tender nopalitos for human consumption, when using different calculation methods. With measurements made to the nopal vegetable variety Atlixco under greenhouse conditions and outdoors of meteorological variables, in the Autonomous University Chapingo in the State of Mexico and with the methodologies: minimum standard deviation in degrees, Arnold method and curvilinear temperature model reported in the literature. The values of the base temperature of 6.34 °C, the optimum of 29.02 °C and the threshold temperature of 33.13 °C were determined. The degrees of development days obtained were: 702.3, 735.6 and 817.12 when applying the methods: Simple sinus, Triangle Simple and Residual respectively. The numerical value of the cardinal temperatures and the days of development needed to complete the phenological stage depend on the method used.

**Keywords:** nopal vegetable, cardinal temperatures, base temperature, optimal temperature, degrees days of development.

<sup>1</sup>Tesista

<sup>2</sup>Director

## 6.1. Introducción

Las cactáceas son consideradas autóctonas del continente americano y en las zonas áridas de México es donde se albergan la mayor cantidad de especies (Bravo, 1978). El nopal por su resistencia a la sequía es un cultivo que prospera en terrenos con cierto nivel de aridez, en México son aproximadamente el 48.29 por ciento del territorio (Flores, 2002). Según CONAZA (1994) en México hay más de 100 especies del género opuntia y los botánicos lo consideran el centro de origen de los nopales. El nopal se cultiva en más de 25 países para aprovechar la tuna, el nopal tierno o el nopal maduro, y en México se tiene una producción comercial de nopal verdura de 12,041 ha con rendimientos de 9.03 a 99.93 t ha<sup>-1</sup> con un promedio de 64.33 t ha<sup>-1</sup> (Blanco *et al.*, 2010). El principal problema para la comercialización de los nopales tiernos es el precio bajo la mayor parte del año cuando los mercados están saturados, y solo en los meses de noviembre a febrero los precios son elevados (Flores, 2001).

Los ciclos biológicos de muchos organismos dependen de la temperatura del medio ambiente (Herms, 2004; Flores *et al.*, 2016). Los efectos son positivos y negativos en la vida vegetal, la acción positiva se ejerce en la planta por la acumulación de calor, que es la energía necesaria para cumplir su ciclo ontogénico y mediante los grados días de desarrollo se cuantifica esta (Angeloni *et al.*, 2001). Las plantas requieren una cierta cantidad de calor para ir de una etapa fenológica a otra, su desarrollo depende de la temperatura, ciertas temperaturas aceleran el desarrollo y otras lo retardan (Miller *et al.*, 2001). Vidal *et al.* (2010) mencionaron que conocer los efectos de esta variable en los cultivos permite definir estrategias de manejo para optimizar la productividad. Cada planta tiene un requisito específico de temperatura antes de que ciertos estados fenológicos se alcancen (Sikder, 2009).

El concepto grados días se originó con las observaciones realizadas por Reamur en 1735, en las que notó que el desarrollo de las plantas estaba más relacionado a la temperatura acumulada en una etapa dada, que al tiempo transcurrido (Neild y Seeley, 1977). Mediante los grados días de desarrollo se asigna un cierto valor de calor a cada día y se suma todos los valores de los días para completar una etapa (Miller *et al.*, 2001). Para el cálculo de los grados días de desarrollo es necesario conocer el umbral térmico o temperatura base, que es diferente para cada cultivo y también para las diferentes etapas de este. Este concepto

se conoce con varios nombres: suma de temperaturas efectivas, suma de unidades térmicas, suma de unidades calor o suma de grados día ( $^{\circ}\text{C d}$ ) (Flores *et al.*, 2016). El método de grados días de desarrollo es independiente del ambiente y del año, por lo que, es adecuado para describir el desarrollo de los cultivos (Salazar *et al.*, 2013).

La temperatura y los grados días de desarrollo son dos variables que afectan directamente las funciones de la planta en cuanto a: evapotranspiración, fotosíntesis, respiración y a nivel de los tejidos el movimiento de agua y nutrientes (Hassan *et al.*, 2007). Los grados días se utilizan para estimar el crecimiento potencial de los cultivos (Salazar *et al.*, 2008). En el cultivo de la caña de azúcar, la evapotranspiración acumulada tiene una correlación lineal con los grados días de desarrollo, por lo que, en los modelos de estimación de rendimientos agrícolas los grados días sirven para estimar la evapotranspiración (Ferrer *et al.*, 2014). Almaguer *et al.* (2014) generaron modelos de regresión entre la acumulación de los GDD y la acumulación de biomasa de nopalitas para consumo humano, en los que usaron como  $T_b$  el valor de  $10^{\circ}\text{C}$ .

El cultivo de nopal tiene ciertos requerimientos térmicos, de acuerdo con Ríos y Quintana (2004) el nopal requiere una temperatura media anual entre  $16$  y  $28^{\circ}\text{C}$ . Russell y Felker, (1987) indican que las temperaturas altas pueden disminuir el desarrollo y que el nopal soporta temperaturas hasta de  $65^{\circ}\text{C}$  durante una hora sin presentar daños y menores de  $5^{\circ}\text{C}$  el nopal presenta daño celular. Según SAGARPA (2015) el nopal ha despertado un interés genético al ser diversos los ambientes a los que se ha adaptado, se ha encontrado en regiones donde las temperaturas descienden a  $-40^{\circ}\text{C}$ . Flores *et al.* (2004) coinciden con Ríos y Quintana (2004) en la temperatura media, pero indican que una temperatura de  $-2^{\circ}\text{C}$  y una máxima de  $45^{\circ}\text{C}$  por tiempos prolongados pone en riesgo la producción e incluso la supervivencia de la planta.

Los objetivos son determinar las temperaturas cardinales del nopal verdura y los grados días necesarios desde que brotan los nopalitas tiernos hasta que alcanzan el tamaño comercial, al utilizar diferentes métodos de cálculo.

## 6.2. Materiales y métodos

### 6.2.1. Localización

El trabajo se realizó en la estación meteorológica del departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo, se utilizaron dos invernaderos: uno con ventilación lateral, con un área útil para el cultivo de 105 m<sup>2</sup>, un volumen aproximado de aire de 550 m<sup>3</sup>, cubierta de plástico y estructura de metal con orientación Norte-Sur (Figura 6.1), otro con ventilación lateral y con un área útil para el cultivo de 8.5 m<sup>2</sup> y un volumen aproximado de aire de 23.5 m<sup>3</sup> con cubierta de plástico y estructura de metal con orientación Norte-Sur (Figura 6.2). Adicionalmente se ubicaron plantas al ambiente Figura 6.3.



Figura 6.1. Invernadero con un volumen de aire de 550 m<sup>3</sup> y área útil de 105 m<sup>2</sup>.



Figura 6.2. Invernadero con un volumen de 23.5 m<sup>3</sup> y área útil de 8.5 m<sup>2</sup>.



Figura 6.3. Plantas en el ambiente.

La localización geográfica es latitud 19.483° N y longitud 98.900° W con una altura de 2250 msnm. El clima de la localidad es de tipo Cb(Wo)(W)(i)g, templado subhúmedo con lluvias en verano, una época seca en invierno y con oscilación térmica de 5 a 7 °C. La temperatura media anual es de 17.2 °C, el mes más caliente es mayo con una temperatura media de

19.7 °C y con 14.1 °C enero es el más frío. La precipitación media anual es de 598 mm con vientos dominantes del sur (Pulido y García, 2019).

### **6.2.2. Cultivo**

La variedad de nopal utilizada fue la Atlixco que se considera sin espinas con una alta resistencia a la falta de agua y con un crecimiento rápido y vigoroso, se utiliza para la producción de verdura, además por su gran productividad en la producción intensiva de forraje en las zonas áridas y semiáridas del norte de la república (INIFAP, 2008).

El cultivo se estableció en macetas de plástico de 14 L de volumen, llenas con suelo, obtenido de los terrenos agrícolas de la estación meteorológica y se regó con una probeta graduada, con solución nutritiva Steiner (1961) con concentración de 37.5 mmol L<sup>-1</sup>. El suelo usado de acuerdo con el análisis que realizaron López *et al.* (2010), corresponde a un franco arcilloso, con una densidad aparente que varía con la profundidad de 1.25 g cm<sup>-3</sup> a los 10 cm de profundidad y 1.36 g cm<sup>-3</sup> a los 30 cm, con porcentajes de humedad a CC y PMP de 29.6 y 16.5 respectivamente.

### **6.2.3. Medición de temperatura**

Se midió la temperatura con el sensores LM35DZ que se instrumentó en un Sistema de adquisición de datos, con base en la plataforma arduino para almacenar la temperatura (Azua *et al.*, 2017), cada hora durante varios ciclos, desde el inicio de la brotación hasta el corte de los nopalitas ya con características comerciales, calibre C (17 a 21 cm de largo) de acuerdo a la norma (CODEX, 2007). Se establecieron lotes de cinco plantas, que se escalonaron en cuanto a sus fechas de cortes, para tener repeticiones.

### **6.2.4. Aspectos teóricos de los grados días de desarrollo**

El desarrollo se define como una secuencia de eventos fenológicos que constituyen el ciclo de vida, de forma que cada fase se caracteriza por morfologías y procesos fisiológicos distintos (De Cara, 2006).

Los modelos de desarrollo de los cultivos con base en la temperatura, describen el progreso hacia un desarrollo objetivo, como completar una etapa fenológica, las Ecuaciones (6.1 a 6.7) son detalladas por Moore y Remais (2014).

Si  $\frac{1}{d}$  representa la tasa de desarrollo (en unidades  $d^{-1}$ ) y está en función de la temperatura diaria  $T$  ( $^{\circ}C$ ), la ganancia diaria de desarrollo  $D$  está dada por:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{1}{d}(T) \quad (6.1)$$

El desarrollo en el transcurso de un tiempo de  $t_1$  a  $t_2$  (d) se representa por:

$$D = \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{d}(T(t))dt \quad (6.2)$$

Se condiciona a que  $D=0$  cuando inicia el desarrollo y  $D=1$  cuando se completa.

Como  $\frac{1}{d}(T)$  no es constante en todo el rango de temperaturas observadas durante el desarrollo, entonces:

$$\frac{1}{d}(T) = f(T, T_b, T_o, T_u) \quad (6.3)$$

Donde:  $T$  es la temperatura observada,  $T_b$  es la temperatura base,  $T_o$  es la temperatura óptima y  $T_u$  es la temperatura umbral máxima, todas en ( $^{\circ}C$ ).

Usualmente los modelos de GDD expresan la tasa de ganancia como una función lineal:

$$\frac{1}{d} = \begin{cases} \frac{T}{GDD} - \frac{T_b}{GDD}, & T_b < T(t) < T_u \\ 0, & \text{de otra manera} \end{cases}$$

$$D(t) = \begin{cases} \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{T}{GDD} - \frac{T_b}{GDD} \right) dt, & T_b < T(t) < T_u \\ 0, & \text{de otra manera} \end{cases}$$

Los grados días de desarrollo (GDD) dependen de la especie y del desarrollo objetivo y para una etapa en particular:

$$GDD * D(t) = \int_{t_1}^{t_2} (T - T_b)dt \quad (6.4)$$

Cuando se transita de  $t_1$  al  $t_2$  entonces  $D(t)=1$

$$\text{GDD} = \int_{t_1}^{t_2} (T - T_b) dt \quad (6.5)$$

En términos generales los GDD se expresan:

$$\text{GDD} = \int_{t_1}^{t_2} (T(t)) dt \quad (6.6)$$

Los modelos típicos de grados días de desarrollo hacen la acumulación lineal de calor de acuerdo a la Ecuación 6.7.

$$T(t) = \begin{cases} T(t) - T_b, & \text{si } T_b < T(t) < T_u \\ T_u - T_b, & \text{si } T_u < T(t) \\ 0, & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (6.7)$$

### 6.2.5. Métodos para determinar la temperatura base

Para dar solución a los métodos y obtener los valores de las temperaturas cardinales se utilizaron rutinas específicas programadas en R 3.5.0 (R Core Team., 2018).

Los métodos para la estimación de la temperatura base se describen por Yang *et al.* (1995):

a) *Mínima desviación estándar en grados*

$$SD_{\text{gdd}} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (\text{GDD}_i - \text{MGDD})^2}{n-1} \right)^{0.5} \quad (6.8)$$

Donde:  $SD_{\text{gdd}}$  es la desviación estándar de los grados días de desarrollo,  $\text{GDD}_i$  son los grados días de desarrollo de la repetición  $i$  con el método residual,  $\text{MGDD}$  es el promedio de los valores de los grados días de desarrollo de las repeticiones,  $n$  es el número de repeticiones utilizadas.

