



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA**

**COEFICIENTE DE CULTIVO DE *Vanilla planifolia***

***G. Jackson* EN LA ETAPA FINAL**

**TESIS PROFESIONAL**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**LICENCIADO EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA**

**PRESENTA**

**IRVIN OMAR LOPEZ BAUTISTA**

**DIRECTOR**

**DR. DELFINO REYES LÓPEZ**

**San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México, Junio de 2020**



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA**

**COEFICIENTE DE CULTIVO DE *Vanilla planifolia*  
*G. Jackson* EN LA ETAPA FINAL**

**TESIS PROFESIONAL  
PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
LICENCIADO EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA**

**PRESENTA**

**IRVIN OMAR LOPEZ BAUTISTA**

**DIRECTOR**

**DR. DELFINO REYES LÓPEZ**

**CODIRECTOR**

**DR. FERMÍN PASCUAL RAMÍREZ**

**ASESORES**

**DR. LUIS ANTONIO DOMINGUEZ PERALES**

**M.C. FABIEL VÁZQUEZ CRUZ**

**San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México, Junio de 2020**

La presente tesis titulada: **COEFICIENTE DE CULTIVO DE *Vanilla planifolia* G. Jackson EN LA ETAPA FINAL**, realizada por **IRVIN OMAR LOPEZ BAUTISTA**, ha sido revisada y aprobada por el siguiente consejo particular, para obtener el título de:

**LICENCIADO EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA**

**Facultad de Ingeniería Agrohidráulica**

Consejo particular integrado por:

**Director: Dr. Delfino Reyes López**



**Codirector: Dr. Fermín Pascual Ramírez**



**Asesor: Dr. Luis Antonio Domínguez Perales**



**Asesor: M. C. Fabiel Vázquez Cruz**



**San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México, Junio de 2020**

La tesis: **COEFICIENTE DE CULTIVO DE *Vanilla planifolia* G. Jackson EN LA ETAPA FINAL**, forma parte de grupo de investigación: **Agrobiotecnología y Recursos Naturales** y de la línea de investigación: **Biotecnología, Conservación y Protección Vegetal**. Financiada por el Proyecto **PDCPN-2015-640 “Bases para mejorar el aprovechamiento sustentable del agua de uso agrícola en México”** de la convocatoria para ‘Proyectos de Desarrollo Científico para Atender Problemas Nacionales 2015’ de los Fondos Institucionales CONACYT.

## **DEDICATORIA**

A mi mama Josefina Bautista Pérez quien ha estado en todo momento para apoyarme y lograr esta meta en mi vida, le dedico todo lo que soy y estoy muy orgulloso de ser su hijo, gracias mami por estar conmigo y ser madre y padre a la vez. Siempre estaré agradecido contigo por enseñarme a valorar las cosas y por ser un gran ejemplo para mí, te quiero muchísimo mamá.

A mi hermano Agustín López Bautista quien ha estado conmigo todo el tiempo y que supo ser padre y hermano para mí, estoy muy orgulloso por tener el mejor hermano del mundo y muy agradecido por el apoyo que me has brindado te quiero mucho hermano.

A mi novia Graciela Martínez Inés por estar conmigo y apoyarme mucho en el periodo de mi tesis por sus palabras de motivación y su cariño sincero te quiero mucho amor.

## AGRADECIMIENTOS

Al Doctor Delfino Reyes López por su confianza, amistad, enseñanzas, consejos y por la oportunidad que me brindo para trabajar bajo su dirección y realizar la presente investigación en el cultivo de *Vanilla planifolia G. Jackson*.

Al Doctor Fermín Pascual Ramírez por ser un gran investigador, por la confianza, apoyo, consejos, enseñanzas y dedicación de tiempo para la elaboración e investigación de la presente tesis.

Al Doctor Luis Antonio Domínguez Perales por ser un gran maestro, amigo y por su apoyo para la elaboración de la tesis.

Al Maestro en Ciencias Fabiel Vázquez Cruz por ser un gran maestro, amigo y la confianza para realizar mi investigación.

Al proyecto PDCPN-2015-640 “Bases para mejorar aprovechamiento sustentable del agua de uso agrícola en México” de los Fondos Institucionales CONACYT, por el financiamiento otorgado para el desarrollo de la investigación y la beca otorgada para la tesis.

A mi madrina Areli Ramírez López quien me apoyo durante toda mi carrera y me abrió las puertas de su hogar en mi estancia en Teziutlán muchas gracias madrina.

A todos los maestros de la Facultad de Ingeniería Agrohidráulica por sus enseñanzas y por su apoyo en mi formación como estudiante.

A mis amigos Augusto Omar Villa Camacho, Laura Maleni Ordoñez Hernández y mi amigo Luis Antonio Vega Mendoza por su amistad, confianza y consejos recibidos durante la carrera

A todos los trabajadores de la Facultad de Ingeniería Agrohidráulica por su apoyo para brindarnos las herramientas y en los trámites realizados.

A mi generación por los momentos compartidos dentro y fuera de la facultad.

Al gran equipo de la vainilla conformado por el Sr. Ángel Reyes propietario del terreno, Omar Gonzales Lara, Nahúm Méndez Olmos, Alfredo Pérez Rojas y Anita Quiahua Sánchez

## INDICE

---

<b>Contenido</b>	<b>Pagina</b>
INDICE DE CUADROS .....	I
INDICE DE FIGURAS .....	II
RESUMEN .....	III
ABSTRACT .....	IV
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS .....	3
2.1  Objetivo general.....	3
2.2  Objetivos específicos .....	3
III. HIPÓTESIS .....	3
IV. REVISION DE LITERATURA .....	4
4.1  Importancia del coeficiente de cultivo (Kc) en los cultivos agrícolas. ....	4
4.2  Conceptos generales de la evapotranspiración.....	5
4.3  Metodología para calcular el kc en los cultivos .....	6
4.4  Evapotranspiración de referencia.....	6
4.5  Definición de lisímetro.....	8
4.6  Principios de funcionamiento de un lisímetro.....	8
4.7  Clasificación de los lisímetros .....	9
4.7.1  Por la determinación del contenido de agua en el suelo.....	9
4.7.2  Por aislamiento de la masa del suelo.....	12
4.8  Uso y manejo del agua en vainilla .....	12
4.9  Determinación del contenido de humedad del suelo .....	14
4.10  Generalidades del cultivo de vainilla .....	15

---

---

4.11	Importancia del cultivo de la vainilla.....	17
4.11.1	Producción nacional de vainilla.....	18
4.12	Etapas de crecimiento del cultivo de vainilla.....	18
V.	MATERIALES Y METODOS.....	20
5.1	Ubicación del sitio experimental.....	20
5.2	Establecimiento del módulo experimental.....	20
5.3	Sustrato.....	22
5.3.1	Curva característica de humedad del sustrato .....	23
5.4	Variables evaluadas.....	24
5.4.1	Variables vegetativas.....	24
5.4.2	Variables meteorológicas .....	25
5.5	Estimación del coeficiente de cultivo (Kc) en la etapa de mediados de desarrollo y en la etapa final.....	26
VI.	RESULTADOS Y DISCUSION .....	28
6.1	Estación lisimétrica de drenaje .....	28
6.2	Variables vegetativas de control .....	28
6.2.1	Frutos.....	28
6.2.2	Brotes vegetativos .....	33
6.3	Variables climáticas de control .....	38
6.4	Cálculo del Kc.....	43
VII.	CONCLUSIONES .....	50
VIII.	LITERATURA CITADA .....	51

---



## INDICE DE CUADROS

---

<b>Contenido</b>	<b>Pagina</b>
<b>Cuadro 1. Clasificación botánica de la vainilla.....</b>	<b>17</b>
<b>Cuadro 2. Características fisicoquímicas del sustrato .....</b>	<b>23</b>
<b>Cuadro 3. Características morfológicas de frutos de vainilla .....</b>	<b>29</b>
<b>Cuadro 4. Peso y tiempo de maduración de frutos de vainilla.....</b>	<b>32</b>
<b>Cuadro 5. Características morfológicas de los brotes de vainilla .....</b>	<b>34</b>
<b>Cuadro 6. Detalles del registro de temperatura .....</b>	<b>39</b>
<b>Cuadro 7. Información meteorológica complementaria mensuales .....</b>	<b>40</b>
<b>Cuadro 8. Kc mensual y sus variables de cálculo .....</b>	<b>44</b>

---

## INDICE DE FIGURAS

---

<b>Contenido</b>	<b>Pagina</b>
<b>Figura 1. Producción nacional de vainilla.....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 2. Ubicación del sitio experimental.....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 3. Lisímetro de drenaje.....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 4. Determinación de la humedad del sustrato con termobalanza.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 5. Instalación de la estación meteorológica.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 6. Sitio experimental. a) Módulo experimental, b) Estación lisimétrica de drenaje.....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 7. Modelación del crecimiento. a) Longitudinal, b) Engrosamiento.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 8. Crecimiento temporal de brotes de vainilla.....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 9. Tasa de crecimiento diaria.....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 10. Tasa de crecimiento en los primeros 49 días.....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 11. Engrosamiento temporal.....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 12. Tasa de engrosamiento por temporalidad de emergencia.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 13. Anomalía absoluta de la precipitación.....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 14. Relación entre precipitación y amplitud térmica.....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 15. Valores mensuales de Kc.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 16. Análisis conjunto de Kc y Amplitud Térmica.....</b>	<b>48</b>

---

## RESUMEN

En el cultivo de vainilla no se cuenta con el Kc en etapa final del desarrollo que es de importancia para la planeación de riegos. El objetivo de esta investigación fue estimar el coeficiente de cultivo para la etapa final, en *Vanilla planifolia G Jackson* en donde se evaluó la evapotranspiración real (ETr) y la evapotranspiración de referencia (ETo). La ETr se determinó mediante un lisímetro de drenaje y la ETo con el método de Penman Monteith (PM), estimada mediante una estación meteorológica instalada en el sitio experimental, ubicado en Caracoles, Tenampulco Puebla. El coeficiente de cultivo promedio mensual (Kc) en la etapa final del cultivo de vainilla fue de 0.25. Sin embargo, en los meses de mayo y junio se registraron valores de Kc de 0.35 y 0.34 respectivamente, y en los meses de noviembre y diciembre de 0.14 y 0.16, respectivamente. Los valores más altos de Kc, se registraron en la temporada de crecimiento de los frutos, los cuales requirieron alrededor de 80 días para alcanzar su máxima longitud y diámetro. Por otra parte, en otoño la vainilla presentó una tasa de consumo de agua regulada por la amplitud térmica donde el consumo de agua fue menor.