Con la Ecuación 6.8 para la obtención del valor de  $T_b$ , se hace necesario proponer diferentes valores de temperatura candidatos a ser  $T_b$  y el valor propuesto con el que se obtenga el valor menor de  $SD_{\text{gdd}}$  corresponde al valor de  $T_b$  buscado.

Yang *et al.* (1995) derivó la Ecuación 6.9 para el cálculo de  $T_b$  en la que se evita proponer diferentes valores de temperatura candidatos a ser  $T_b$ :

$$T_b = \frac{\sum_1^n Tm_i d_i \sum_1^n d_i - n \sum_1^n Tm_i d_i^2}{(\sum_1^n d_i)^2 - n \sum_1^n d_i^2} \quad (6.9)$$

Donde:  $T_b$  es la temperatura base en (°C),  $Tm_i$  es la temperatura promedio de la repetición  $i$  (°C), y  $d_i$  es la duración de la etapa  $i$  en días.

*b) Método de Arnold (1959)*

Basado en las Ecuaciones 6.10 y 6.11:

$$\frac{1}{d_i} = a + b * T_i \quad (6.10)$$

Donde:  $d_i$  es el número de días necesarios para completar la etapa fenológica de la repetición  $i$ ,  $a$  y  $b$  son coeficientes de regresión, y  $T_i$  es la temperatura media observada durante la duración de la etapa fenológica de la repetición  $i$ .

En la Ecuación 6.10),  $\frac{1}{d}$  es la tasa de desarrollo, por lo que cuando  $\lim_{d \rightarrow \infty} \frac{1}{d} = 0$ , condición en la que no hay desarrollo y  $T_i = T_b$  y se calcula con:

$$T_b = -\frac{a}{b} \quad (6.11)$$

Donde:  $T_b$  es la temperatura base (°C).

Este método requiere datos de repeticiones de etapas fenológicas que en su diagrama de dispersión muestren tendencia ascendente, por lo que se utilizan datos de temperaturas medias y tasas de desarrollo en el rango subóptimo y óptimo.

*c) Modelo curvilíneo de temperatura*

Descrito por Robertson (1983) se basa en la ecuación cuadrática siguiente:

$$\frac{1}{d} = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 T^2 \quad (6.12)$$

Donde:  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  son coeficientes de la regresión cuadrática y  $T$  es la temperatura media (°C) durante los días necesarios para completar la etapa fenológica.

Donde la temperatura base (°C) se calcula con la Ecuación 6.13

$$T_b = \frac{-\beta_1 + (\beta_1^2 - 4\beta_0\beta_2)^{0.5}}{2\beta_2} \quad (6.13)$$

La temperatura óptima con la Ecuación 6.14

$$T_o = \frac{-\beta_1}{2\beta_2} \quad (6.14)$$

y la temperatura umbral máxima (°C) con la Ecuación 6.15

$$T_u = \frac{\ln(2C^{T_o} - C^{T_b})}{\ln C} \quad (6.15)$$

Donde: C es una constante 1.15.

*d) Método Propuesto para la determinación de la  $T_b$  y GDD.*

Se propone un método para el cálculo de las variables  $T_b$  y los grados días de desarrollo con las propiedades de las matrices:

El método residual parte de una serie de n mediciones a nivel diario de la forma:

$T_{min_1}$	$T_{max_1}$	día 1
$T_{min_2}$	$T_{max_2}$	día 2
$T_{min_3}$	$T_{max_3}$	día 3
....	....	....
$T_{min_n}$	$T_{max_n}$	día n

El cálculo de los grados días de desarrollo con el método residual para cada día se determinan con la Ecuación:

$$GDD_i = \left( \frac{T_{max_i} - T_{min_i}}{2} - T_b \right) \quad (6.16)$$

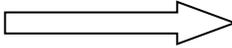
Donde:  $GDD_i$  son los grados días de desarrollo del día<sub>i</sub>,  $T_{max_i}$  temperatura máxima del día<sub>i</sub> (°C),  $T_{min_i}$  temperatura mínima del día<sub>i</sub> (°C),  $T_b$  temperatura base de la etapa (°C).

Para una etapa fenológica en particular según la Ecuación 6.17 se tiene la siguiente equivalencia:

$$GDD_j = (Tm_j - Tb) * d_j \quad (6.17)$$

Donde:  $GDD_i$  son los grados días de desarrollo necesarios para completar la etapa fenológica  $j$ ,  $Tm_j$  es la temperatura media de toda la etapa fenológica ( $^{\circ}C$ ),  $Tb$  temperatura base ( $^{\circ}C$ ),  $d_j$  es la duración de la etapa fenológica en días (d).

Por lo que para  $k$  etapas fenológicas medidas se tiene:

$(Tm_1 - Tb) d_1 = GDD$	Las que son	$Tb * d_1 + GDD = Tm_1 * d_1$
$(Tm_2 - Tb) d_2 = GDD$	equivalentes	$Tb * d_2 + GDD = Tm_2 * d_2$
$(Tm_3 - Tb) d_3 = GDD$		$Tb * d_3 + GDD = Tm_3 * d_3$
.....		....
$(Tm_k - Tb) d_k = GDD$		$Tb * d_k + GDD = Tm_k * d_k$

En términos de matrices:

$$\begin{pmatrix} d_1 & 1 \\ d_2 & 1 \\ d_3 & 1 \\ \dots & \\ d_k & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Tb \\ GDD \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Tm_1 * d_1 \\ Tm_2 * d_2 \\ Tm_3 * d_3 \\ \dots \\ Tm_k * d_k \end{pmatrix}$$

A                      x                      =                      B

La matriz A y el vector B se conocen, solo se desconoce el vector x, y la solución a este tipo de matrices de acuerdo al algebra lineal es la Ecuación 6.18:

$$x = (A^t B)^{-1} (A^t B) \quad (6.18)$$

x es el vector solución que contiene a Tb y GDD.

De manera equivalente la solución se calcula con las Ecuaciones 6.19 y 6.20:

$$Tb = \frac{n \sum_1^n Tm_i d_i^2 - \sum_1^n d_i \sum_1^n Tm_i d_i}{n \sum_1^n d_i^2 - (\sum_1^n d_i)^2} \quad (6.19)$$

$$GDD = \frac{\sum_1^n d_i \sum_1^n Tm_i d_i^2 - \sum_1^n d_i^2 \sum_1^n Tm_i d_i}{(\sum_1^n d_i)^2 - n \sum_1^n d_i^2} \quad (6.20)$$

### **6.2.6. Métodos de cálculo de los grados días de desarrollo**

#### *a) Método residual*

Es el más usado (Ortiz, 2011) y se calcula de acuerdo a la Ecuación 6.16.

#### *b) Método seno simple*

Modela la temperatura de 24 horas con la función seno ajustada a las temperaturas mínimas y máxima diarias, este método ha corregido errores encontrados en otros que utilizan umbrales máximos y mínimos. Las fórmulas y los detalles de la aplicación de este método son presentados por Agricultural y Natural Resources de la Universidad de California (2018).

#### *c) Método triangulo simple*

Modela la curva de temperatura de 24 horas con un triángulo, se ajustan las temperaturas mínimas y máximas del día correspondiente, con el supuesto que las temperaturas diarias son simétricas alrededor de la temperatura máxima. Los GDD son el valor del área bajo las líneas del triángulo y entre los umbrales. Las fórmulas y los detalles del método son presentados por ANRUC, (2018).

### **6.2.7. Modelos para estimar los GDD del seno simple a nivel diario en función de las temperaturas extremas**

Para los valores de  $T_b$  y  $T_u$  obtenidos para el nopal verdura en este trabajo y con los datos de GDD calculados con el método de seno simple para cada día durante el periodo de medición de variables meteorológicas, se construyeron modelos (para cada invernadero, aire libre, invernaderos conjuntos y todos los datos conjuntos) con regresión lineal múltiple, donde la variable dependiente fue los GDD y las independientes fueron las temperaturas máximas y mínimas diarias, para cada condición con el 75% de los datos se generaron los modelos y con el 25% restante se validaron.

### **6.2.8. Cálculo de los intervalos de confianza del error en los días necesarios para completar la etapa fenológica**

Con las temperaturas cardinales y los GDD promedio de un método. Y con los datos de  $T_x$  y  $T_m$  registrados, se calculó y sumó los grados días de desarrollo desde el día que inició la etapa hasta que se obtuvo el número de GDD promedio, el número de días así obtenido

es el teórico, posteriormente se comparó con el real (número de días del inicio al final de la etapa fenológica), si los días teóricos fueron más, entonces a la diferencia se le asignó el valor negativo (el cultivo se anticipó) y positivo cuando el cultivo se tardó más que el número de días teórico. A los datos así obtenidos se les obtuvo el intervalo de confianza al 95 % con una librería de R Project 3.5.0 (R Core Team., 2018).

### 6.2.9. Estadísticos utilizados

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y raíz del cuadrado medio del error (RSE) sus procedimientos de cálculo y teoría se detallan en (Draper and Smith, 1998)

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_1^n (O_i - \bar{O})(E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_1^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_1^n (E_i - \bar{E})^2}} \right]^2 \quad (6.21)$$

$$RSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (E_i - O_i)^2} \quad (6.22)$$

Donde: E y O son los valores estimados y observados o medidos y sus promedios  $\bar{E}$  y  $\bar{O}$  respectivamente.

## 6.3. Resultados y discusión

### 6.3.1. Método de la mínima desviación estándar

Para la aplicación de la Ecuación 6.8, su autor sugiere que se utilicen al menos tres repeticiones, en este caso fueron 41, se generaron las Figuras 6.4 y 6.5 en las que la variable independiente fue la temperatura base y las dependientes fueron: la desviación estándar y los GDD respectivamente, en las que se define el valor de  $T_b=6.19$  °C con un valor de desviación estándar de los GDD de 130 (°C d), para este caso fue la mínima que se obtuvo (Figura 6.4). Se generó la gráfica que relaciona las temperaturas básicas propuestas y los GDD promedio de las repeticiones, para el caso que se ilustra es de 818.6 (°C d) necesarios para que se complete la etapa fenológica desde que brotan los nopalitos tiernos hasta que se cosechan (Figura 6.5). SAGARPA (2015) indicó que el nopal ha

prosperado en regiones donde la temperatura desciende a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  por lo que se estudió un rango para las temperaturas base de  $-20$  a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

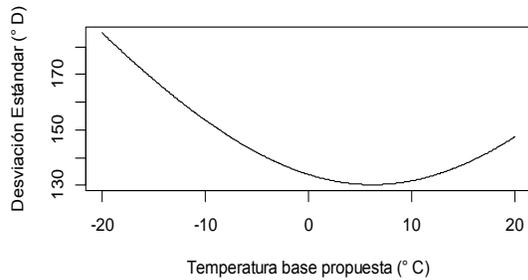


Figura 6.4. Gráfica entre la  $T_b$  propuesta ( $^{\circ}\text{C}$ ) y la Desviación Estándar ( $^{\circ}\text{D}$ ).

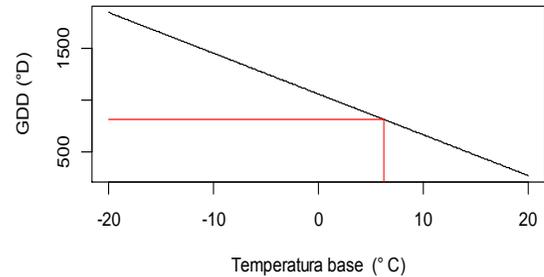


Figura 6.5. Gráfica entre la  $T_b$  y los GDD, para una  $T_b$  de  $6.19\text{ }^{\circ}\text{C}$  se indica un valor de GDD de 818.6.

Con este método se obtuvo la  $T_b$  y los GDD fueron calculados con el método residual, con 41 repeticiones. También se calculó el valor de  $T_b$  con la fórmula derivada por Yang *et al.* (1995) (Ecuación 6.9), la que dió resultados similares.