**Palabras clave:** *Vanilla planifolia G. Jackson*, coeficiente de cultivo, evapotranspiración real, evapotranspiración de referencia

## ABSTRACT

In vanilla cultivation, there is no  $K_c$  in the final stage of development, which is important for irrigation planning. The objective of this investigation was to estimate the cultivation coefficient for the final stage, in *Vanilla planifolia* G Jackson where the real evapotranspiration ( $E_{Tr}$ ) and the reference evapotranspiration ( $E_{To}$ ) were evaluated.  $E_{Tr}$  was determined using a drainage lysimeter and  $E_{To}$  with the Penman Monteith (PM) method, estimated using a meteorological station installed at the experimental site, located in Caracoles, Tenampulco Puebla. The monthly average cultivation coefficient ( $K_c$ ) in the final stage of vanilla cultivation was 0.25. However, in the months of May and June  $K_c$  values of 0.35 and 0.34 respectively were recorded, and in the months of November and December 0.14 and 0.16, respectively. The highest  $K_c$  values were recorded in the fruit growing season, which required around 80 days to reach its maximum length and diameter. On the other hand, in autumn the vanilla presented a rate of water consumption regulated by the thermal amplitude where the water consumption was lower.

Key words: *Vanilla planifolia* G. Jackson, cultivation coefficient, real evapotranspiration, reference evapotranspiration

## I. INTRODUCCIÓN

El agua disponible para el riego de los cultivos está cada vez más limitada tanto cuantitativa como cualitativamente; en consecuencia, se hace cada vez más necesario el uso eficiente del agua en los sistemas de riego (Bonet *et al.*, 2010). Para ello, es necesario la determinación del consumo hídrico de los cultivos, el cual está directamente relacionado con la evapotranspiración real del cultivo (ETr) y la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo), mismos que al relacionarlos determinan el coeficiente de cultivo (Kc) (Cisneros *et al.*, 2015; Allen *et al.*, 2006).

El coeficiente de cultivo o Kc, depende de las características anatómicas, morfológicas y fisiológicas de cada cultivo (Valverde, 2007; Doorembos y Pruit, 1977; Allen *et al.*, 1998). Este coeficiente describe las variaciones de la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo a medida que van desarrollándose (Servín *et al.*, 2012). Por lo tanto, al ajustar los coeficientes de los cultivos a las etapas fenológicas se logran significativas reducciones de agua que se aplican en etapas menos sensibles en las cantidades adecuadas para su desarrollo (Castro *et al.*, 2008). El método Kc, en particular el enfoque dual, estudian por separado la evaporación del cultivo y la transpiración debido a la etapa de desarrollo del cultivo, por lo que se permiten realizar estimaciones periódicas por etapa fenológica (Allen *et al.*, 1998). En general, el Kc puede ser estimado a partir de la determinación de la evapotranspiración real (ETr) en un lisímetro y la evapotranspiración de referencia (ETo) por el método de Penman-Monteith. Los lisímetros determinan la evapotranspiración por medición de pérdida de agua en recipientes que se llenan de suelo y se siembran con el cultivo en cuestión; por otro lado, el método Penman-Monteith se utiliza para calcular la ETo a partir de datos meteorológicos como radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento obtenidos en la condición en la que se desarrolla el cultivo (Aguilera y Martínez, 1996; Allen *et al.*, 2006).

El desconocimiento de las necesidades hídricas de los cultivos no tradicionales, por ejemplo, vainilla, es una de las principales preocupaciones y limitantes para quienes se dedican a su producción (Kelso *et al.*, 2012).

Damirón (2004); Curti (1995); Bouriquet (1954), reconocen la importancia de contar con un sistema de riego en el establecimiento del cultivo en cualquier época del año, para evitar estrés hídrico en las plantas, ya que su impacto causa pérdidas económicas (Pereira, 2007). En este sentido, Sánchez (1997), recomienda para el cultivo de vainilla aplicar una lámina de riego de  $45.97 \text{ mm d}^{-1}$ , distribuidos en 2 riegos de 4 horas mediante aspersión a 4 m de altura, el primero en la mañana y el segundo en la tarde durante la temporada de sequía. Mientras que Castro-Bobadilla (2008), aplicó riegos localizados a las 18:00 h con intervalos diarios durante la temporada seca (mayo-junio) en cuatro tratamientos que van de 0 hasta  $1.0 \text{ L m}^{-2}$ , donde reconoce que la combinación de humedad de suelo y el manejo de los vainillales parece tener una fuerte influencia sobre la retención de frutos y mejora la condición del cultivo. Kelso (2009), estimó mediante lisimetría el coeficiente *in situ* de cultivo  $K_{cini}$  0.35 para la fase inicial de desarrollo de la *Vanilla planifolia*. Sin embargo, no se cuenta aún con datos acerca de la estimación de los coeficientes de cultivo para las siguientes fases fenológicas. Por lo que el objetivo del presente trabajo fue determinar el  $K_c$  en el cultivo de vainilla (*V. planifolia*) en la etapa de mediados de desarrollo y final mediante, la  $E_{To}$  y  $E_{Tr}$ .

## II. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

- Determinar el coeficiente de cultivo de *Vanilla planifolia* G. Jackson en la etapa final.

### 2.2 Objetivos específicos

- Estimar la evapotranspiración real y de referencia a partir de los datos obtenidos del lisímetro de drenaje y la estación meteorológica.
- Evaluar el desarrollo vegetativo del cultivo de vainilla en la etapa final, teniendo un intervalo de humedad en el suelo de 35 a 45 %.
- Evaluar el desarrollo de los frutos en vainilla desde la fecundación hasta la cosecha.

## III. HIPÓTESIS

El coeficiente de cultivo (Kc) en la fase final de desarrollo para *Vainilla planifolia* G. Jackson es menor a 0.9.

## IV. REVISION DE LITERATURA

### 4.1 Importancia del coeficiente de cultivo (Kc) en los cultivos agrícolas.

La selección de los coeficientes de desarrollo de los cultivos constituye la primera etapa para estimar la evapotranspiración del cultivo; requerida en la estimación del balance hídrico de un campo, elaboración del calendario de riego y lavado de suelos salinos. El significado físico de este coeficiente representa el crecimiento del área foliar a través del ciclo de vida de los cultivos, por lo que su selección o estimación debe hacerse con mucho cuidado, ya que depende de este coeficiente el ajuste del consumo de agua (demanda evapotranspirativa) de los cultivos, fluctuando de acuerdo con el metabolismo de la especie y otros factores como la disponibilidad del agua y el estado fitosanitario. Mismos que se asumen son óptimos para el desarrollo del cultivo de nuestro interés (Doorenbos y Pruitt, 1977).

La Organización para la Agricultura y Alimentación de las Naciones Unidas, propuso la metodología FAO-56 basada en la evapotranspiración de referencia que se calcula con la ecuación FAO Penman-Monteith y un coeficiente de cultivo (Kc); este método ha sido ampliamente utilizado debido a que ha arrojado resultados satisfactorios bajo diversas condiciones climáticas alrededor del mundo; el Kc representa las características específicas del cultivo, tales como altura, resistencia superficial, albedo, entre otras; el Kc varía poco con el clima. Sin embargo, es afectado por el manejo del cultivo y el riego, así como por condiciones ambientales tales como presencia de plagas y enfermedades, salinidad en el suelo, etc., lo que conduce a diferentes condiciones de estrés hídrico y conlleva a ajustar el valor de Kc a las condiciones actuales o reales mediante el uso de un coeficiente de estrés (Ks) (Zhang *et al.*, 2013).

El coeficiente de cultivo (Kc) es un parámetro que resume el comportamiento de los cultivos en el sistema suelo-atmósfera, e integra factores tales como las características fisiológicas de la planta, etapas del desarrollo fenológico y las condiciones climáticas predominantes (Chaves *et al.*, 2005; Medeiros *et al.*, 2004; Doorenbos y Pruitt, 1976, citado por Rodríguez, 2012). En el Kc se combinan los efectos de la transpiración del cultivo y la



evaporación del suelo. Éste, integra las diferencias en la evaporación en el suelo y en la tasa de transpiración del cultivo, entre el cultivo y la superficie de referencia. Debido a que la evaporación en el suelo puede fluctuar diariamente como resultado de la lluvia o el riego, el  $K_c$  es solamente una expresión de los efectos promedios en el tiempo (múltiples días), de la evapotranspiración del cultivo; que permite, diseñar, planificar y realizar un manejo adecuado del riego (Allen *et al.*, 2006).

#### **4.2 Conceptos generales de la evapotranspiración**

Evapotranspiración es el agua transferida a la atmósfera a través de los tejidos de las plantas se denomina transpiración, la cual corresponde a la mayor parte del agua aplicada a los cultivos para su desarrollo, y la evaporación directa del suelo. A la combinación de estos dos procesos se les llama evapotranspiración (Quiñonez, 1997).

La evapotranspiración de referencia ( $E_{To}$ ), es un concepto establecido para indicar la cantidad de agua que se transfiere a la atmósfera de un suelo permanentemente húmedo, cubierto por un cultivo de referencia. El cultivo de referencia puede ser alfalfa o pasto bien regado, en pleno desarrollo y en buenas condiciones fitosanitarias.

La evapotranspiración potencial ( $E_{Tp}$ ), es la evapotranspiración de un cultivo en función de su grado de desarrollo vegetativo y bajo condiciones de disponibilidad suficiente de agua.

Ortiz (1984) define el término de evapotranspiración real ( $E_{Tr}$ ) como la cantidad de agua perdida por el complejo planta-suelo bajo las condiciones meteorológicas, edáficas y biológicas existentes.

### **4.3 Metodología para calcular el kc en los cultivos**

El coeficiente del cultivo (Kc) integra las diferencias de la evaporación desde el suelo y la tasa de transpiración entre el cultivo y la superficie del pasto de referencia (Allen 2006). El coeficiente único Kc incorpora las características del cultivo y los efectos promedio de la evaporación desde el suelo, éste se utiliza para una adecuada planificación del riego y propósitos de manejo, para la definición de calendarios básicos de riego y para la mayoría de los estudios de balance hídrico agrícola; los valores de Kc son diferentes de acuerdo con los ciclos fenológicos de cada cultivo. Debido a que la evaporación es un componente de la evapotranspiración del cultivo, los factores que afectan la evaporación en el suelo también afectaran el valor del Kc. Estos factores son: el tipo de cultivo, el clima, la evaporación del suelo y las etapas de crecimiento.

### **4.4 Evapotranspiración de referencia**

La evapotranspiración de referencia, es la evapotranspiración que ocurre en una superficie sembrada con un cultivo hipotético de referencia con una altura asumida de 0.12 m y puede ser estimada a partir de datos climáticos. Para ello, se recomienda el método Penman-Monteith como el único método para determinar la evapotranspiración de referencia, se trata de una representación clara, precisa y simple de los factores físicos y fisiológicos que gobiernan el proceso de evapotranspiración (Allen *et al.*, 2006).

La ecuación utiliza datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento (ecuación 1). Para asegurar la precisión del cálculo, los datos climáticos deben ser medidos o convertidos a 2 m de altura, asumiendo como hipótesis, que actúan sobre una superficie extensa de pasto verde, cubriendo completamente el suelo y sin limitaciones de agua.

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

Donde:

- ET<sub>o</sub>: evapotranspiración de referencia [mm día<sup>-1</sup>]
- R<sub>n</sub>: radiación neta en la superficie del cultivo [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>]
- G: flujo del calor del suelo [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>]
- T: temperatura media del aire a 2 m de altura [°C]
- u<sub>2</sub>: velocidad del viento a 2 m de altura [m s<sup>-1</sup>]
- e<sub>s</sub>: presión de vapor de saturación [kPa]
- e<sub>a</sub>: presión real de vapor [kPa]
- e<sub>s</sub> - e<sub>a</sub>: déficit de presión de vapor [kPa]
- Δ: pendiente de la curva de presión de vapor [kPa°C<sup>-1</sup>]
- γ: constante psicrométrica [kPa°C<sup>-1</sup>]

De lo mostrado por la ecuación 1, los parámetros de radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad de viento, se miden directamente en estaciones meteorológicas; en tanto que el resto de los parámetros se relacionan con los datos medidos y se obtienen a través de relaciones establecidas ampliamente documentadas en FAO 56 (Allen *et al.*, 1998).

La presión de vapor a saturación (e<sub>s</sub>) y el flujo de calor sensible del suelo (G), se calculan a partir de datos de la temperatura del aire; la presión real de vapor (e<sub>a</sub>) se calcula a partir de datos de humedad relativa; la pendiente de la curva de presión de vapor (Δ), se determina a través de la relación entre la presión de vapor de saturación (e<sub>s</sub>) y la temperatura del aire; finalmente, la constante psicrométrica se determina en función de la altitud (Allen *et al.*, 2006).

#### 4.5 Definición de lisímetro

El término lisímetro, deriva de las palabras griegas “*lysis*” (disolver) y “*metron*” (medir). Este vocablo se puede aplicar a todo dispositivo utilizado para determinar la velocidad, cantidad y composición del agua que percola en un medio poroso (De Santa *et al.*, 2005). Se puede considerar que los lisímetros son recipientes aislados que se llenan de suelo con o sin disturbio en los que se siembra, crece y desarrolla un cultivo para estimar la evapotranspiración por procedimientos de pérdida de agua (Valverde, 2007; Allen *et al.*, 2006; Aguilera y Martínez, 1996). Por otro lado, también se menciona que un lisímetro consiste en la aislación hidrológica de un cierto volumen de suelo cultivado con la especie de plantas cuyo comportamiento se requiere conocer y en donde las variaciones de humedad se miden periódicamente mediante el dispositivo completo (Ledesma, 2000).

#### 4.6 Principios de funcionamiento de un lisímetro

La lisimetría en su forma más simple, incluye la medida volumétrica de todas las aguas que entran y salen de un recipiente conteniendo una masa aislada de suelo con una superficie o cubierta vegetal (Aboukhaled *et al.*, 1986).

Para calcular la evapotranspiración, los flujos de entrada y salida de agua en un lisímetro, pueden ser representados en la ecuación 2 obtenida a partir de la ecuación de balance hídrico.

$$ET = P + I - D \pm \Delta W \dots\dots\dots Ec. (2)$$

Donde:

ET: Evapotranspiración [mm]

P: Precipitación [mm]

I: Irrigación [mm]

D: percolación profunda o agua de drenaje [mm]

$\Delta W$ : Cambios en el contenido de agua (W) de la masa aislada del suelo en un determinado periodo [mm]

La precipitación (P) y la irrigación (I) pueden ser medidas mediante pluviómetros y métodos volumétricos convencionales. Para drenar y medir el agua que percola a través de la masa de suelo (D), son utilizados una cámara de drenaje y un recipiente de volumen conocido.

Los cambios en el contenido de agua en la masa de suelo ( $\Delta W$ ), representan la cantidad de agua almacenada en el suelo después de una lluvia o irrigación, o la cantidad de agua extraída del suelo por la evapotranspiración de las plantas en el lisímetro. En los lisímetros de pesada, los cambios de peso, una vez corregidos por precipitación, irrigación y drenaje, proporcionan una forma directa y exacta de medir los cambios en el contenido de agua en el suelo ( $\Delta W$ ) (Aboukhaled *et al.*, 1986).

#### **4.7 Clasificación de los lisímetros**

Existen dos criterios principales de clasificación de los lisímetros. El primero de ellos se basa en la forma de determinar el contenido de agua en el suelo, y con arreglo a él los lisímetros se agrupan en dos grandes categorías: los lisímetros volumétricos o de drenaje y los lisímetros de pesada. El segundo criterio se basa en el método utilizado para aislar la masa de suelo, y de acuerdo con él, los lisímetros se agrupan en tres grandes tipos: lisímetros monolíticos, lisímetros de relleno o perturbados y lisímetros tipo Ebermayer (De Santa *et al.*, 2005).

##### **4.7.1 Por la determinación del contenido de agua en el suelo**

###### a) Lisímetros volumétricos

Los lisímetros volumétricos basan su funcionamiento en la determinación de la evapotranspiración como término residual del balance hídrico durante un periodo de tiempo restándole a la cantidad de agua total aportada por lluvia y/o riegos en exceso de agua recogida en el fondo mediante recipientes aforos (Brasa, 1997). Dentro de esta clasificación de lisímetros, se consideran los siguientes tipos: lisímetros de drenaje sin nivel freático,

lisímetros de compensación con nivel freático constante y lisímetros de compensación con nivel freático en la superficie (Aboukhaled *et al.*, 1986).

Lisímetros de drenaje sin nivel freático: El agua en exceso es recogida en el fondo del lisímetro y medida volumétricamente. Por otro lado, la lluvia y los riegos son medidos mediante pluviómetros y/o mediante recipientes debidamente calibrados. La evapotranspiración durante un tiempo determinado, es considerada igual a la diferencia entre la cantidad de agua aplicada y drenada (Aboukhaled *et al.*, 1986).

Lisímetros de compensación con nivel freático constante: El nivel freático es mantenido constante en la parte inferior de estos lisímetros. En respuesta a la evapotranspiración, el agua del nivel freático se desplaza en la zona radicular por capilaridad. El descenso del nivel freático, causado por este desplazamiento, es automáticamente compensado por un dispositivo de flotador y la cantidad de agua necesaria para reponer su nivel, es medida automáticamente (Aboukhaled *et al.*, 1986).

Lisímetros de compensación con nivel freático en la superficie: En estos lisímetros, el nivel freático es mantenido constante por encima de la superficie del suelo, por medio de un dispositivo regulador flotante o agregando agua periódicamente. La evapotranspiración es determinada directamente midiendo la cantidad de agua necesaria para recuperar la posición original del nivel freático (Aboukhaled *et al.*, 1986).

#### b) Lisímetros de pesada

Los lisímetros de pesada constituyen el método más preciso y directo de medida del consumo de agua de las plantas. Estos permiten determinar la evapotranspiración real del cultivo a intervalos de tiempo cortos, durante periodos diarios de horas, e incluso inferiores (Pérez, 2001). Los cambios de peso representan una medida directa del flujo de agua que entra y sale del contenedor de suelo. Un aumento de peso indica la entrada de lluvia o riego, un descenso indica una salida por drenaje o evapotranspiración. Así la evapotranspiración puede ser determinada con bastante precisión para intervalos de tiempo cortos (Brasa, 1997).

Según el principio y dispositivo utilizado para determinar los cambios de peso, los lisímetros de pesada se pueden clasificar en lisímetros con sistema mecánico de pesada, lisímetros con sistema electrónico, lisímetros con células hidráulicas y lisímetros flotantes (Aboukhaled *et al.*, 1986).

**Lisímetros de peso mecánico:** Los cambios de peso provocados por la evapotranspiración, precipitación o riego se detectan utilizando diferentes tipos de balanzas mecánicas. Existe un recipiente exterior o unas paredes de retención, que permiten un desplazamiento vertical libre del recipiente que contiene la masa de suelo y el cultivo. El recipiente interno puede pesarse utilizando simples balanzas portátiles, basculas móviles de plataforma y grúas (De Santa *et al.*, 2005).

**Lisímetros de peso electrónico:** Las variaciones de peso del recipiente interno con su suelo, son medidas electrónicamente por medio de indicadores de esfuerzo o células electrónicas de resistencia mecánica. El recipiente interno es frecuentemente colocado en un armazón de equilibrio, el cual por medio de contrapesos reduce el peso actual en el indicador de esfuerzo (Aboukhaled *et al.*, 1986).

Se trata de equipos de difícil construcción y muy vulnerables, lo que limita su aplicación a estaciones experimentales especializadas. Aunque es posible obtener una buena exactitud en las medidas, los indicadores de esfuerzo se ven afectados por cambios de temperatura y las células de resistencia mecánica por el balanceo del lisímetro, lo que hace necesario realizar calibraciones periódicas (De Santa *et al.*, 2005).

**Lisímetros con células hidráulicas:** El peso total del lisímetro es distribuido sobre células hidráulicas (bolsas, almohadas o colchones de agua u otro líquido) y la presión resultante es transmitida e indicada en un manómetro. Los cambios en la altura del manómetro son originados por cambios de peso en el lisímetro, provocados por la evapotranspiración, la precipitación o el riego (Aboukhaled *et al.*, 1986).

Existen dos factores que pueden provocar errores a la hora de determinar la evapotranspiración: la expansión de agua en el manómetro debido a cambios de temperatura y la variación con el peso del lisímetro de la superficie de contacto entre este y su célula de carga (De Santa *et al.*, 2005).

Lisímetros flotantes: El recipiente interno del lisímetro con el suelo flota sobre un líquido ( $H_2O$  o  $ZnCl_2$ ) contenido en el recipiente externo (flotación hidrostática o principio de Arquímedes). Los cambios de peso en el lisímetro, debidos a la evapotranspiración, lluvia o irrigación, se obtienen midiendo los cambios de nivel del líquido desplazado (Aboukhaled *et al.*, 1986).

#### **4.7.2 Por aislamiento de la masa del suelo**

Lisímetro monolítico: En estos tipos de lisímetros, el volumen del suelo, tal como se encuentra en condiciones naturales, es encerrado por las paredes de un recipiente y en el fondo del recipiente es provisto de sistema receptor del agua de percolación (Brasa, 1997; Aboukhaled *et al.*, 1986). Se recomienda utilizar los lisímetros monolíticos para estudios de escorrentía, infiltración y percolación. También son usados para determinar las necesidades de agua de los cultivos, pero debido a que el proceso de aislar y encerrar el bloque de un suelo sin perturbar, requiere técnicas y equipos especiales, el costo de instalación de estos lisímetros aumenta considerablemente (De Santa *et al.*, 2005; Aboukhaled *et al.*, 1986).