### 6.3.2. Método de Arnold

Con base en las Ecuaciones (6.10 y 6.11), se graficaron los datos que corresponden a 12 repeticiones que cumplieron con la condición de estar en el rango subóptimo y óptimo del desarrollo, la variable independiente fue la temperatura media ( $T_m$ ) y la independiente la tasa de desarrollo ( $\frac{1}{d}$ ), se aprecia el diagrama de dispersión y la ecuación lineal de ajuste (Figura 6.6). Con la Ecuación 6.11 se obtuvo el valor de  $T_b=5.79\text{ }^{\circ}\text{C}$  y los  $\text{GDD} = \frac{1}{b}$  donde  $b$  es el coeficiente de la Ecuación 6.10, los GDD fueron  $755.46\text{ }^{\circ}\text{C d}$ .

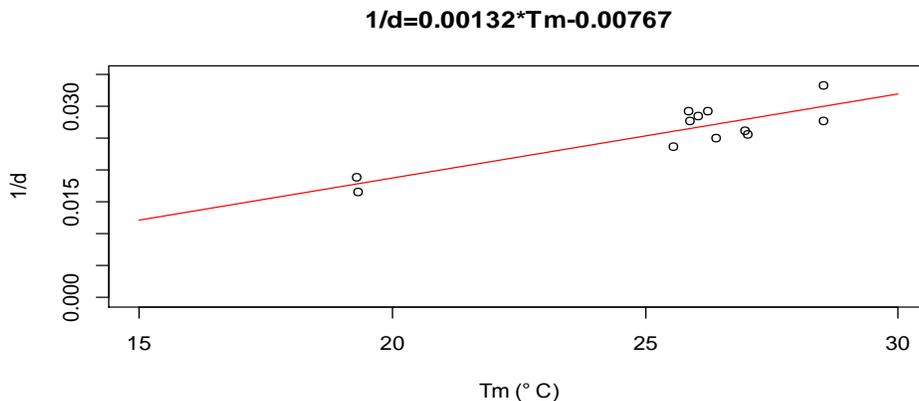


Figura 6.6. Resultado de la implementación del método de Arnold.

### 6.3.3. Método Curvilíneo

Fue descrito por Robertson (1983), está basado en las Ecuaciones de la 6.12 a 6.15, se utilizaron datos de  $1/d$  (variable dependiente) y  $T_m$  (variable independiente), con 41 repeticiones, la dispersión de los datos se aprecia con los círculos negros, la línea es la curva del desarrollo en función de la  $T_m$ , esta inicia en la  $T_b= 6.34$  °C, a temperatura más baja el nopal no se desarrolla, alcanza su máxima tasa de desarrollo en la temperatura óptima  $T_o= 29.02$  °C, después la curva muestra un decaimiento y llega a cero cuando se alcanza la temperatura umbral máxima  $T_u=33.13$  °C, después no se presenta crecimiento. De acuerdo a los resultados anteriores el nopal solo produce biomasa en el rango de 6.34 °C a 33.13 °C. Para un modelado más real de la respuesta de las plantas a la temperatura Yan y Hunt (1999) proponen una expresión derivada de la función beta que se ajusta a datos experimentales de tres parámetros (temperatura mínima ( $T_b$ ), temperatura óptima ( $T_o$ ) y temperatura máxima ( $T_u$ ), la que también se grafica en color azul (Figura 6.7).

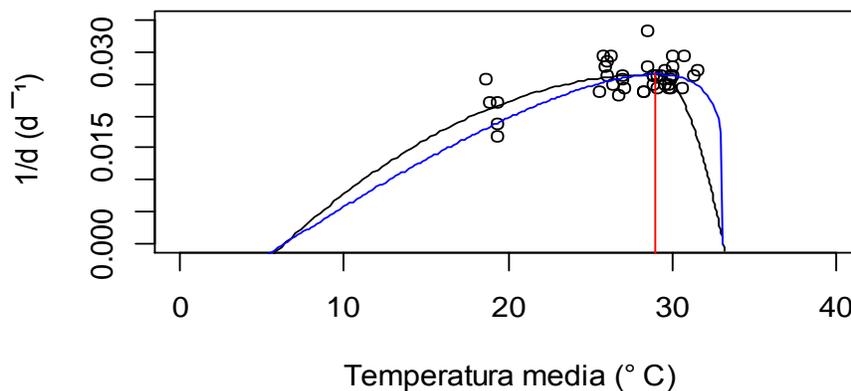


Figura 6.7. Diagrama de dispersión entre las tasas de desarrollo ( $1/d$ ) y las temperaturas medias ( $T$ ), al implementar el método curvilíneo se obtiene la curva que inicia en la  $T_b=6.34$  °C y termina en la  $T_u=33.13$  °C (línea negra) se señala la  $T_o$  que corresponde a 29.02 °C (línea roja), y la curva de ajuste con la función beta (color azul),  $n=41$ .

Como lo indicaron Yang *et al.* (1995) el valor de  $T_b$  depende del método utilizado en su determinación y en ocasiones estas  $T_b$  no tienen significado biológico. Los métodos más robustos fueron el de la mínima desviación estándar en GDD, el método propuesto y el curvilíneo que fueron independientes del número de repeticiones utilizadas y de la tendencia del diagrama de dispersión de los datos de las repeticiones.

Por lo anterior en este trabajo se define los valores de  $T_b=6.34\text{ }^\circ\text{C}$  y una  $T_o =29.02\text{ }^\circ\text{C}$  y una  $T_u=33.13\text{ }^\circ\text{C}$ .

*Método Propuesto*

Con los datos de las 41 repeticiones se implementó el método propuesto basado en las Ecuaciones (6.16 a la 6.20).

Cuadro 6.1. Datos de las repeticiones para ilustrar el método propuesto, Ecuaciones (6.16 a 6.20).

$T_{mj}$	$d_j$
26.08	38
28.53	36
28.54	30
...	...
19.31	60

De acuerdo con las Ecuaciones de la 6.16 a 6.20:

$$\begin{pmatrix} 38 & 1 \\ 36 & 1 \\ 30 & 1 \\ \dots & \\ 60 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_b \\ \text{GDD} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 26.08*30 \\ 28.53*36 \\ 28.54*30 \\ \dots \\ 19.31*60 \end{pmatrix}$$

A                      x                      =                      B

$$\begin{pmatrix} 38 & 36 & 30 \dots & 60 \\ 1 & 1 & 1 \dots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 38 & 1 \\ 36 & 1 \\ 30 & 1 \\ \dots & \\ 60 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_b \\ \text{GDD} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 38 & 36 & 30 & \dots & 60 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 782.40 \\ 1027.08 \\ 856.20 \\ \dots \\ 1158.6 \end{pmatrix}$$

A<sup>t</sup>                      \*                      A                      x                      =                      A<sup>t</sup>                      \*                      B

$$\begin{pmatrix} 64860 & 1618 \\ 1618 & 41 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_b \\ \text{GDD} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1725672.73 \\ 43570.38 \end{pmatrix} \quad T_b=6.19\text{ }^\circ\text{C} \text{ y } \text{GDD}=818.6\text{ }^\circ\text{C d}$$

Se presentan los valores obtenidos de  $T_b$ ,  $T_o$ ,  $T_u$  y GDD con los diferentes métodos utilizados en este trabajo, donde se aprecia que los resultados fueron similares, con el método de Arnold se obtuvieron los valores menores de  $T_b$  y GDD (Cuadro 6.2).

Cuadro 6.2. Resumen de las temperaturas cardinales obtenidas con los métodos.

Método	Tb (°C)	GDD (°C d)	To (°C)	Tu (°C)
<b>Método residual</b>				
Mínima desviación estándar en grados	6.19	818.6	---	---
Arnold	5.79	755.46	---	---
Curvilíneo	6.34	858.4	29.02	33.13
Método propuesto	6.19	818.62	---	---

Con los datos de los 41 ciclos utilizados para la obtención de las temperaturas cardinales y con los valores de estas (Tb=6.34, To=29.02 y Tu=33.13) se calcularon los grados días de desarrollo con cada método obteniéndose los siguientes promedios: 702.3, 735.6 y 817.12 para los métodos de Seno simple, Triangulo Simple y Método residual respectivamente.

Los intervalos de confianza del error al 95 por ciento y los RSE en días de cada método para la predicción de la duración de la etapa fenológica se presentan en el Cuadro 6.3.

Cuadro 6.3 . Cálculo de la media, los intervalos de confianza y la raíz del cuadrado medio del error en la estimación de los días necesarios para completar la etapa fenológica con los datos usados para determinar las temperaturas cardinales y los grados días de desarrollo.

Método	Media (d)	Límite inferior (d)	Límite Superior (d)	RSE (d)
Seno simple	-0.4	-2.3	+1.4	5.6
Triángulo simple	-0.7	-2.7	+1.3	6.4
Método Residual	-1.3	-4.0	+1.4	8.5

El signo negativo indica que las etapas medidas se tardaron menos que lo estimado con el método y los valores positivos indican que se tardaron más, n=41.

La fecha de terminación de la etapa fenológica fue en promedio un día menor a la estimada con los métodos y al 95 % de certeza se tardaría de 1 a 2 días más. En esta fase el método residual al 95 % de certeza indica que es posible que el método estima hasta 4 días menos que los necesarios para completar la etapa fenológica. El método que estima fechas más apegadas a la real fue el de seno simple.

#### 6.3.4. Validación de los datos

Con datos de 11 repeticiones se validaron las predicciones de los métodos para estimar los días necesarios para completar la etapa fenológica, mediante la determinación de los días promedio e intervalos de confianza que se presentan en el Cuadro 6.4.

Cuadro 6.4. Cálculo de la media, los intervalos de confianza y la raíz del cuadrado medio del error en la predicción de los días necesarios para completar la etapa fenológica con los datos de validación.

Método	Media (d)	Límite inferior (d)	Límite Superior (d)	RSE (d)
Seno simple	0.9	-2.3	4.1	4.7
Triángulo simple	0.9	-2.3	4.1	4.6
Método Residual	0.8	-2.8	4.4	5.2

El signo negativo indica que las etapas medidas se tardaron menos que lo estimado con el método y los valores positivos indican que se tardaron más, n=11.

Los métodos Seno simple y Triangulo simple estimaron un día más para la terminación de la etapa fenológica, el método residual fue el que presentó una media del error de 0.8 y los intervalos de confianza al 95 por ciento indican que: el método residual tiene una amplitud mayor ( $\pm 3.6$  días) y los métodos Seno y Triangulo simple ( $\pm 3.2$  días). El método del seno simple indica que la etapa bajo estudio puede tardarse hasta 4.1 días más y anticipar hasta 2.3 con un 95% de certeza y el residual que la etapa se tarda hasta 4.4 días y se anticipa hasta 2.8 con un 95 % de certeza. Los valores de RSE fueron mayores en los métodos de seno simple y método residual: de 4.7 d y 5.2 d respectivamente y para el método de seno simple fue de 4.6 d, estos valores fueron menores en la etapa de validación y en la etapa de generación de los modelos fueron mayores.

#### 6.3.5. Modelos para estimar los GDD del seno simple a nivel diario en función de las temperaturas extremas

Para las tres condiciones en las que se llevó a cabo el experimento (dos invernaderos y al ambiente) se construyeron modelos empíricos para estimar los grados días de desarrollo a nivel diario similares a los del método seno simple de una manera fácil y con poco error en función de las temperaturas máxima, mínimas ( $T_x$  y  $T_m$ ) y las temperaturas cardinales del nopal verdura definidos en este trabajo ( $T_b=6.34$  y  $T_u=33.13$ ), los modelos se presentan en el Cuadro 6.5.

Cuadro 6.5. Modelos para estimar datos similares a los del Seno Simple en función de la temperatura máxima (Tx) y temperatura mínima (Tm).

Condición	Modelo	Generación		Evaluación	
		R <sup>2</sup>	RSE (°C d)	R <sup>2</sup>	RSE (°C d)
Invernadero (105 m <sup>2</sup> )	GDDd= 0.402*Tm+0.143*Tx+7.62	0.976	0.24	0.985	0.14
Invernadero (8.5 m <sup>2</sup> )	GDDd= 0.472*Tm+0.255*Tx+2.14	0.956	0.32	0.957	0.15
Aire libre	GDDd= 0.498*Tm+0.496*Tx-6.22	0.999	0.03	0.999	0.01
Invernaderos	GDDd= 0.418*Tm+0.171*Tx+6.14	0.947	0.36	0.953	0.29
General	GDDd= 0.464*Tm+0.304*Tx-0.40	0.937	0.76	0.924	0.86

GDDd son los grados días por día (°C d), Tm es la temperatura mínima (°C) y Tx es la temperatura máxima (°C) para una temperatura base de 6.34 °C y temperatura umbral máxima de 33.13 °C.

Los tres primeros métodos corresponden a las condiciones en que se establecieron el nopal verdura y midieron los datos necesarios para determinar los GDD y las temperaturas umbrales, el cuarto es un modelo obtenido con los datos de los dos invernaderos y el general con todos los datos medidos para determinar un modelo que sirva para invernaderos y al aire libre. Los coeficientes de determinación indican que todos los modelos tienen tendencias entre los datos estimados con los modelos y los calculados con el método de seno simple, los RSE indican que los errores de los datos estimados con los modelos son bajos y el modelo llamado general es el que tiene el error más alto con un RSE de 0.86 °C d (Cuadro 6.5).

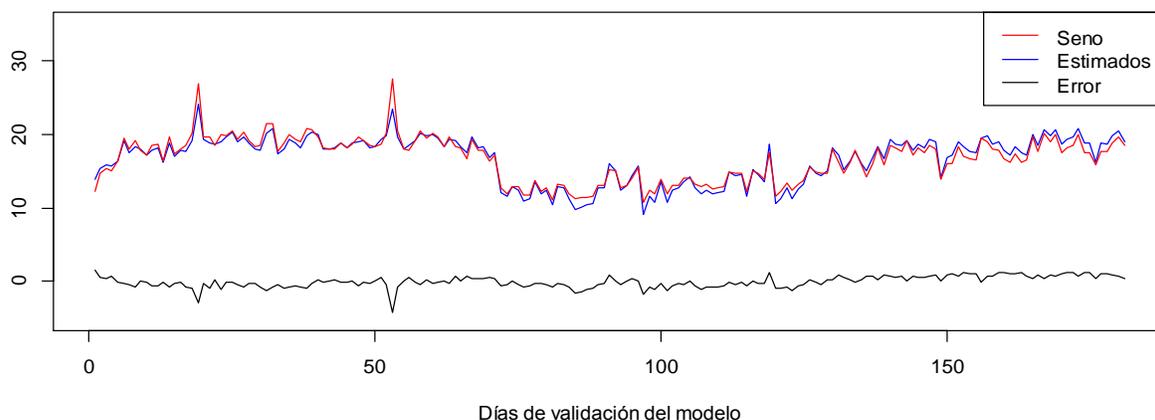


Figura 6.8 Marcha temporal de los GDD calculados con el método de seno simple y los estimados con el modelo General del Cuadro 6.5, así como la línea que corresponde al error.

Marcha temporal de los datos de GDD estimados con el método general (línea azul), los calculados con el método de senos simple (en rojo) y las diferencias entre ellos (línea

negra) con datos de 170 días de los invernaderos y al aire libre no usados para la generación del modelo, se aprecia que muestran apego y los errores son bajos (Figura 6.8).

#### **6.4. Conclusiones**

El nopal verdura es una planta que reacciona a la temperatura, en la producción de nopalitos tiernos se determinó una temperatura base de 6.34 °C con el método curvilíneo, y con los de desviación estándar, Arnold y propuesto fueron de: 6.19, 5.79 y 6.19 °C respectivamente.

Las temperaturas cardinales definidas para el nopal verdura son: 6.34, 29.02 y 33.13 °C, para temperatura base, optima y umbral máxima respectivamente.

Los grados días de desarrollo necesarios dependen del método empleado para su cálculo los que fueron: 702.3, 729.91 y 817.12 °C d para el seno simple, triángulo simple y método residual respectivamente.

Al estimar los días necesarios para completar la etapa fenológica desde la brotación de los nopalitos tiernos a la madurez comercial, los métodos seno simple, triángulo simple y método residual estiman duraciones similares.

Los métodos obtenidos para estimar los GDD a nivel diario similares al método seno simple tienen errores bajos en sus estimaciones para las condiciones que fueron generados.

#### **6.5. Literatura citada**

Agriculture & Natural Resources of University of California. ANRUC (2018). Consultado en [http://ipm.ucanr.edu/WEATHER/ddss\\_tbl.html](http://ipm.ucanr.edu/WEATHER/ddss_tbl.html).

Almaguer-Sierra, P., Rodríguez-Fuentes, H., Barrientos Lozano, L., Mora Ravelo, S. G., & Vidales-Contreras, J. A. (2014). Relación entre grados-día y la producción de *Opuntia ficus-indica* para consumo humano en Marín, Nuevo León. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(6): 1055-1065.

Angeloni, O., Caram, G. D. Y., & Prause, J. (2001). Utilización de dos temperaturas base para el cálculo de grados-día. Univ. Nac. Nor Este, FCA, Cátedra Climatología y Fenología Agrícolas. *Corrientes*. 4 pp.

Arnold, C. Y. (1959). The development and significance of the base temperature in a linear heat unit system. *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 74:430-445. 3 pp.

- Azúa-Barrón, M., Vázquez-Peña, M. A., Arteaga-Ramírez, R., & Hernández-Saucedo, R. (2017). Sistema de adquisición de datos de bajo costo con la plataforma arduino. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(1): 1-12.
- Blanco M. F., R.D. Valdez S., R. Magallanes Q., R.E Vázquez A., E. Olivares S., E. Gutiérrez O. y J. A. Vidales C. (2010). El Rendimiento e interacciones nutrimentales en nopal (*Opuntia ficus indica* L.). IX Simposium-Taller Nacional y II Internacional de producción de nopal y maguey. 12 y 13 de noviembre. Escobedo, N. L. Edición Especial No. 5-2011: 255-260.
- Bravo, (1978). Las cactáceas de México. Segunda edición. Volumen I. UNAM. 745 pp.
- CODEX-Alimentarius Commission. (2007). Comité del Codex sobre Frutas y Hortalizas Frescas. Norma para nopal. Codex stan, 185-1993.
- CONAZA. (1994). Cultivo alternativo para las zonas áridas y semiáridas de México. Instituto nacional de ecología. Ed primera. Saltillo, Coahuila. México. 18 pp.
- De Cara García, J. A. (2006). La observación fenológica en agrometeorología. *ambienta*, 65. 7 pp.
- Draper, N. R., & Smith, H. (1998). Applied regression analysis. John Wiley & Sons. (Vol. 326). Wisconsin, USA, 2014. 709 pp.
- Ferrer Reyes, M., Gálvez, G., Lamela, C., & Jiménez, G. (2014). Uso de los grados días acumulados en la estimación de la evapotranspiración de la caña de azúcar (*Saccharum* spp. híbrido) para ciclos de crecimiento mono modal. *Cultivos Tropicales*, 35(3): 113-117.
- Flores V, C. (2001). Producción, industrialización y comercialización de nopalitos. Reporte de investigación 58. *CIESTAAM*. UACH. 28p.
- Flores V, C. A. (2002). El Nopal y la lucha contra la desertificación. Reporte de investigación 59. *CIESTAAM*. UACH. 39p.
- Flores, H. A., Orona, C. I., Martínez, M. J. Rivera, G. M. y Hernández, M. J. C. (2004). Producción del nopal para verdura (*Opuntia spp*) bajo riego por goteo subterráneo en la comarca lagunera. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*. 3 (1): 99-104.
- Flores, G. H., Domínguez, M. P. A., Narváez, M. M. P., Zavala, E. F. Santana, E. S. y García, H. R. V. (2016). Predicciones fenológicas en cultivos agrícolas bajo tiempo térmico. INIFAP-SAGARPA, Boletín Técnico No. 85. 18 pp.
- Hassan, Q. K., Bourque, C. P., Meng, F. R., & Richards, W. (2007). Spatial mapping of growing degree days: an application of MODIS-based surface temperatures and enhanced vegetation index. *Journal of Applied Remote Sensing*, 1(1): 013511.
- Herms, D. A. (2004). Using degree-days and plant phenology to predict pest activity. IPM (integrated pest management) of midwest landscapes. 49-59.
- INIFAP, (2008). Nopal para forraje en el altiplano potosino. Instituto nacional de investigaciones forestales, agrícolas y pecuarias. Centro de investigación regional del noreste. Campo experimental San Luis. SAGARPA. Folleto para productores 49. 31p.

- López, R. L., Ramírez, R. A., Peña, M. A. V., Cruz, I. L. L., & Cohen, I. S. (2010). EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE TOMATE DE CÁSCARA (*Physalis ixocarpa* Brot.) ESTIMADA MEDIANTE EL POTENCIAL MÁTRICO DEL SUELO. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 33(2): 157-168.
- Miller, P., Lanier, W., and Brandt, S. (2001). Using Growing Degree Days to Predict Plant stages. Montana State University. *Extension Service*. 8 pp.
- Moore, J. L., Remais, J. V. (2014). Developmental models for estimating ecological response to environmental variability: structural, parametric, and experimental issues. *Acta Biotheor.* 62(1): 1-20.
- Neild, R. E., & Seeley, M. W. (1977). Growing degree-days predictions for corn and sorghum development and some applications to crop production in Nebraska. 12 p
- Ortiz, S. C. A. (2011). Elementos de agroclimatología cuantitativa con aplicaciones en la República mexicana. 5<sup>ta</sup> ed. México. 219 pp.
- Pulido, A. R. y García, P. Y. (2019). H Ayuntamiento de Texcoco. consulta en línea en <https://es.wikipedia.org/wiki/Texcoco>.
- R Core Team. (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- R Core Team. (2013). R: A language and environment for statistical computing. Version 3.5.0 (2018-04-23). 3620 pp.
- Ríos, R. J. y Quintana, M. V. (2004). Manejo General del Cultivar del Nopal. Secretaría de la Reforma Agraria. Colegio de Postgraduados. 81 pp.
- Robertson G. W. (1983) Weather-based mathematical models for estimating development and ripening of crops. *WMO*.180(620): 99 pp.
- Russell, C. and Felker, P. (1987). Comparative freeze hardiness of fruit vegetable and fodder *Opuntia* accessions. *J. Horti. Sci.*62: 545-550.
- Salazar, M. R., Jones, J. W., Chaves, B., & Cooman, A. (2008). A model for the potential production and dry matter distribution of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *Scientia Horticulturae*, 115(2): 142-148.
- Salazar-Gutierrez MR, Johnson J, Chaves-Cordoba B, Hoogenboom G. (2013). Relationship of base temperature to development of winter wheat. *Int J Plant Prod*. 7(4): 741-762.
- Secretaría de Agricultura, ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2015). Estudio de factibilidad para el establecimiento de cultivo de nopal (*Opuntia*) en tierras ociosas en los estados de Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato y Zacatecas con fines alimenticios, energéticos y ambientales. UAZ. 94 pp.
- Sikder, S. (2009). Accumulated heat unit and phenology of wheat cultivars as influenced by late sowing heat stress condition. *Journal of Agriculture & Rural Development*, 7(1): 59-64.

- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and soil*, 15(2): 134-154.
- Vidal, J. L., Budeguer, R., Alderete, G., Romero, E., Rodríguez Rey, J., Amado, M. E., & Bas Nas, S. (2010). Influencia del régimen térmico en el desarrollo foliar del pimiento (*Capsicum annuum* L.) cultivado en campo. *Horticultura Argentina*. 29(69): 13-17.
- Yan, W., Hunt, L. A. 1999. An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. *Annals of Botany* 84: 607-614.
- Yang, S., Logan, J., & Coffey, D. L. (1995). Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree-days. *Agricultural and Forest Meteorology*, 74(1-2): 61-74.

# 7. DETERMINACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL NOPAL VERDURA VARIEDAD ATLIXCO CON UNA BALANZA DE PRECISIÓN

Martin Azúa Barrón<sup>1</sup>, Mario Alberto Vázquez Peña<sup>2</sup>

## RESUMEN

### Resumen

En general en México se tiene dos problemas con respecto al agua como son la poca disponibilidad y su distribución a lo largo del año, por lo que cultivos como el nopal cobran importancia por su adaptabilidad a las condiciones de escasez de agua y por sus usos diversos en la alimentación tanto humana como animal, en tiempos recientes se ha cultivado también en estructuras que modifican las condiciones climáticas como los invernaderos. El conocer las necesidades de agua del cultivo nopal verdura y referenciarlas a las propias de un cultivo de referencia a través de un coeficiente denominado de cultivo es importante en agricultura. El objetivo fue medir la evapotranspiración del nopal verdura (ETc) con una balanza de precisión en un invernadero y con la evapotranspiración de referencia determinar el coeficiente de cultivo. Se midieron las variables meteorológicas con una estación Campbell Sci equipada con un registrador de datos CR10x y sensores para medir temperatura, humedad relativa, radiación solar, así como la dirección y velocidad del viento para el cálculo de la ETo por la misma estación automática. Adicionalmente se midió la evaporación en un tanque Tipo A. Y la determinación de la ETc se realizó con una báscula de precisión. Con la evapotranspiración del cultivo medida en la báscula y la evapotranspiración de referencia con Penman-Monteith se determinó el coeficiente del cultivo y los valores promedio fueron 0.75, 0.96, 0.80 y 0.71 para los cuatro trimestres del año y los coeficientes de tanque fueron 0.73, 0.70, 0.78 y 0.80 también a nivel trimestral. La ETc del nopal verdura en invernadero se estima con los datos de evaporación del tanque Tipo A o con la ETo y en ambos métodos con error menor a  $0.34 \text{ mm d}^{-1}$ , para el cultivo del nopal verdura en macetas de plástico.