#### **4.8 Uso y manejo del agua en vainilla**

El área productora de vainilla se localiza en las costas y la parte montañosa del Golfo de México, desde el nivel del mar hasta una altitud de 700 m, predominando el clima tropical cálido-húmedo con temperaturas promedio alrededor de 24 °C, humedad relativa de 80%, precipitación desde 1200 a 3000 mm anuales y un periodo de sequía que se presenta durante el periodo de marzo a junio (Hernández, 2014). La vainilla carece de un soporte propio, motivo por el cual, se considera como una planta trepadora, con un contenido de agua mayor



al 80 % de su peso fresco. Presenta hojas ovaladas-elípticas, tamaño intermedio de 5 – 15 cm de largo y de 2 – 10 cm de ancho, el tallo presenta una forma de crecimiento ascendente en forma de zigzag. Frutos casi cilíndricos de 15 a 20 cm de largo y de 8 a 14 mm diámetro. Contenido de vainillina de 1.2 – 1.8 % (Damirón, 2004). En la actualidad las formas de riego que utilizan algunos productores de la región del Totonacapan son de microaspersión y por goteo de forma empírica (Vega, 2010). El riego se realiza durante los meses más calurosos y con poca precipitación que son en los meses de marzo, abril, mayo y junio.

El riego en el cultivo de la vainilla ha tenido algunos avances, en cuanto a su demanda hídrica de acuerdo a las fases de su crecimiento o clima de una de las distintas regiones donde se cultiva esta especie, Kelso *et al.*, (2012), estimo los coeficientes de cultivo para la fase inicial y media de desarrollo *ex situ* de *Vanilla planifolia* en Ixtacuaco, así como la recalibración regional de la ecuación de Hargreaves. Los resultados de la estimación de coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) con el método Linear-Plateau corresponden a un coeficiente de cultivo etapa inicial ( $K_{c_{ini}}$ ) de 0.34 para los 0-200 días después de la siembra (DDS) y una demanda hídrica de  $0.68 \text{ mm}^{d^{-1}}$ , un Coeficiente de cultivo etapa de desarrollo del cultivo ( $K_{c_{des}}$ ) de 0.34-0.90 para los 200-562 DDS y una demanda hídrica de  $0.27 \text{ mm}^{d^{-1}}$ , y un Coeficiente de cultivo etapa mediados de temporada ( $K_{c_{med}}$ ) de 0.9 para los 562-620 DDS y una demanda hídrica de  $0.19 \text{ mm}^{d^{-1}}$ .

Cuando las plantas no son sometidas a ningún estrés hídrico, su color en la hoja se reporta como verde oscuro sin manchas siendo una de las características de *V. Planifolia* considerados para el Totonacapan Puebla-Veracruz, México, como lo reportan (Herrera-Cabrera *et al.*, 2014).

Rechy (2018) determinó que la relación en el sustrato para el cultivo de vainilla es una mezcla de bocashi y arena, en una proporción 9:1 es decir 90 % bocashi y 10% arena, esta presenta mayor retención de humedad y características como densidad aparente ( $D_a$ ), Conductividad eléctrica (CE), Capacidad de intercambio catiónico (CIC), y la relación Carbono-Nitrógeno (C/N).

#### **4.9 Determinación del contenido de humedad del suelo**

La determinación del contenido de agua del suelo es un dato indispensable para el cálculo de los aportes de riego, la cantidad de agua en el suelo y el potencial del agua, están indudablemente relacionados, al no contarse con una función conocida que relacione ambos valores, las curvas son muy variables según el tipo y condiciones del suelo, así como de la temperatura y antecedentes de humedecimiento o desecación; por ello si se quiere conocer con exactitud el potencial del agua en el suelo, se debe procederse a su medición directa (Santa, 1992).

El método más común y práctico ampliamente utilizado para estimar el requerimiento de agua de cultivo, y el monitoreo operacional del balance hídrico suelo-planta es el método utilizado en el manual de la FAO-56. Donde la evapotranspiración de cultivos se estima mediante la combinación de evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar y coeficientes de cultivo. Existen dos enfoques diferentes: coeficientes de cultivo único y doble. El enfoque del coeficiente de un solo cultivo se usa para expresar tanto la transpiración de la planta como la evaporación del suelo combinados en un único coeficiente de cultivo. El enfoque del coeficiente dual de cultivo utiliza dos coeficientes para separar la contribución respectiva de la transpiración de la planta y la evaporación del suelo, cada uno por valores individuales (Allen *et al.*, 1998).

Lisímetro perturbado: En estos lisímetros el suelo excavado del área del lisímetro es colocado en un recipiente. Durante su construcción, debe ponerse un cuidado especial en reconstituir las condiciones originales de secuencia y densidad de las distintas capas del perfil del suelo (Aboukhaled *et al.*, 1986).

Lisímetro tipo Ebermayer: Consta de un embudo y un colector situados por debajo de la masa del suelo sin alterar, carecen de paredes laterales, permitiendo sin restricciones el flujo lateral del agua de escorrentía (De Santa *et al.*, 2005).

#### 4.10 Generalidades del cultivo de vainilla

La vainilla es una planta trepadora de la familia de las orquídeas, considerada una planta epífita no parasita, se caracteriza por utilizar un tutor para sostenerse y así crecer, pero su fuente de nutrición es la materia orgánica que se encuentra en la superficie terrestre, en donde sus raíces se desarrollan en los primeros 10 cm de profundidad (Hernández y Sánchez, 2011; Reyes *et al.*, 2008).

Por su hábito trepador la planta necesita de un patrón o tutor, que le proporcione sostén y de ser posible también sombra. En las plantaciones tradicionales, se utilizan como tutores las plantas nativas que crecen en los terrenos en forma natural (*Bursera simaruba*) (Olivares, 2010).

La vainilla, como la mayoría de las orquídeas necesita de sombra para su desarrollo normal, la cual en la mayoría de los casos es proporcionada por los tutores naturales (Martin, 2001). Así mismo, con la finalidad de imitar las condiciones idóneas para el desarrollo del cultivo y obtener mayores rendimientos por unidad de superficie se ha adaptado la tecnología de las casas sombras para la producción intensiva de vainilla. Los productores de vainilla bajo este sistema de cultivo, han utilizado malla sombra con graduaciones desde el 50 al 70%, siendo el más recomendable el 70% para evitar quemaduras y estrés de la planta por radiación directa. Sin embargo, en algunas regiones más tropicales este porcentaje de sombra tiene variaciones no cuantificadas de manera estable, sin que esto afecte de manera importante el ciclo de producción (Kelso, 2012).

La planta de vainilla para su óptimo desarrollo y producción requiere de las condiciones agroecológicas siguientes:

- Clima. La *Vanilla planifolia*, es una especie que prospera en clima tropical cálido húmedo.

- Temperatura. Las características de las regiones donde la vainilla prospera de forma adecuada son: temperaturas de 20° a 30°C (Childers *et al.*, 1948; Ranadive, 2005), e incluso hasta los 32°C (Purseglove *et al.*, 1981; Anandaraj *et al.*, 2005).

- Precipitación. Requiere una precipitación media anual entre 2,000 a 3,000 mm (Sasikumar *et al.*, 1992; Soto, 2003). También la planta necesita de dos a tres meses relativamente secos para estimular la floración de la planta. En lugares, con una precipitación, mayor a 3,000 mm anuales, las plantaciones tienen más ataque de hongos, principalmente por *Fusarium* sp. Por el contrario, en lugares con bajas precipitaciones y si no se tiene un sistema de riego, la escasez de agua constituye el peor enemigo de la vainilla.

- Altitud. La altitud que más favorece el cultivo de vainilla, se encuentra entre 0 m y 600 m (Childers *et al.*, 1959), aunque se han encontrado plantas creciendo hasta los 1,100 msnm (Soto, 2003) e incluso en India, se cultiva hasta los 1,500 msnm (Tv, 2003; Anadararaj *et al.*, 2005).

- Luz-sombra. La planta de vainilla para su crecimiento óptimo requiere 50% de luz o sombra en la mayor parte del año. Pero, en épocas secas con soles intensos, es preferible mantener una sombra de 50 a 70% (Hernández, 1943; Ranadive, 2005) que permita conservar la humedad del suelo y del aire. Mientras que, en los meses lluviosos, la cantidad de sombra, debe ser de 30 a 50% para evitar condiciones favorables al desarrollo de enfermedades.

- Selección de terreno. Los terrenos donde se establezcan vainillales, deberán tener un excelente drenaje, ricos en humus y pH de 6 a 7 (Childers *et al.*, 1959; Soto 2003; Ranadive, 2005); son preferibles aquellos terrenos que reciban la luz del sol por la mañana y no por la tarde, ya que el sol de la tarde es más intenso y puede llegar a quemar la planta (Sánchez, 1992; Curti, 1995; Soto, 2003).

#### 4.11 Importancia del cultivo de la vainilla

La vainilla es originaria de México (Región Totonacapan) y Centroamérica, es uno de los géneros dentro de la familia de las Orchidaceae que produce frutos comestibles, su clasificación taxonómica, es descrita en el cuadro 1. La vainilla carece de una raíz pivotante, genera sus raíces en el nivel de entrenudos, donde se encuentran los meristemas axilares y posee un sistema radical fasciculado, el cual tiene un rango exploratorio no mayor a 30 cm de profundidad, que se desarrolla entre la materia orgánica. Además, posee raíces adventicias utilizadas como sujetadoras y después de su crecimiento descendente, en busca de materia orgánica, dichas raíces absorben nutrientes (Reyes *et al.*, 2008). El fruto de vainilla es un bejuco epífito de flores amarillas verdosas, su fruto es capsular, en forma de ejote, mide de 15 a 20 cm de largo y 1 cm de ancho aproximadamente, contiene muchas semillas y es la parte de la planta que le dio el nombre (Soto, 2009).