**Palabras clave:** invernadero, coeficiente de cultivo, nopal verdura, evapotranspiración, balanza de precisión.

### Abstract

In general in Mexico there are two problems with respect to water, such as low availability and distribution throughout the year, so crops such as cactus are important due to their adaptability to water scarcity conditions and their diverse uses, in both human and animal food, in recent times it has also been cultivated in structures that modify climatic conditions such as greenhouses. Knowing the water needs of the nopal vegetable crop and referring them to those of a reference crop through a so-called crop coefficient is important in agriculture. The objective was to measure the evapotranspiration of the nopal vegetable (ETc) with a precision balance in a greenhouse and with reference evapotranspiration to determine the cultivation coefficient. Meteorological variables were measured with a Campbell Sci station equipped with a CR10x data logger and sensors to measure temperature, relative humidity, solar radiation, as well as wind direction and speed for the calculation of ETo by the same automatic station. Additionally evaporation was measured in a Type A tank. And the determination of the ETc was made with a precision scale. With the evapotranspiration of the crop measured in the scale and the reference evapotranspiration with Penman-Monteith, the crop coefficient was determined and the average values were 0.75, 0.96, 0.80 and 0.71 for the four quarters of the year and the tank coefficients were 0.73, 0.70, 0.78 and 0.80 also at the quarterly level. The ETc of the vegetable nopal in the greenhouse is estimated with the evaporation data of the Type A tank or with the ETo and in both methods with error less than  $0.34 \text{ mm d}^{-1}$ , for the cultivation of the nopal vegetable in plastic pots.

**Keywords:** greenhouse, cultivation coefficient, nopal vegetable, evapotranspiration, precision balance.

<sup>1</sup>Tesista

<sup>2</sup>Director

## 7.1. Introducción

México según el Consejo consultivo del agua (2019) tiene dos problemas que son: poca disponibilidad y la distribución del agua, para el primero se contabiliza menos de 5000 m<sup>3</sup> de agua por habitante y para el segundo la distribución del agua no coincide con la distribución geográfica de la población. El crecimiento poblacional y económico ejerce presión sobre los recursos hídricos, lo que genera conflictos por su disposición en ocasiones violentos por los usuarios, la problemática por el agua es a niveles diferentes, desde problemas entre los usuarios de una misma comunidad, municipios, estados, hasta en las fronteras de los países (Becerra *et al.*, 2006).

En México el cultivo y usos del nopal son una tradición, que ha evolucionado desde nopaleras silvestres hasta la producción intensiva en micro túneles, técnica que inició la Universidad Autónoma Chapingo en los años sesenta (Flores, 2001). Muchos países cultivan el nopal para aprovechar su fruta (tuna), nopalitos tiernos o nopales maduros, en México se cuenta con una superficie de 12,041 ha con rendimientos que varían de 9 a 100 t ha<sup>-1</sup> (Blanco *et al.*, 2010).

El nopal para adaptarse a las condiciones de las zonas áridas ha desarrollado diferentes mecanismos como son: succulencia, elaboración de mucilagos y sustancias higroscópicas a partir de ácidos orgánicos, la superficie foliar al ser plana y discoidea es la estructura más eficiente para evitar la evapotranspiración, la savia viscosa para cerrar las heridas de la planta y sobre todo el metabolismo ácido de las crasuláceas (Becerra, 1994).

La evapotranspiración es una variable con diversidad de aplicaciones en: los balances de agua en el suelo, en el diseño y manejo del sistema de irrigación, la simulación de cultivos y en los estudios hidrológicos (Allen *et al.*, 1989), en climatología y agricultura (Scheff and Dargan, 2014) y en la evaluación de los efectos del cambio climático en los cultivos, donde se espera que las condiciones más calurosas y secas aumenten las demandas de agua (Espadafor *et al.*, 2011; Moreno *et al.*, 2011). En las regiones donde hay escasez de agua se requiere optimizar las prácticas de irrigación y suministrar al cultivo el agua que necesita, sin desperdicio (Orgaz *et al.*, 2005).

La ETo se estima por diferentes métodos, pero en invernaderos es frecuente utilizar el tanque tipo A por su simplicidad, bajo costo y la obtención de estimaciones diarias, su uso

es objeto de controversia al no conocerse con exactitud el factor a utilizar para estimar la ETo y el área que se deja de producir por el espacio que ocupa en el interior del invernadero (Fernandes *et al.*, 2003). La evapotranspiración de referencia en el interior de los invernaderos es siempre menor que en el exterior (Fernández *et al.*, 2003, Orgaz *et al.*, 2005). La ETo varía con las condiciones climáticas y tiene un comportamiento estacional diferente tanto en verano como en invierno (Li *et al.*, 2003).

México en el 2010 contaba con 18127 unidades de producción de agricultura protegida en una superficie de 12540 ha, lo que indica una superficie de 0.69 ha en promedio por unidad de producción (FIRA, 2010). Según González (2013), se estimó una superficie bajo la modalidad de agricultura protegida de 20,000 ha. La mayoría son unidades de producción menores a 0.5 ha, lo que sugiere un limitado acceso a la tecnología, capacitación y asistencia técnica (Cedillo y Calzada, 2012).

El objetivo de este trabajo fue medir la evapotranspiración del cultivo del nopal verdura con una balanza de precisión en un invernadero y la evapotranspiración de referencia obtenida con P-M y el tanque tipo A.

## **7.2. Materiales Y Métodos**

El trabajo se realizó en la estación meteorológica del departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo en un invernadero (Figura 7.1) con ventilación lateral, con un área útil para establecer el cultivo de 105 m<sup>2</sup>, un volumen aproximado de aire 550 m<sup>3</sup>, cubierta de plástico y estructura de metal con orientación Norte-Sur. La localización geográfica es latitud N 19.483 y longitud W 98.900° con una altura de 2250 msnm. El clima es de tipo Cb(Wo)(W)(i')g, templado subhúmedo con lluvias en verano, una época seca en invierno y con oscilación térmica que varía entre 5 a 7 °C . La temperatura media anual es de 17.2 °C, el mes más caliente es mayo con una temperatura media de 19.7 °C y con 14.1 °C enero es el más frío. La precipitación media anual es de 598 mm con vientos dominantes del Sur (Pulido y García, 2019).



Figura 7.1. Vista general del Invernadero

### 7.2.1. Cultivo

La variedad de nopal verdura estudiada fue la Atlixco que es considerada sin espinas, con alta resistencia a la falta de agua y con un crecimiento rápido y vigoroso, se utiliza para la producción de verdura y por su productividad también para la producción de forraje en las zonas áridas y semiáridas del Norte de la república (INIFAP, 2008).

Inicialmente los cladodios con medio año de edad se establecieron en macetas de plástico de 14 L, color ladrillo, con suelo de la estación meteorológica del departamento de irrigación y se regaron con solución nutritiva Steiner (1961) con una CE de  $2.5 \text{ ds m}^{-1}$ . Previo a la medición de datos, se dió tiempo para que el cladodio enraizara y emitiera brotes de los que se permitió el desarrollo y maduración de dos a tres hasta que estos entraron en producción. El cultivo se mantuvo libre de plagas y malezas y no se aplicó agroquímicos, en la temporada húmeda la presencia de caracoles se controló manualmente. El suelo usado de acuerdo con el análisis que realizaron López *et al.* (2010), es un franco arcilloso, con una densidad aparente que varía con la profundidad de  $1.25 \text{ g cm}^{-3}$  a los 10 cm de profundidad y  $1.36 \text{ g cm}^{-3}$  a los 30 cm, con porcentajes de humedad a CC y PMP de 29.6 y 16.5 respectivamente.

### 7.2.2. Estación automática

La toma y almacenamiento de datos se realizó con una estación meteorológica automática ubicada en el interior del invernadero (Figura 7.2), equipada con un dataloger de la marca Campbell CR10x, con un sensor de la marca Vaisala HMP45C para la medición de temperatura y humedad relativa, el piranómetro SP-LITE para la radiación solar, anemómetro para la velocidad y veleta para la dirección del viento.



Figura 7.2. Estación automática al interior del invernadero

### 7.2.3. Báscula de precisión

La medición del peso del sistema maceta, suelo y planta se realizó con una báscula de precisión de la marca Sartorius, con capacidad de 150 kg y una precisión de 1 g, sobre la báscula se colocaron dos macetas con un área en la parte superior de  $660.5 \text{ cm}^2$  en soportes tipo tapanco hechos de herrería con altura suficiente para contabilizar el agua drenada, El riego se aplicó cada día con una pipeta graduada, con una cantidad de agua similar a la evapotranspirada calculada el día anterior. También se implementaron dos macetas a las que el suelo se tapó con un plástico color blanco para aislar la variable transpiración de la planta y medirla con la misma bascula todos los días. Los datos se registraron en una computadora de escritorio en la que se instaló un programa elaborado en el posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua para esta función que usa el puerto serial para la comunicación entre la balanza y la computadora.

### 7.2.4. Tanque Tipo A

Se instaló un tanque Tipo A en el que se midió el nivel de agua todos los días y por diferencia se obtuvo la lámina evaporada. El tanque Tipo A permite estimar los efectos combinados de radiación solar, viento, temperatura y humedad sobre la evaporación de una superficie de agua libre. De un modo análogo, la planta responde a las mismas variables climáticas. El método del tanque de evaporación permite relacionar la evaporación del agua del tanque con la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET<sub>o</sub>).

### 7.2.5. Ecuación de Peman-Monteith para el cálculo de la ETo

Para el cálculo de la ETo en un invernadero se debe tener en cuenta que el aire se mueve a bajas velocidades, cercanas a cero, lo que afecta el componente aerodinámico de la ecuación de Peman-Monteith.

El equipo CR10x según Campbell (1999) tiene programado un algoritmo para calcular la ETo con la Ecuación (7.1):

$$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G)}{\lambda(\Delta + \gamma^*)} + \frac{\gamma^* M_w(e_a - e_d)}{R\Theta r_v(\Delta + \gamma^*)} \quad (7.1)$$

Donde:  $ET_0$  es la Evapotranspiración de referencia ( $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$  o  $\text{mm s}^{-1}$ );  $R_n$  es la Radiación Neta ( $\text{kW m}^{-2}$ );  $G$  es la densidad de flujo de calor del suelo ( $\text{kW m}^{-2}$ );  $M_w$  masa molecular del agua ( $0.018 \text{ kg mol}^{-1}$ );  $R$  constante de los gases ( $8.31 \times 10^{-3} \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );  $\Theta$  es la temperatura Kelvin ( $293 \text{ K}$ );  $(e_a - e_d)$  déficit de presión de vapor del aire ( $\text{kPa}$ );  $\lambda$  calor latente de vaporización del agua ( $2450 \text{ kJ kg}^{-1}$ );  $r_v$  es la resistencia de la superficie a la vaporización ( $\text{s m}^{-1}$ );  $\Delta$  pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) y  $\gamma^*$  es la constante psicométrica aparente ( $\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

### 7.2.6. Coeficiente de tanque Tipo A

Se determinó con datos del tanque Tipo A y la ETo con Penman-Monteith y la ecuación de Doorembos y Pruitt (1977):

$$Kt = \frac{ET_0}{EV_A} \quad (7.2)$$

Donde:  $Kt$  es el coeficiente de tanque (adimensional),  $ET_0$  evapotranspiración de referencia ( $\text{mm d}^{-1}$ ) y  $EV_A$  es la evaporación registrada en el tanque Tipo A ( $\text{mm d}^{-1}$ ).

### 7.2.7. Cálculo de la evapotranspiración

La diferencia de pesos ( $\text{kg}$ ) que registra la báscula en un intervalo de tiempo es la evapotranspiración que experimentan las plantas, cuando se aplicó riego se hizo el correspondiente ajuste en el balance, la tasa de evapotranspiración expresada ( $\text{kg m}^2 \text{ d}^{-1}$ ) se calculó a partir de los valores obtenidos de la balanza de la siguiente manera (Martínez *et al.*, 2012):

$$ET_c = \frac{1}{\Delta t} \left( \frac{P_s(t) - P_s(t + \Delta t)}{S} \right) \quad (7.3)$$

Donde:  $ET_c$  es la evapotranspiración del cultivo en ( $\text{kg m}^2 \text{ d}^{-1}$  o  $\text{mm d}^{-1}$ ),  $\Delta t$ = intervalo de tiempo (d);  $P_s(t + \Delta t)$  y  $P_s(t)$  representan los pesos (kg) registradas entre dos intervalos sucesivos de tiempo y  $S$  es la superficie equivalente de invernadero ( $\text{m}^2$ ) y que es la relación entre el número de plantas en la balanza y su densidad de siembra en el invernadero en plantas por  $\text{m}^2$ .

### 7.2.8. Cálculo de la transpiración

Con la adecuación de la Ecuación 7.3, en la que se sustituye los valores  $P_s(t)$  y  $P_s(t + \Delta t)$  correspondientes a la transpiración.

### 7.2.9. Coeficiente de cultivo $K_c$

$K_c$  se estimó con el valor de  $ET_c$  medido con la báscula de acuerdo con la Ecuación (Doorembos y Pruitt, 1977):

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (7.4)$$

Donde:  $K_c$  es el coeficiente de cultivo (adimensional),  $ET_o$  la evapotranspiración de referencia ( $\text{mm d}^{-1}$ ) y  $ET_c$  es la evapotranspiración del cultivo ( $\text{mm d}^{-1}$ ).

### 7.2.10. Modelación de la variable $K_c$ como una distribución normal

Con datos diarios medidos de  $ET_c$  que variaron en función del tamaño de los nopalitos tiernos, se propone utilizar un valor de  $K_c$  mayor para atender la demanda de agua del cultivo cuando está en plena producción de nopalitos tiernos calculado de la siguiente manera.

$$K_{cn} = K_{cp} + 1.65 \cdot DS$$

Donde:  $K_{cn}$  es el  $K_c$  para usar cuando el cultivo está en plena producción de nopalitos tiernos,  $K_{cp}$  es el  $K_c$  promedio obtenido con los datos diarios durante el periodo de medición, 1.65 es el valor de  $Z_o$  a 0.90 de probabilidad acumulada y  $DS$  es la desviación estándar del  $K_c$ .

$K_{cn}$  corresponde al valor mayor del intervalo de confianza al 0.90 de probabilidad al modelar los valores diarios de  $K_c$  como una distribución normal.

### 7.2.11. Estadísticos utilizados

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la raíz del cuadrado medio del error (RSE) sus procedimientos de cálculo y teoría se detallan en (Draper and Smith, 1998)

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_1^n (O_i - \bar{O})(E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_1^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_1^n (E_i - \bar{E})^2}} \right]^2 \quad (7.5)$$

Donde:  $E_i$  y  $O_i$  son los valores estimados y observados o medidos y sus promedios  $\bar{E}$  y  $\bar{O}$  respectivamente y  $n$  es el número de observaciones.

$$RSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (E_i - O_i)^2} \quad (7.6)$$

El suavizado de los datos se realizó con la instrucción lowess disponible en R, que es un programa para suavizar los diagramas de dispersión mediante una regresión ponderada local robusta, ayuda a detectar la relación entre variables, encontrar tendencias y ciclos en los datos (R Core Team., 2013).

## 7.3. Resultados y discusión

### Coeficiente de tanque

En la determinación de la ETo dentro de un invernadero es usual estimarla con el valor de la evaporación medida en tanque Tipo A por su simplicidad y buena estimación de la ETo (Puppo y García, 2009) con un coeficiente de tanque de 0.8, en la figura 7.3 se muestra la marcha temporal de las dos variables involucradas en su determinación durante el periodo de medición.

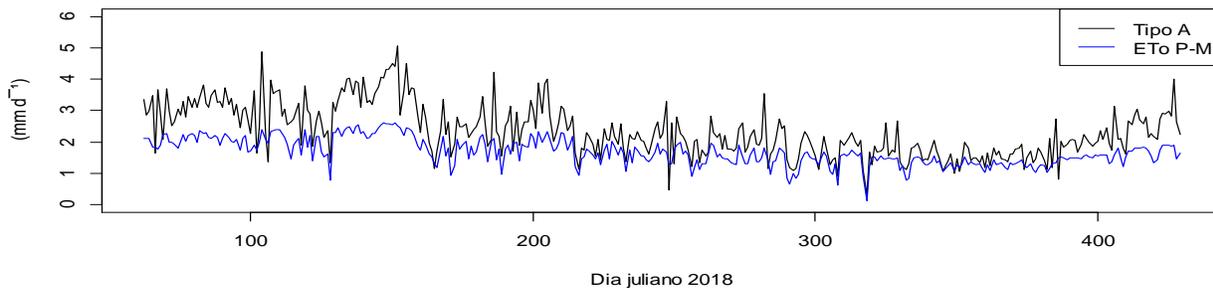


Figura 7.3. Marcha diaria de la evapotranspiración calculada con Penman-Monteith y la evaporación en el tanque Tipo A,  $n=368$ .

Los valores diarios calculados del Kt se presentan en la figura 7.4 con una oscilación de 0.98 y un promedio de 0.75 (Figura 7.4).

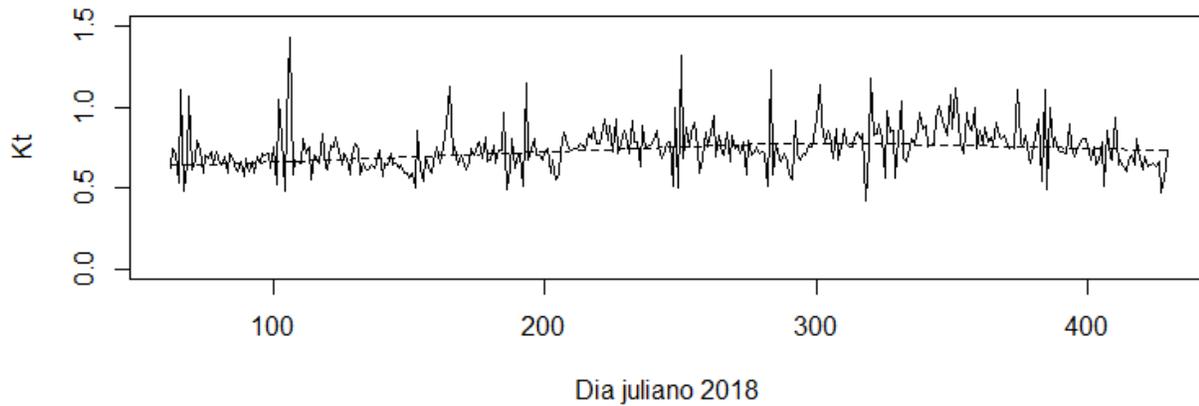


Figura 7.4. Marcha diaria del coeficiente de tanque (Kt), n=368.

También el Kt mostró variabilidad a través del año, lo anterior se aprecia en el diagrama de dispersión entre los datos del Tanque Tipo A y la ETo con Penman-Monteith, al obtener un ajuste mejor con una línea curva de segundo grado (Figura 7.5).

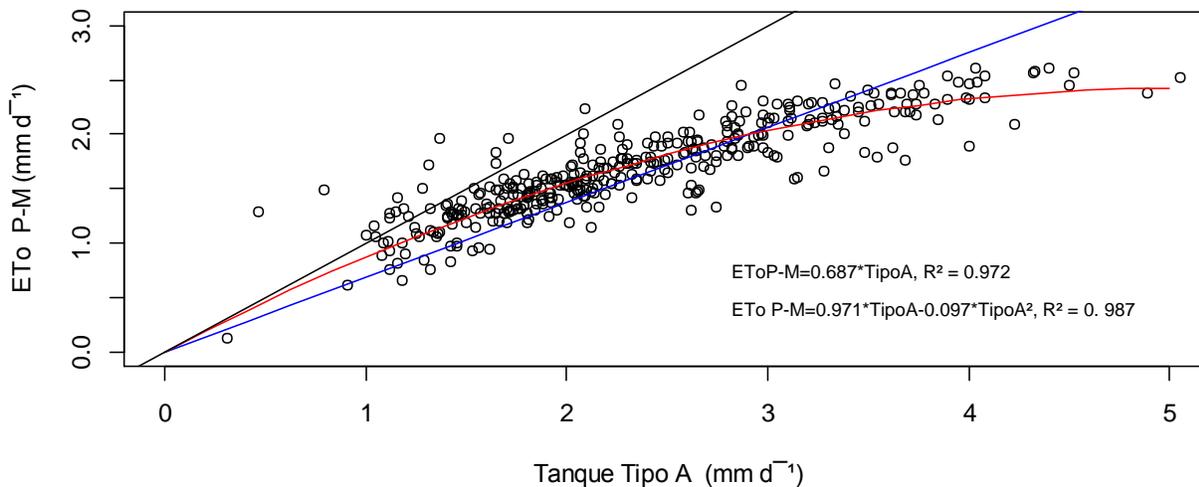


Figura 7.5. Relación de la ETo P-M vs el Tanque Tipo A.

Se presentan los coeficientes de tanque promedio calculados con la Ecuación 7.2 en periodos trimestrales, los valores de este son mayores en los meses invernales, lo que indica que las diferencias entre los valores de ETo y la evaporación del tanque Tipo A son menores, n=387.

Cuadro 7.1. Valores de Kt promedio trimestrales.

Trimestres	Kt
Ene-Mar	0.73
Abr-Jun	0.70
Jul-sep	0.78
Oct-Dic	0.80

### Coefficiente de cultivo

Incorpora los efectos de las características del cultivo que son diferentes al de referencia y está en función de esas características y en una proporción mínima del clima, por lo que resulta útil en otras áreas geográficas y climas (Allen *et al.*, 2006). La relación entre la ETc y la ETo que da lugar al cálculo del Kc del cultivo del nopal verdura se aprecia en el diagrama de dispersión, donde en promedio fue de 0.834, se aprecia que con una línea curva cuadrática de segundo grado se obtiene mejor ajuste, lo que sugiere que este coeficiente no es constante (Tosso, 1976; Fernández *et al.*, 2001), en este trabajo no se estudió el efecto que tiene la radiación solar y el calor en el ambiente en la pared de la maceta por lo que los valores de Kc para las características del nopal (alta resistencia a la escasez de agua y adaptabilidad a condiciones de aridez) son específicos para las condiciones en las que se obtuvieron (Figura 7.6 y Cuadro 7.2)

$$ET_c = 0.884 * ET_o \quad R^2 = 0.947 \quad RSE = 0.362 \quad (\text{mm d}^{-1})$$

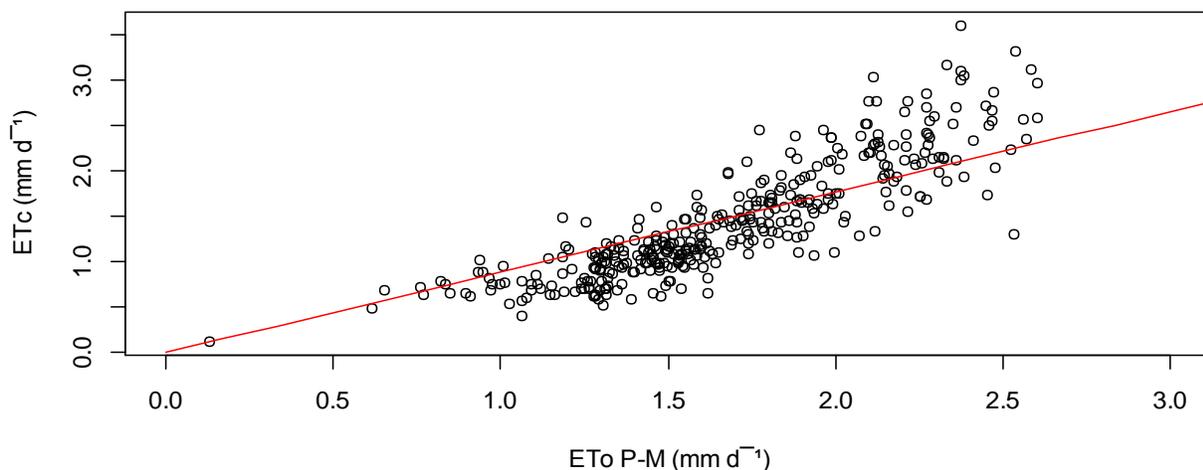


Figura 7.6. Diagrama de dispersión de los datos evapotranspiración del cultivo (ETc) y los de evapotranspiración con Penman-Monteith (ETo P-M) y la línea de ajuste por regresión lineal simple, (n=319).