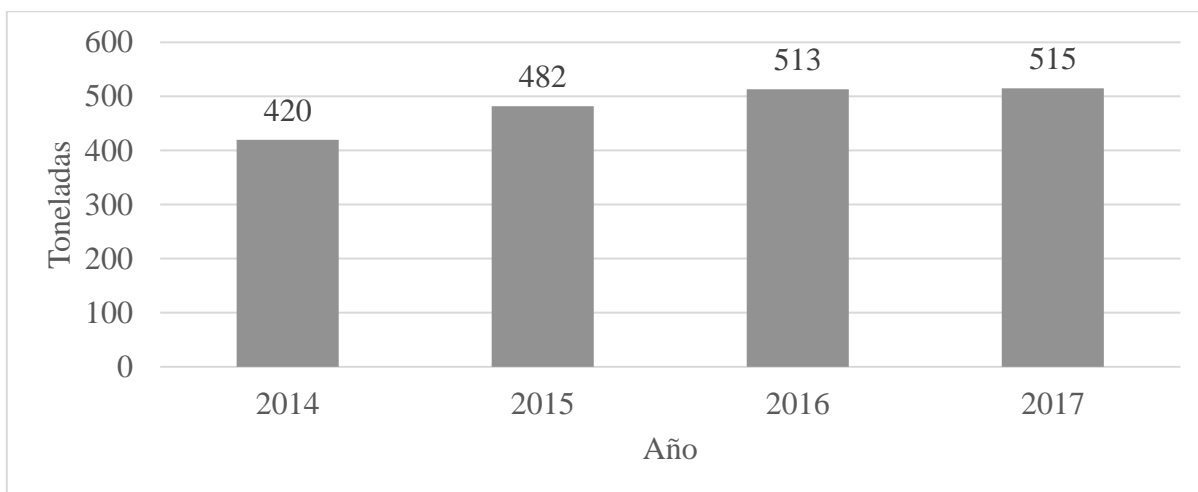
**Cuadro 1. Clasificación botánica de la vainilla**

Clasificación	Nombre
Reino	Plantae
Grupo	Espermatofita
Clase	Angiosperma
Subclase	Monocotiledónea
Serie	Diapétalas
Orden	Ginandrales
Suborden	Neocieas
Familia	Orchidaceae
Subfamilia	Pleonadras
Tribu	Ofrideas
Género	<i>Vainilla</i>
Especie	<i>Planifolia</i>

Fuente: Montoya (1963)

#### 4.11.1 Producción nacional de vainilla

La producción nacional en México de vainilla ha aumentado en los últimos años, en el año 2017 se obtuvo una producción de 515 toneladas (FAOSTAT, 2019). En la figura 1 se observa la variación de la producción de 2014-2017.



**Figura 1. Producción nacional de vainilla.**

#### 4.12 Etapas de crecimiento del cultivo de vainilla

Las etapas de crecimiento del cultivo de *Vanilla planifolia* G. Jackson y su determinación dependen del manejo cultural y del tipo de encauzamiento de las guías en crecimiento. Por lo que la longevidad del cultivo depende del mantenimiento y puede ser de 3 a 10 años, las plantaciones comerciales en México tienen una vida promedio de 5 años, de los cuales los primeros tres son para el desarrollo vegetativo y el resto para la producción (Martínez *et al.*, 2007).

En las plantaciones de vainilla hay una alta incidencia de problemas fitosanitarios. Por lo tanto, cada año se resiembra aproximadamente 30 % de la plantación para mantener la densidad de población de 2,280 a 10,000 plantas ha<sup>-1</sup> (Curti, 1995; Sánchez, 1992).

De acuerdo con la descripción realizada por Allen, *et al* (1998) las diversas etapas de desarrollo vegetativo en los cultivos y en este caso adaptadas para la vainilla por Kelso, *et al.*, (2012) son las siguientes:

Etapa inicial: El intervalo de 200 días después de la siembra (DDS), necesario para que la planta tenga elongación mínima de 1.5 m, y representa aproximadamente 10 % del ciclo de cultivo.

Etapa de desarrollo del cultivo: Entre los 200 DDS y el inicio de floración, o hasta alcanzar la cobertura efectiva completa.

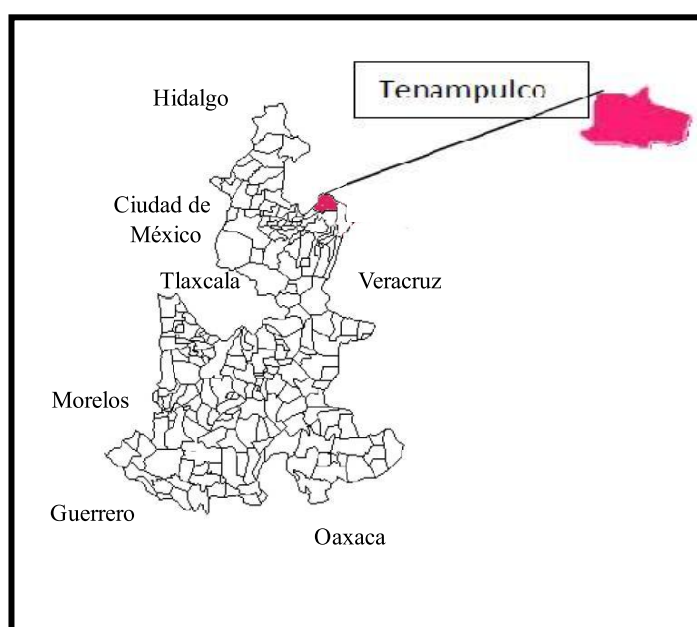
Etapa de mediados de temporada: Del inicio de la floración al inicio de la madurez del fruto, indicada generalmente por el amarillamiento del extremo distal del fruto.

Etapa final: Desde el inicio de la madurez de los frutos hasta la cosecha o su dehiscencia.

## V. MATERIALES Y METODOS

### 5.1 Ubicación del sitio experimental

El presente trabajo se realizó en el banco de germoplasma de vainilla de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, ubicado en el municipio de Tenampulco Puebla (Figura 2), con coordenadas geográficas de 20° 11' 52.23'' de latitud norte y 97° 22' 06.09" de longitud oeste, a una altura de 240 m.s.n.m., su clima predominante es cálido-húmedo con abundantes lluvias en verano.



**Figura 2. Ubicación del sitio experimental**

### 5.2 Establecimiento del módulo experimental.

Se construyó un módulo experimental, el cual tuvo las siguientes características.

- a) Se instaló un lisímetro de drenaje colocado sobre una base construida de un material altamente resistente.
  
- b) Un contenedor, el cual sirvió para contener el sustrato y los esquejes de vainilla sembrados, fue construido con chapas de acero inoxidable con dimensiones de 1.52 m de



largo, 1.22 m de ancho y 0.29 m de profundidad, teniendo un área de 1.85 m<sup>2</sup>. Se determinó que el tamaño y forma estaría en función de los criterios de establecimiento del cultivo en campo; en vista que el sistema radical se desarrolla en los primeros 10 cm (Hernández y Sánchez, 2011), y que el cultivo se establece en hileras, se optó por un contenedor de forma rectangular con una profundidad mayor a 10 cm para proporcionar el espacio suficiente para el desarrollo de las raíces y un tamaño de largo y ancho que permitió el establecimiento de seis esquejes de vainilla cada uno en su última etapa fenológica como se muestra en la figura 3.



**Figura 3. Lisímetro de drenaje**

c) Tutorio: Se instaló un sistema de tutorio que fungió como medio de anclaje de las raíces adventicias de las plantas a establecer, construido de un material ligero, medianamente resistente y con un tamaño de longitud no mayor a 2 metros (Kelso, 2012).

d) Sombreo y techado: Se instaló un módulo tipo capilla; el techado cubierto al interior por malla sombra al 50% y al exterior con una cubierta plástica color blanca calibre 720, la estructura del techo de PTR y los postes de acero, con dimensiones de 5.5 m de ancho, 6.0 m

de largo, 2.3 m de altura hasta el inicio de la capilla y 3.3 m de altura total obteniendo una superficie aprovechable de 33 m<sup>2</sup>. Se colocó la cubierta plástica funcionando como una cortina en casos de lluvias o corrientes de aire por el barlovento.

e) Sistema para la obtención de datos: se instalaron sensores de humedad de la marca HOBO U 30 STATION se mantuvo un rango de humedad de 35 a 45 % de humedad registrando datos a un intervalo de cada 5 minutos diariamente desde la floración hasta la cosecha de los frutos la cual duro un periodo de 274 días.

### **5.3 Sustrato**

Para obtener el sustrato se elaboró composta tipo bocashi con la técnica recomendada por la FAO (2011) a partir de la mezcla de estiércol de ganado bovino, tierra de monte, hojarasca, y levadura (microorganismos) durante 6 meses, realizando una aireación cada semana, hasta obtener abono listo para su incorporación. El bocashi se tamizó para eliminar partículas mayores a 0.5 mm y para homogeneizar la relación humedad-aire (Morales y Casanova, 2015), por lo que se mezcló con arena local tamizada para eliminar partículas mayores que 2.0 mm (gravas) y las menores que 0.05mm (limos y arcillas). La fracción arenosa se sumergió en cloro al 1% por un día y finalmente se lavó con cloro con el fin de eliminar el exceso de carbonatos de calcio (Segura *et al.*, 2008). Se realizó una mezcla homogénea (sustrato) de cincuenta kilogramos, en una proporción con base en peso de 9:1 bocashi-arena (Rechy, 2018), con las propiedades fisicoquímicas adecuadas (Cuadro 2), a cada tutor se le adicionaron 10 kg de sustrato, que se extendieron de manera homogénea en un área de 100 cm de diámetro (0.79 m<sup>2</sup>) y profundidad de 10 cm sobre la superficie del suelo natural, para cada tutor.

## Cuadro 2. Características fisicoquímicas del sustrato

Característica fisicoquímica	Unidad
Capacidad de retención de humedad (CRH)	57 %
Capacidad de campo (CC)	54 %
Punto de marchitez permanente (PMP)	41 %
Densidad aparente (Da)	0.6 mg·m <sup>-3</sup>
Potencial de hidrogeno (pH)	8
Conductividad eléctrica (CE)	3.4 dS
Capacidad de intercambio catiónico	64.13 meq·L <sup>-1</sup>
Materia orgánica	12.98 %
Relación carbono nitrógeno	11.77 C/N
Espacio poroso total (EPT)	67 %
Capacidad de aireación (CA)	10 %
Agua fácilmente disponible	17 %
Agua de reserva (AR)	6 %
Agua difícilmente disponible (ADD)	31 %

Fuente: Rechy (2018)

### 5.3.1 Curva característica de humedad del sustrato

Mediante la ayuda de una termobalanza de la marca OHAUS modelo MB120 se determinó el contenido de humedad inicial en el sustrato del lisímetro de drenaje; para ello se tomaron dos muestras de suelo de 10 gramos aproximadamente (Figura 4). El tiempo de espera vario dependiendo de la muestra. Se obtuvo la humedad antes y después saturar el suelo a capacidad de campo.



**Figura 4. Determinación de la humedad del sustrato con termobalanza**

## **5.4 Variables evaluadas**

### **5.4.1 Variables vegetativas**

Longitud de rebrotes (LR): las mediciones se realizaron con una cinta métrica graduada en centímetros cada ocho días, a partir de que el esqueje genero su primer crecimiento apical durante un periodo de 274 días.