Con los datos diarios de los Kc obtenidos con la Ecuación 7.4, se calcularon los valores promedio cada tres meses (ver Cuadro 7.2). Donde se aprecia que hay variabilidad estacional, este depende del cultivo, estado de desarrollo de la planta y disponibilidad de agua en el suelo (Tosso, 1976; Fernández et al., 2001), lo cual debe ser tomado en cuenta en la planeación de los riegos al cultivo. En los meses fríos los valores del Kc son menores que en los meses calientes.

Cuadro 7.2. Valores trimestrales del Kc

Trimestre	Kc
Ene-Mar	0.75
Abr-Jun	0.96
Jul-sep	0.80
Oct-Dic	0.71

En la marcha temporal de las variables ETo con Penman-Monteith, la evapotranspiración del cultivo y la transpiración, se aprecia la relación que guardan entre sí. En la temporada invernal la línea que corresponde a los valores de la ETc (línea azul) se hace notoriamente menor a los valores de la ETo con Penman-Monteith (línea roja), y los valores más altos de las tres variables son en los meses de marzo a septiembre, lo anterior de acuerdo a los días julianos indicados en el eje de las abscisas de la gráfica. Se aprecia que los valores de ETc (línea azul) y transpiración del cultivo (Tc) (línea verde) presentan ciclos cuyos valores menores corresponden al momento en que se hizo el corte de los brotes tiernos y los valores mayores a cuando los nopalitas tiernos estaban cercanos a alcanzar su tamaño comercial, se señala con elipses los inicios y finales de dos ciclos de crecimiento de nopalitas y los días julianos corresponden a 182, 217 y 258, los ciclos tuvieron duraciones de 35 y 41 días respectivamente (Figura 7.7).

En el periodo de medición del 21 de abril del 2018 al 5 de marzo de 2019, se contabilizó las láminas totales siguientes: 618.01 mm de ETo con P-M, 421.07 mm de ETc y 271.14 mm de transpiración (Tc).

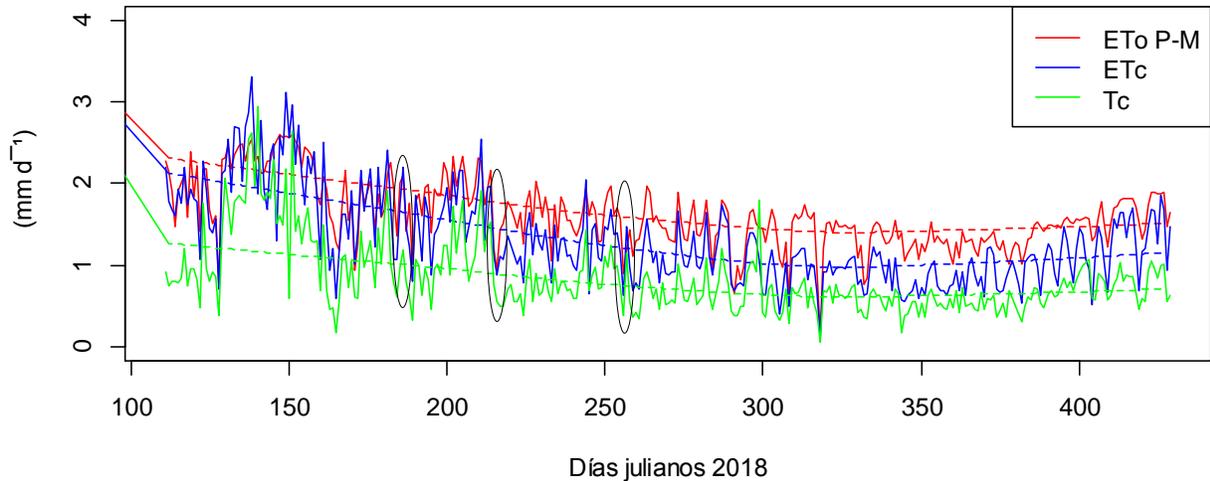


Figura 7.7. Marcha temporal de las variables ETo con Penman-Monteith (ETo P-M), la evapotranspiración del cultivo (ETc) y la transpiración (Tc), las líneas punteadas señalan el suavizado de los datos, todos en mm de lámina de agua, n=319.

La variabilidad del Kc de cultivo se explica por aumentos en la transpiración del cultivo que es cuando el nopal verdura tiene brotes próximos al tamaño comercial (al incrementar el área evapotranspirativa de las plantas-línea verde) y se abate cuando los nopalitos tiernos se cosechan. Otra causa se debe a las variables radiación solar y temperatura como en los meses invernales que las tasas de energía aportadas por estas son menores y los brotes de nopalitos tiernos fueron pocos (Figura 7.8).

El nopalito tierno tiene un contenido de agua cercano al 95 % por lo que la materia seca es 5% (Maki *et al.*, 2015). En este experimento se aplicó 10.45 kg de agua para obtener un kg de nopalitos tiernos, lo que equivale a 208.4 kg de agua por kg de materia seca, si se considera una eficiencia de aplicación del riego del 90 % este valor aumenta a 231.5 aún menor al que reporta la bibliografía que es de 267 kg de agua / kg de materia seca (Luna y Urrutia, 2008).

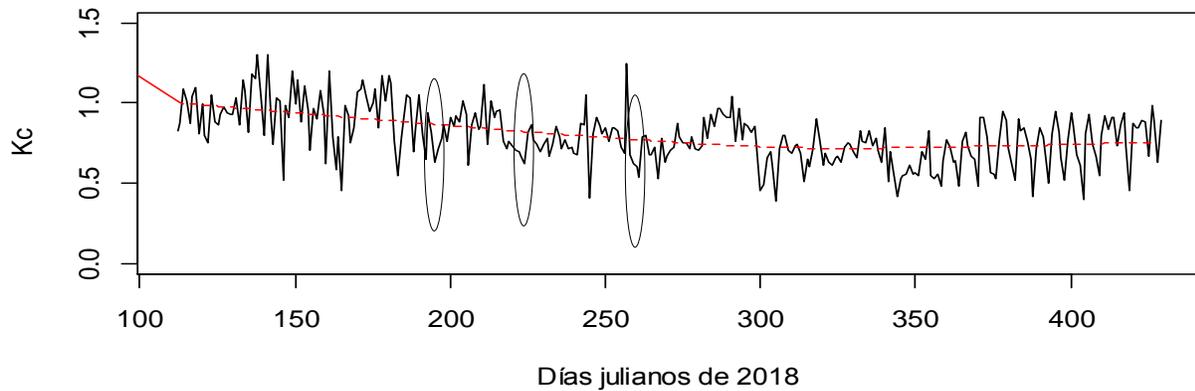


Figura 7.8. Marcha temporal de los coeficientes del cultivo ( $K_c$ ) obtenido con la balanza, la línea punteada señala el suavizado de los datos,  $n=319$ .

### Relación entre la Transpiración y evapotranspiración

Para el cultivo del nopal verdura la relación entre la  $E_{Tc}$  y la transpiración fue variable a través del año y del agua contabilizada como evapotranspiración el 62 % en promedio de esta fue utilizada por la planta para realizar su proceso fisiológico de transpiración (Figura 7.9).

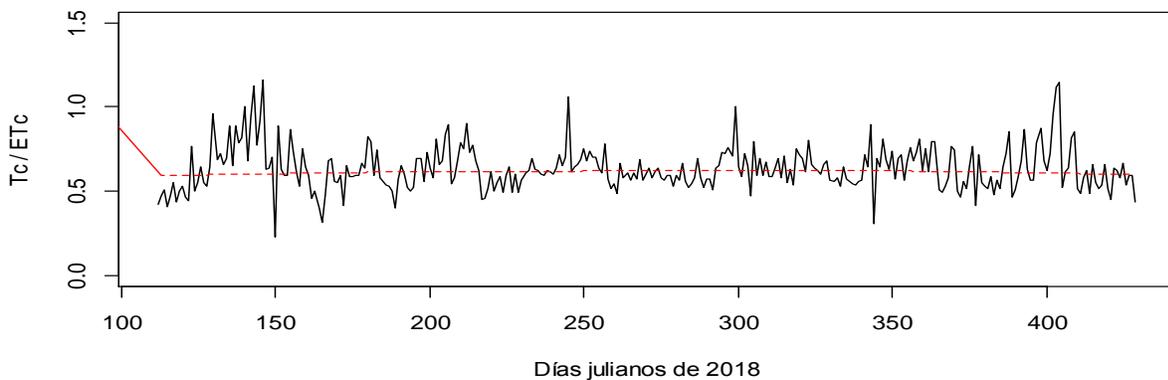


Figura 7.9. Marcha temporal del coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) obtenido con la balanza, la línea punteada señala el suavizado de los datos,  $n=319$ .

En la marcha temporal de los valores de  $K_c$  del cultivo obtenidos se aprecia que los valores aumentan conforme aumenta la producción de biomasa (nopalitos tiernos) la cual se indica en términos de área (Figura 7.10).

En el  $K_c$  del cultivo se integran los dos procesos que conforman la evapotranspiración por lo que el valor numérico de este coeficiente aumenta en la medida que cualquiera de estos dos componentes aumente. Se aprecia que cuando el área caulinar de los nopalitos tiernos

aumenta dichos coeficientes aumentan, lo anterior debe tomarse en cuenta cuando se tenga una plantación en producción y no sea satisfactorio el uso de valores promedio trimestrales del  $K_c$ , en cuyo caso se propone utilizar el valor de  $K_c$  de 1.1, que corresponde al valor de  $K_c$  que se obtiene al 0.90 de probabilidad al modelar el  $K_c$  con una distribución normal.

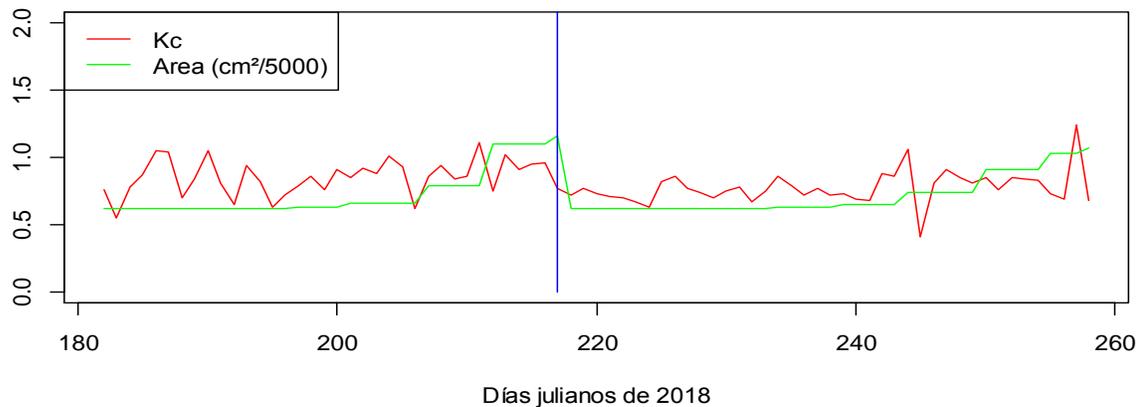


Figura 7.10. Marcha temporal de las variables ( $K_c$  y Área caulinar) en dos cortes consecutivos del nopal,  $n=76$ .

La evapotranspiración de referencia estimada a partir de los datos de evaporación del tanque Tipo A y los coeficientes de tanque trimestrales del Cuadro 7.1 al compararse con la  $E_{To}$  con Penman-Monteith, se tiene un RSE de 0.36 mm  $d^{-1}$  y un  $R^2$  de 0.79. En el cuadro 7.3 se presenta la estimación de la  $E_{Tc}$  a partir de los datos del tanque Tipo A y los datos de  $E_{To}$  con Penman-Monteith, y que, al compararse con las mediciones con la balanza de precisión, los resultados indican que los RSE y  $R^2$  son muy similares, con una precisión mayor con los datos de  $E_{To}$  con Penman-Monteith, que se registraron por la estación automática.