Diámetro de rebrotes (DR): las mediciones se realizaron con un vernier en la parte media del tallo cada ocho días, a partir de que el esqueje genero su primer crecimiento apical durante un periodo de 274 días.

Longitud de frutos (LF): las mediciones se llevaron a cabo con una regla métrica graduada en centímetros cada quince días, a partir de los 15 días después de la polinización del fruto.

Diámetro de frutos (DF): las mediciones se llevaron a cabo con un vernier en la parte media del fruto cada quince días, a partir de los 15 días después de la polinización del fruto.

#### 5.4.2 Variables meteorológicas

Para determinar las necesidades hídricas en el cultivo de vainilla, se utilizó una estación meteorológica inalámbrica Vantage Pro 2 Plus marca Davis (Figura 5). Para obtener la evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>) con la ecuación Penman-Monteith se utilizaron los registros de temperatura, precipitación y humedad relativa que proporcionó dicha estación meteorológica.

- Temperatura: se registraron las temperaturas diarias cada 5 minutos. Las lecturas fueron integradas a nivel diario para fines de cálculo posterior.
- Precipitación: se calculó el acumulado mensual a partir de datos diarios.
- Humedad relativa: se obtuvieron promedios diarios y mensuales.



**Figura 5. Instalación de la estación meteorológica**



### 5.5 Estimación del coeficiente de cultivo (Kc) en la etapa de mediados de desarrollo y en la etapa final.

La etapa a mediados de desarrollo y etapa final comprendió desde los 850 días hasta los 1120 días después de la siembra (DDS). Para obtener el coeficiente de cultivo en estos periodos se determinó la evapotranspiración de referencia (ET0) y evapotranspiración real (ETr).

Para calcular la ET0 se utilizó la ecuación 1 de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) y se realizaron integraciones a nivel mensual como periodo mínimo de análisis:

$$ET0 = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \dots \dots \dots \text{Ec. (1)}$$

Donde:

- ET0: evapotranspiración de referencia [mm día<sup>-1</sup>]
- R<sub>n</sub>: radiación neta en la superficie del cultivo [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>]
- G: flujo del calor del suelo [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>]
- T: temperatura media del aire a 2 m de altura [°C]
- u<sub>2</sub>: velocidad del viento a 2 m de altura [m s<sup>-1</sup>]
- e<sub>s</sub>: presión de vapor de saturación [kPa]
- e<sub>a</sub>: presión real de vapor [kPa]
- e<sub>s</sub> - e<sub>a</sub>: déficit de presión de vapor [kPa]
- Δ: pendiente de la curva de presión de vapor [kPa°C<sup>-1</sup>]
- γ: constante psicrométrica [kPa°C<sup>-1</sup>]

Por lo que respecta a la ETr, resulta de la ecuación de balance usada en lisímetros volumétricos (Puppo *et al.*, 2019) modificada al considerar que el cambio en humedecimiento del suelo es cercano a 0, debido a que se buscó mantener el sistema a capacidad de campo, no hubo contribuciones de humedad por factores externos al riego y, tampoco salidas diferentes a la evapotranspiración y el drenaje, por lo que la ecuación 2, quedó como sigue:

$$ETr = I - D \dots\dots\dots Ec. (2)$$

Donde:

ETr: evapotranspiración real unitaria mensual [mm]

I: lámina unitaria de riego mensual [mm]

D: lámina unitaria de drenaje mensual [mm]

Puesto que el modulo experimental se encuentra bajo techo en total protección de los eventos de lluvia, la única fuente de humedad en el suelo fue el agua de riego y, las salidas fueron la evapotranspiración y la lámina de drenaje. Debido a las variaciones en la fecha de riego y drenaje, los valores de lámina de riego y drenaje, fueron integrados a nivel mensual. Los valores mensuales de Kc fueron calculados con los valores mensuales de ET0 y ETr, a partir de la ecuación 3:

$$Kc = \frac{Etr}{Eto} \dots\dots\dots Ec. (3)$$

Donde:

Kc= coeficiente de cultivo mensual en la etapa final

ETr= evapotranspiración real mensual del cultivo en la etapa final (mm)

ET0= evapotranspiración de referencia mensual en la etapa final (mm)

Con los valores de ET0, ETr y Kc mensuales, se hicieron estimaciones a nivel diario dividiendo los valores de ET0 y ETr considerando el número de días de cada mes para, finalmente, calcular el estimado diario.

## VI. RESULTADOS Y DISCUSION

### 6.1 Estación lisimétrica de drenaje

La estación lisimétrica de drenaje fue instalada en la parte central del módulo experimental en el banco de germoplasma de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla el área del lisímetro correspondió a 1.85 m<sup>2</sup> con dimensiones de 1.52 m de largo, 1.22 m de ancho y 0.29 m de profundidad (Figura 6).



Figura 6. Sitio experimental. a) Módulo experimental, b) Estación lisimétrica de drenaje.

### 6.2 Variables vegetativas de control

#### 6.2.1 Frutos

Una de las variables analizadas para conocer el desempeño del experimento, consistió en la estricta vigilancia de las variables morfológicas de la producción de vainilla. Se obtuvieron nueve frutos de vainilla, que fueron fecundados en fecha variable entre el 06 y el 19 de abril de 2019 (Cuadro 3).



La longitud promedio de los frutos fue de 19.67 cm, donde la mínima longitud fue alcanzada por el fruto fecundado el día 19 de abril (17 cm); aunque en esta métrica parece quedarse rezagado con respecto al resto de los frutos obtenidos, el resultado se encuentra por encima de la mínima exigida en la NOM-182-SCFI-2011(DOF, 2011), la cual lo establece en 15 cm, mientras que no existen aparentes restricciones en cuando al diámetro del producto.

Resulta interesante observar que, en cuanto a la longitud, el máximo fue obtenido en el fruto polinizado el día 06 de abril (primero) y mínimo en el del día 19 de abril (último); también el diámetro máximo se obtuvo en el fruto polinizado en primera instancia, en tanto que el mínimo no tiene correspondencia, tal cual se mostró con respecto a la longitud.

**Cuadro 3. Características morfológicas de frutos de vainilla**

<b>Fecha de fecundación</b>	<b>Longitud (cm)</b>	<b>Diámetro (cm)</b>	<b>Tiempo de elongación (Días)</b>	<b>Tiempo de engrosamiento (Días)</b>
06/04/19	24	1.5	75	120
08/04/19	19	1.3	120	90
09/04/19	20	1.3	60	75
11/04/19	21	1.3	60	45
12/04/19	18	1.2	75	45
16/04/19	20	1.3	120	120
17/04/19	20.5	1.1	120	60
18/04/19	17.5	1.1	45	45
19/04/19	17	1.2	45	120
<b>Promedio</b>	<b>19.67</b>	<b>1.26</b>	<b>80</b>	<b>80</b>

Los resultados mostrados en el cuadro 3, muestran el éxito en términos productivos del experimento establecido puesto que todos los frutos, estuvieron por encima de lo indicado por la Norma Oficial Mexicana.

La longitud promedio de los frutos, estuvo por encima del máximo reportado en México en la Huasteca Potosina donde la longitud máxima obtenida fue de 19.2 cm (Cervantes

Castillo *et al.*, 2018) y, en Tecolutla, Veracruz con longitud máxima de 16.4 cm (Hernández-Hernández *et al.*, 2019); incluso, están por encima de lo reportado en Australia, donde se obtuvieron longitudes entre 18 y 19 cm (Van Dyk *et al.*, 2014).

De este modo, los frutos pueden considerarse de primera categoría en la totalidad de los casos (Sujatha & Bhat, 2010); de conformidad con los resultados, se espera un alto potencial productivo si se atiende un sistema de producción en condiciones similares al que aquí se ha analizado.

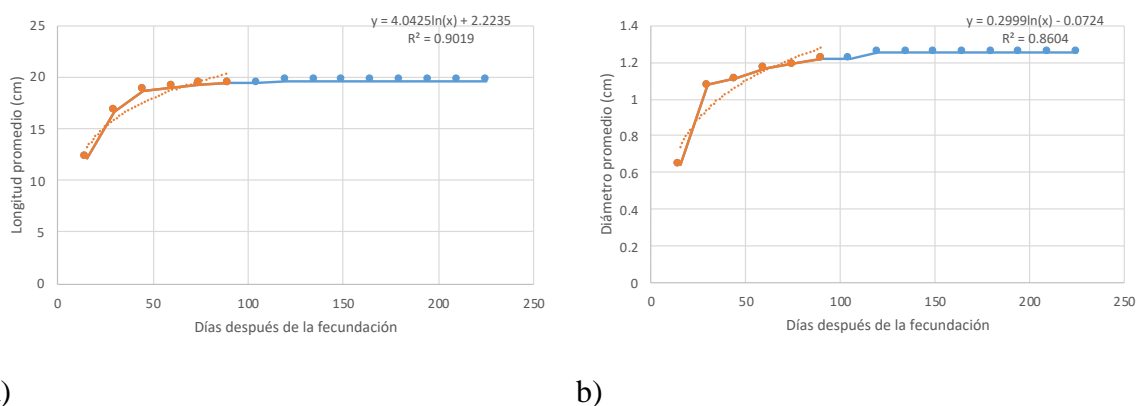
El diámetro promedio obtenido en los frutos cosechados fue de 1.26 cm, donde los mínimos valores fueron encontrados en aquellos frutos fecundados en las tres últimas fechas, en tanto que los mayores valores se encontraron entre los que fueron fecundados primero, siendo el máximo, al igual que en el caso de la longitud, en el que fue fecundado el día 06 de abril.

Los valores promedio aquí obtenidos, se encuentran por encima de las máximas obtenidas en Australia que registraron 1.2 cm de diámetro al corte (Van Dyk *et al.*, 2014) y, muy por delante de los resultados de 0.86 cm observados en la Huasteca Potosina (Cervantes *et al.*, 2018) y de 0.83 cm en Tecolutla (Hernández-Hernández *et al.*, 2019); se observa que el diámetro mínimo aquí reportado aventaja por 28% a la máxima reportada en México hasta antes de este estudio.

Al observar los detalles del crecimiento longitudinal y diametral de los frutos de vainilla, se encontró que, en ambos casos, en promedio a los 80 días se alcanzó tanto la máxima longitud como el máximo grosor de los frutos, tiempo a partir del cual detuvo su crecimiento físico para centrarse en otras actividades productivas como la concentración de elementos que dan calidad en la producción. El tiempo mínimo de crecimiento para ambos casos fue de 45 días, que produjo frutos por encima de las medias reportadas en México (Cervantes *et al.*, 2018), muy próximo a lo reportado para producción en otras latitudes (Sujatha & Bhat, 2010; Van Dyk *et al.*, 2014).

Es preciso notar que también hubo periodos de elongación y de engrosamiento prolongados, pues se tuvieron registros de que algunos frutos continuaron su crecimiento hasta los 120 días, incluso el fruto polinizado el 16 de abril, detuvo ambos crecimientos hasta los 120 días. El mejor fruto fue aquel que priorizó el crecimiento longitudinal hasta los 75 días y, con posterioridad, dedicó la energía para engrosamiento.

Los resultados obtenidos sobre el crecimiento, en los primeros 90 días (no hay datos a los 80 días que es el promedio), se pueden modelar a través de una función logarítmica (Figura 7) con ajuste  $R^2$  de 0.9 para el caso del crecimiento longitudinal como función del tiempo y de 0.86 para el caso del engrosamiento de frutos; este ajuste se hace hasta antes de entrar a la fase lineal, a partir del cual la planta enfoca sus energías para adquirir calidad en la producción.



**Figura 7. Modelación del crecimiento. a) Longitudinal, b) Engrosamiento**

Otro de los parámetros considerados para evaluar la producción es el peso a la cosecha (Cuadro 4), de la producción del experimento de este estudio. El peso promedio de los frutos fue de 18.22 g con un rango entre 14 y 26 g, puesto que el peso tiene una relación directamente proporcional con la longitud de los frutos, al analizar conjuntamente la longitud y el peso, se encontró un ajuste lineal con un  $R^2$  de 0.95

Los resultados de peso se encuentran por encima de lo reportado en Australia (Van Dyk *et al.*, 2014), donde encontraron pesos de entre 10 y 16 g por fruto. El tiempo promedio desde la fecundación y hasta la cosecha (28 de noviembre) fue de 223 días, similar a lo reportado en México (Cervantes *et al.*, 2018) y dentro del rango reportado en otras latitudes (Van Dyk *et al.*, 2014).

**Cuadro 4. Peso y tiempo de maduración de frutos de vainilla**

<b>Fecha de fecundación</b>	<b>Peso fresco (g)</b>	<b>Tiempo de maduración (Días)</b>
06/04/19	26	230
08/04/19	18	228
09/04/19	18	227
11/04/19	20	225
12/04/19	16	224
16/04/19	19	220
17/04/19	18	219
18/04/19	15	218
19/04/19	14	217
<b>Promedio</b>	<b>18.22</b>	<b>223.11</b>

La información sobre crecimiento longitudinal y diametral fue obtenida, en todos los casos, a partir de los 15 primeros días después de la fecundación y, a partir de ahí, las subsecuentes lecturas fueron al mismo intervalo temporal. Por ello, la etapa de mayor crecimiento de los frutos de vainilla transcurre entre los meses de abril (primera lectura) y el mes de mayo, a medida que pasa el tiempo va decreciendo hasta estabilizarse en el mes de julio con el debido desfase entre los frutos debido a la diferente fecha de fecundación individual.

### **6.2.2 Brotes vegetativos**

La dinámica de la aparición y desarrollo de los brotes sirve como indicativo del vigor de las plantas, así como del estado de salud que guarda un experimento. Los brotes vegetativos, al igual que los frutos, tuvieron orden de aparición variable a lo largo de la etapa experimental (cuadro 5). Se observa que la aparición de los brotes se da a lo largo del periodo del experimento con diferentes temporalidades en ocurrencia y crecimiento.

La tasa de crecimiento promedio es de 1.94 cm por día, aunque no se encontraron referencias en la literatura para comparar estos resultados. Se observa que la mayor tasa de elongación se encuentra entre los primeros tres brotes (promedio de 23.18 mm/día), en tanto que los menores valores (promedio de 13.65 mm/día) están entre los tres últimos brotes que surgieron.

El diámetro de los brotes tuvo variaciones de conformidad con la longevidad, siendo los primeros en surgir los que alcanzaron los valores más altos, en tanto que los últimos (surgidos entre octubre y noviembre), registraron los más bajos diámetros como resultado del tiempo de actividad fisiológica de la planta.

**Cuadro 5. Características morfológicas de los brotes de vainilla**

<b>F_N</b>	<b>D_B (DJ)</b>	<b>P_Obs (Días)</b>	<b>Long (cm)</b>	<b>Diam (cm)</b>	<b>T_C (cm/día)</b>
06/06/09	157	208	485	1.5	2.33
17/06/09	168	197	477	1.4	2.42
20/07/19	201	164	361	1.3	2.20
30/07/19	211	154	334	1.4	2.17
02/08/19	214	151	302	1.4	2.00
14/08/19	226	139	251	1.3	1.81
23/08/19	235	130	298	1.4	2.29
07/09/19	250	115	230	1.4	2.00
08/10/19	281	84	129	1	1.54
25/10/19	298	67	90	0.9	1.34
15/11/19	319	46	56	0.7	1.22

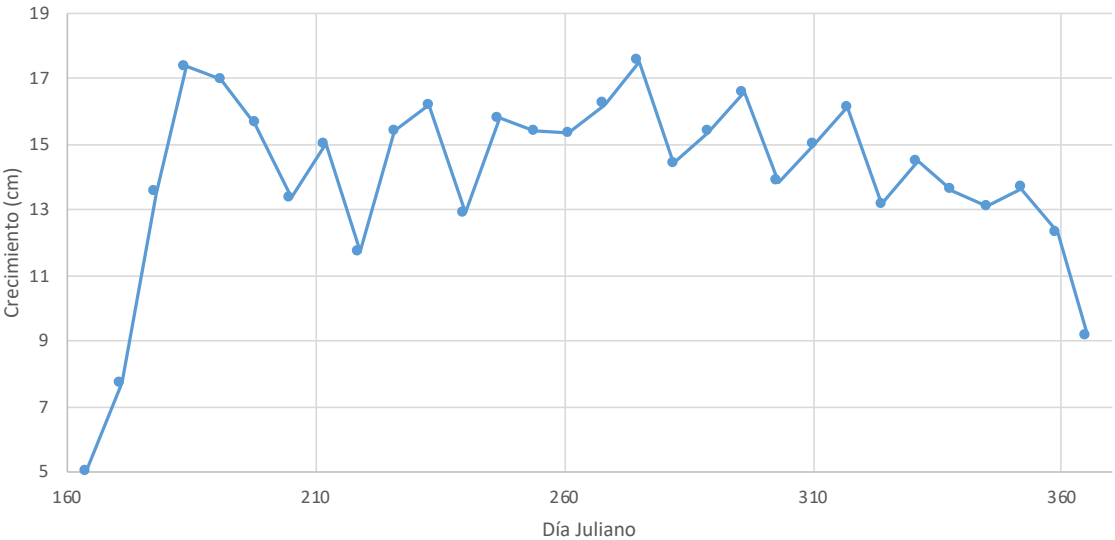
**NOTA:** F\_N, Fecha de nacimiento; D\_B, día del brote; DJ, día juliano; P\_Obs, Periodo de observación; Long, longitud total; Diam, Diámetro; T\_C, Tasa de crecimiento diario.

Para ampliar el análisis de los resultados mostrados por el cuadro 5, se hizo un análisis de la dinámica de crecimiento durante el tiempo del experimento (Figura 8). Se observa que a lo largo del año existen tasas de crecimiento variables, puesto las mayores se ubican entre el Día Juliano (DJ) 164 y 191 con alta pendiente positiva, debido al orden de aparición de los brotes, en esas fechas solo se contó con información de dos brotes. La información fue integrada para todos los brotes, considerando el incremento de longitud entre fechas de medición.

El brote más longevo, el primero, con 208 días de observación (siete meses aproximadamente), creció a un ritmo de 2.33 cm/día, para una longitud total de 4.85 m, muy por delante de los resultados observados en la India, en un experimento con vainilla bajo riego, que durante un lapso de nueve meses entre octubre y julio creció una longitud de 2.43 m (Sujatha & Bhat, 2010); los resultados de la India, son equiparables a lo que aquí se obtuvo

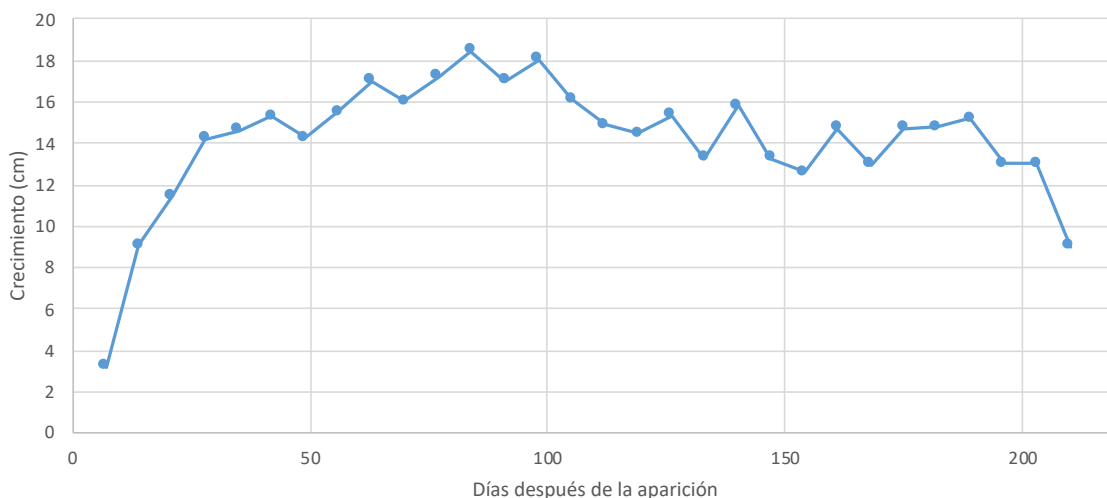
en el octavo brote (Cuadro 5), que en 115 días, alcanzó 2.3 metros de longitud que creció a una tasa de 2 cm/día. Por lo anterior, los resultados de crecimiento de brotes están muy por delante de lo observado en la India tanto en longitud como en tiempo, lo que habla de la eficiencia energética y productividad del agua.

Durante las últimas fechas del periodo experimental, se observó una baja tasa de crecimiento principalmente en las tres últimas, donde se tuvo información de todos los brotes entre los DJ 352 y 365. El resto de los días entre el DJ 212 y el 331, se puede apreciar un comportamiento con altibajos, pero con pendiente cercana a cero.