Cuadro 7.3. Resumen de estadísticos en la estimación de la  $E_{To}$  y  $E_{Tc}$

Estimación	Formula	RSE	$R^2$
$E_{To}$ (P-M)	TipoA* $K_t$	0.36	0.79
$E_{Tc}$	$E_{To}$ P-M* $K_c$	0.25	0.80
$E_{Tc}$	TipoA* $K_t$ * $K_c$	0.34	0.75

La marcha temporal de las  $E_{Tc}$  medidas y las estimadas con las variantes que se indican en el Cuadro 7.3, se aprecia el apego que tienen en sus datos y la línea que corresponde

a la  $ET_c$  calculada con los datos del  $ET_o$  con Penman-Monteith tiene un error menor acorde con los estadísticos del Cuadro 7.3 (Figura 7.10)

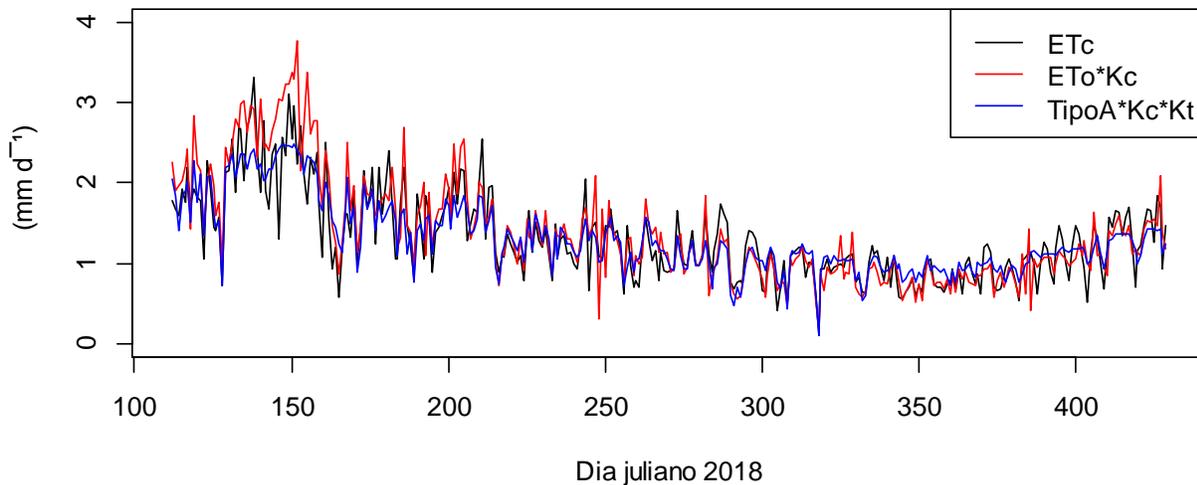


Figura 7.11. Marcha temporal de la  $ET_c$  medida con la balanza y las estimaciones con la evapotranspiración de referencia y las mediciones de evaporación del tanque Tipo A,  $n=319$ .

## 7.4. Conclusiones

El coeficiente de tanque a nivel trimestral que se obtuvo mostró un buen comportamiento en la predicción de la evapotranspiración de referencia, por lo que los datos así calculados se pueden usar para estimar la  $ET_o$  en el invernadero.

El coeficiente de cultivo a nivel trimestral también mostró un buen comportamiento para estimar la evapotranspiración del cultivo de nopal verdura.

Los valores de los coeficientes aquí presentados se deben de calibrar para que se puedan usar en otras estructuras y con otras variedades de nopal.

## Recomendaciones

Para estudios posteriores, evaluar el efecto que tiene la radiación solar en la variable evapotranspiración del cultivo cuando se trabaja con macetas, al estar la maceta en el ambiente y ser de color oscuro también recibe radiación e intercambio de calor.

## 7.5. Literatura citada

- Allen, R. G.; Jensen, M. E.; Wright, J.L. and Burman, R. D. (1989). Operational Estimates of Reference Evapotranspiration. *Agron J.* 81(4): 650-662.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D. y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. FAO. 322 pp.
- Becerra, G. (1994). Nopal verdura *Opuntia* spp: Cultivo alternativo para las zonas áridas y semiáridas de México. In Nopal verdura *Opuntia* spp: Cultivo alternativo para las zonas áridas y semiáridas de México. CONAZA. 31 pp.
- Becerra P. M., J. Sainz S. y C. Muñoz P. (2006). Los conflictos por agua en México. Diagnóstico y análisis. *Gestión y política pública*, 15(1): 111-143.
- Bonachela S.; González A.M. and Fernández M.D. (2006). Irrigation scheduling of plastic greenhouse vegetable crops based on historical weather data. *Irrig Sci* 25(1): 53–62.
- Blanco M. F., R.D. Valdez S., R. Magallanes Q., R.E Vázquez A., E. Olivares S., E. Gutiérrez O. y J. A. Vidales C. (2010). El Rendimiento e interacciones nutrimentales en nopal (*Opuntia ficus indica* L.). IX Simposium-Taller Nacional y II Internacional de producción de nopal y maguey. 12 y 13 de noviembre. Escobedo, N. L. Edición Especial No. 5-2011: 255-260
- Campbell Sci Inc. (1999). On line estimation of grass reference evapotranspiration with the Campbell Scientific Automated Weather Station. App. Note: 4-D. Whashington State University. 1: 1-33.
- Cedillo, E., y Calzada, M. (2012). La horticultura protegida en México situación actual y perspectivas. *Encuentros UNAM*. 10 pp.
- Consejo consultivo de agua A.C. (2019). Consultado en <http://www.aguas.org.mx/sitio/index.php/panorama-del-agua/diagnosticos-del-agua>.
- Doorembos, J. y Pruitt, W. O. (1977). Necesidades de agua de los cultivos, FAO-Serie Riego y Drenaje No. 24. 156 pp.
- Draper, N. R., & Smith, H. (1998). Applied regression analysis (Vol. 326). John Wiley & Sons. 705 pp.
- Espadafor, M.; Lorite, I. J.; Gavilan, P. and Berenjena, J. (2011). An Analysis of the Tendency of Reference Evapotranspiration Estimates and other Climate Variables During the last 45 Years in Southern Spain. *Agricultural Water Management*. 98 (6): 1045-1061
- Fernandes, C.; Cora, J. E.; Campos de Araujo, J. A. (2003). Reference Evapotranspiration Estimation Inside Greenhouses. *Scientia Agricola*. 60(3): 591-594
- Fernández, M. D., Orgaz, F., Fereres, E., López, J. C., Céspedes, A., Pérez, J., ... & Gallardo, M. (2001). Programación del riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el Sudeste español. (Eds.) CAJAMAR (Caja Rural de Almería y Málaga). 71 pp.

- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). (2010). Oportunidades de negocio en la agricultura protegida. Boletín informativo No 7. 100 pp.
- Flores V, C. (2001). Producción, industrialización y comercialización de nopalitas. Reporte de investigación 58. *CIESTAAM*. UACH. 28 pp.
- González, N.J.F. (2013). 20,000 has. Bajo agricultura protegida. Horticultivos. Editorial Agro Síntesis S.A. de C.V. México, D.F: 8-10.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), (2008). Nopal para forraje en el altiplano potosino. Centro de investigación regional del noreste. Campo experimental San Luis. SAGARPA. Folleto para productores 49. 31 pp.
- López, R. L., Ramírez, R. A., Peña, M. A. V., Cruz, I. L. L., & Cohen, I. S. (2010). EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE TOMATE DE CÁSCARA (*Physalis ixocarpa* Brot.) ESTIMADA MEDIANTE EL POTENCIAL MÁTRICO DEL SUELO. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(2): 157-168.
- Li, Y. S.; Aydin, M.; Yano, T, and Li, X. (2003). Evapotranspiration of oranges trees in greenhouse lysimeters. *Irrig Sci*. 21(4): 145-149.
- Luna, V. J., y Urrutia, M. (2008). Nopal para forraje en el Altiplano Potosino. Folleto para productores, (49): 198-210.
- Maki-Díaz, G., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, R., Arévalo-Galarza, M. L., Calderón-Zavala, G., & Anaya-Rosales, S. (2015). Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia*, 49(1): 31-51.
- Martínez-Ruiz, A., López-Cruz, I. L., Ruiz-García, A., & Ramírez-Arias, A. (2012). Calibración y validación de un modelo de transpiración para gestión de riegos de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(SPE4): 757-766.
- Moreno, R. A.; Aguilar, D. J. y Luevano, G. A. (2011). Características de la Agricultura Protegida y su Entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*. 15 (29): 763-774.
- Orgaz, F.; Fernández, M. D.; Bonachela, S.; Gallardo, M. and Fereres, E. (2005). Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. *Agricultural water management*. 72 (2): 81-96.
- Pulido, A. R. y García, P. Y. (2019). H Ayuntamiento de Texcoco. consulta en línea en <https://es.wikipedia.org/wiki/Texcoco>.
- Puppo, L., & García Petillo, M. (2009). Estimación de los coeficientes de tanque «A» para calcular la evapotranspiración del cultivo de referencia en la zona sur del Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 13(2): 47-51.
- Scheff, J. and Dargan M. W. F. (2014). Scaling Potential Evapotranspiration with Greenhouse Warming. *American Meteorological Society*. 27(4): 1539-1558.
- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and soil*, 15(2): 134-154.

Tosso, T. (1976). Determinaciones de evapotranspiración y coeficientes K para varios cultivos. Determination of evapotranspiration and K coefficients for several crops. Agricultura Técnica (Chile). v. 36 (4): 151-155.

## 8. CONCLUSIONES GENERALES

En la revisión de literatura se detectó la escasez de trabajos cuyo objeto de estudio sea el nopal verdura, algunos autores han referido la evapotranspiración del nopal como el 30% de la evaporación del tanque Tipo A del lugar para el cultivo al aire libre. Para el caso de los grados días de desarrollo se ha utilizado el valor para la temperatura base de 10 °C.

Los sensores mostraron variabilidad en sus mediciones y que cumplieran con la precisión de fábrica dependió en gran medida de la amplitud del rango que indica su fabricante, se corrigieron los datos con dos técnicas: la regresión lineal simple y la múltiple, se obtuvo mejores resultados en la precisión de los datos con la regresión lineal múltiple con el valor anterior.

El modelo empírico para la estimación de evapotranspiración de referencia en función de la temperatura media, humedad relativa y déficit de saturación tuvo un error bajo cuando sus datos se compararon con los de Penman-Monteith, por lo que se recomienda utilizarlo en invernadero cuando solo se disponga de datos de temperatura y humedad relativa y sea posible el cálculo del déficit de saturación.

Modificar los parámetros de los modelos propuestos por diferentes autores para estimar la evapotranspiración de referencia al aire libre es una alternativa para su uso en invernaderos. Los modelos que incluyen la variable radiación fueron los más apegados en sus datos con los de Penman-Monteith, lo anterior indica su importancia.

El nopal verdura es una planta que reacciona a los estímulos de la temperatura y en la etapa fenológica de producción de nopales tiernos desde la brotación hasta alcanzar su tamaño comercial los umbrales térmicos fueron: temperatura base de 6.34 °C, temperatura óptima de 29.02 °C y temperatura umbral máxima de 33.13 °C. Con los anteriores se calculó los grados días de desarrollo necesarios promedio que fueron: 702.3, 729.91 y 817.12 °C con los métodos seno simple, triángulo simple y método residual respectivamente, el valor numérico de estos depende del método utilizado. Al estimar los días necesarios para completar la etapa fenológica desde la brotación de los nopales tiernos hasta el tamaño comercial, los métodos seno simple, triángulo simple y método residual estimaron duraciones similares.

La evapotranspiración del nopal verdura se determinó con una balanza de precisión y con los datos de evapotranspiración de referencia con Penman-Monteith se determinó el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) cuyos valores fueron variables a través del año y los valores promedio por trimestre fueron: 0.75, 0.96, 0.80 y 0.71. El coeficiente de tanque también fue calculado con los datos de  $E_{To}$  con P-M y los datos medidos de evaporación en el tanque Tipo A cuyos valores fueron: 0.73, 0.70, 0.78 y 0.80 para los trimestres del año.