**Figura 8. Crecimiento temporal de brotes de vainilla**

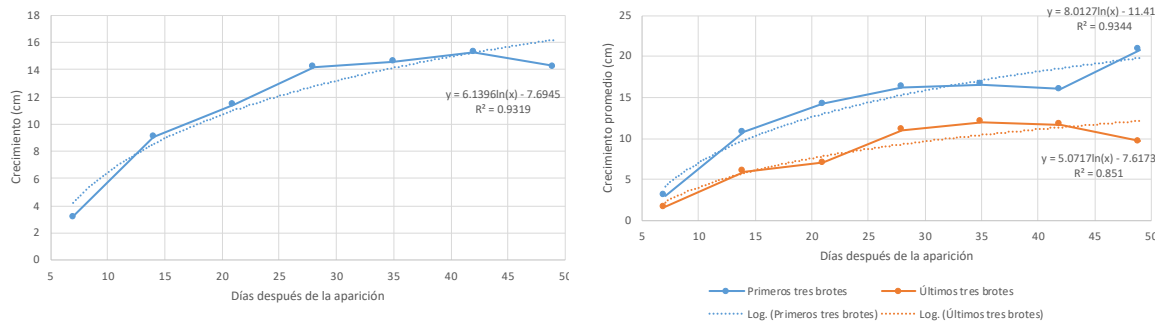
Para expresar de mejor manera los datos contenidos en la figura 8, se decidió analizarlos en función de los días de aparición de los brotes (Figura 9), donde se ordenaron de tal manera que se analizó el tiempo transcurrido desde la aparición y su correspondiente tasa de crecimiento sin importar la fecha en que ocurrió la aparición del brote. Los resultados mostraron información de todos los brotes en los primeros 49 días, en tanto que solo el primer brote (el más longevo en observación), presentó información hasta los 210 días después de la aparición.



**Figura 9. Tasa de crecimiento diaria**

La figura 9, muestra un comportamiento similar a lo mostrado en la figura 8, aunque se trata de casos totalmente diferentes. Mientras que la figura 8 muestra la tasa de crecimiento durante el año, la figura 9 muestra la tasa de crecimiento a partir de la emergencia del brote.

De lo mostrado por la figura 9 se puede observar que, en etapas tempranas, los brotes tienen un crecimiento intenso de tal manera que se puede modelar por una ecuación exponencial con  $R^2$  de 0.94 (figura 10a), mientras que los brotes más longevos tienen una baja tasa de crecimiento a medida que se trascurre el tiempo.



a)

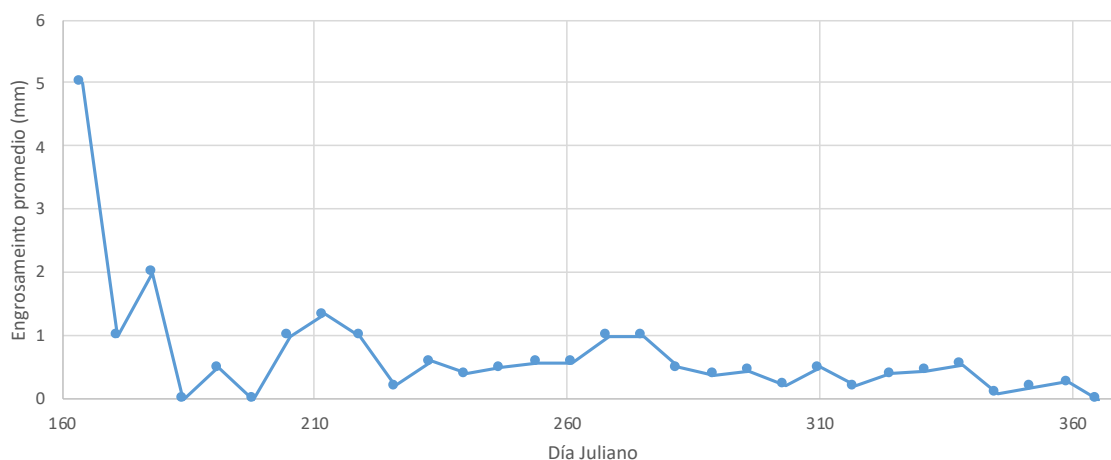
b)

**Figura 10. Tasa de crecimiento en los primeros 49 días**



Un análisis más detallado de los primeros tres brotes y de los últimos tres brotes (Figura 10b), encontró que la tasa de crecimiento para los brotes que surgieron durante junio y julio fue de 14 cm/día; por otro lado, los brotes que surgieron entre octubre y noviembre, tienen una tasa mucho menor de solo 8 cm/día, esto es 43% menos con respecto a los que surgen a finales de la primavera y principios del verano.

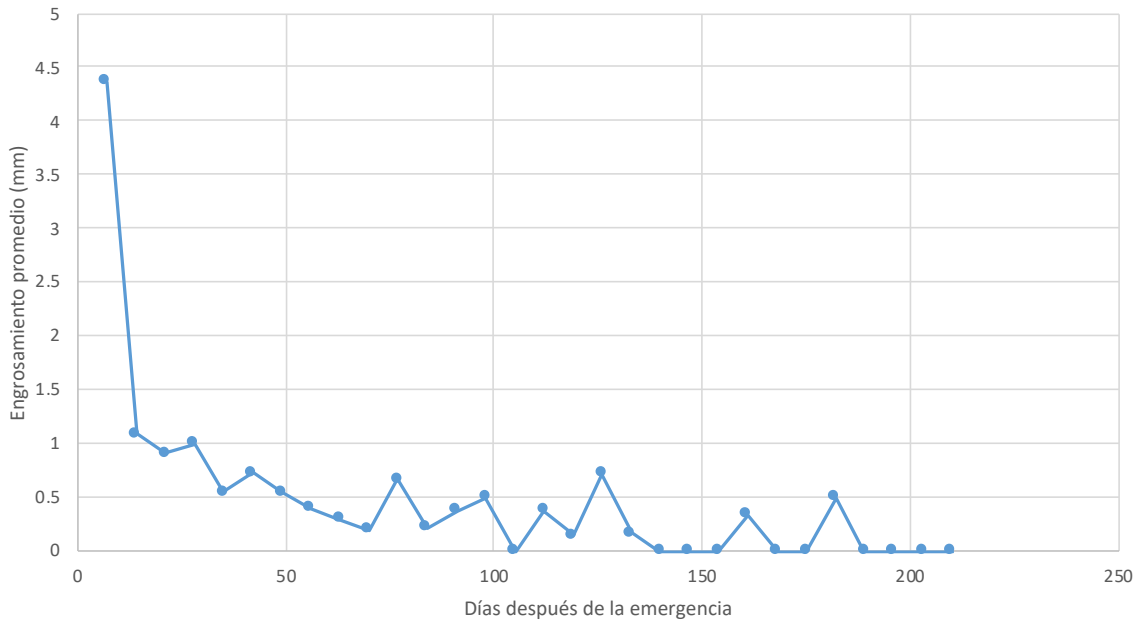
Con respecto al engrosamiento, como ya se apuntaba, tuvo variaciones en el diámetro final reportado, por ello se hizo un análisis con base en el seguimiento temporal de la tasa de engrosamiento independiente de la fecha en que apareció el brote (Figura 11), se observa que la tasa de crecimiento a lo largo del año tiene variaciones importantes, resaltando los incrementos que reporta en el mes de julio (DJ 205-2019), que posteriormente decae hasta volver a incrementar en el mes de septiembre (DJ 261-275).



**Figura 11. Engrosamiento temporal**

Debido a que lo mostrado por la figura 11 está influenciado por la tasa de alto crecimiento inicial de los brotes, se realizó un ejercicio de análisis de las tasas de crecimiento por temporalidad de aparición (Figura 12), donde se reporta la obtención de información a cada semana en el eje de las abscisas.

Se observa (Figura 12) que la tasa de crecimiento promedio en todos los casos, disminuye de manera importante en las primeras tres semanas para que, con posterioridad, estabilizarse alrededor de los 50 días después de la emergencia.



**Figura 12. Tasa de engrosamiento por temporalidad de emergencia**

De manera aproximada, a los 140 días después de la aparición de los brotes, cesa el crecimiento radial, por lo que se considera que alcanzan su máximo; aunque solo se tuvo información de tres brotes hasta los 140 días, se observa que más allá de esa fecha la tasa es prácticamente nula, mientras que de los 100 a los 150 días, salvo leves anomalías, la tasa de crecimiento es incipiente.

### 6.3 Variables climáticas de control

Los análisis de la temperatura se presentan (Cuadro 6) muestran que existen rangos extremos de temperatura entre los meses analizados. La mayor Amplitud Térmica absoluta, se tiene en el mes de octubre, donde hay una mínima de 11.20 °C como resultado de la disminución en el calentamiento debido a la declinación solar y nubosidades, mientras que

entre los días despejados la máxima fue de 35.7, lo que hace a octubre con las temperaturas más extremas, por encima de la media de otros meses. Por otro lado, el mes con las temperaturas menos extremas fue julio (seguido de cerca por septiembre), con 17.30 °C. La temperatura absoluta más baja se registró en el mes de noviembre con 10 °C, en tanto que la más elevada, fue una que se registró en el mes de mayo con 41°C.

Con respecto a la temperatura mínima media, el mes más frío resultó ser diciembre con una temperatura mínima promedio de 16.15°C y el más cálido agosto con una temperatura máxima promedio de 37.27 °C. Por otro lado, el mes con la temperatura media mensual más alta fue agosto con 30.46 °C y el mes más frío diciembre con 20.49. La amplitud térmica promedio más alta fue en abril y la más baja en noviembre.

#### **Cuadro 6. Detalles del registro de temperatura**

<b>Mes</b>	<b>Tm_ A</b>	<b>TM_ A</b>	<b>A_T_A</b>	<b>Tm_Me d</b>	<b>TM_Med</b>	<b>TM_M</b>	<b>A_T_Me d</b>
Abril	12.80	36.30	23.50	19.85	32.35	26.10	12.49
Mayo	22.20	41.00	18.80	24.17	36.13	30.15	11.96
Junio	21.60	40.00	18.40	25.07	35.46	30.27	10.39
Julio	20.90	38.20	17.30	23.35	35.54	29.45	12.20
Agosto	20.90	39.70	18.80	23.65	37.27	30.46	13.61
Septiembre	21.10	38.80	17.70	22.88	34.84	28.86	11.96
Octubre	11.20	35.70	24.50	20.94	30.53	25.73	9.59
Noviembre	10.00	30.40	20.40	18.16	25.62	21.89	7.46
Diciembre	11.60	30.20	18.60	16.15	24.83	20.49	8.68

**NOTA:** Unidades en °C. Tm\_A, Temperatura mínima absoluta; TM\_A, Temperatura máxima absoluta; A\_T\_A, Amplitud Térmica absoluta; Tm\_Med, Temperatura mínima media; TM\_Med, Temperatura máxima media; TM\_M, Temperatura media mensual; Amp\_T\_Med, Amplitud térmica media

El complemento de los datos descriptores del clima en el lugar (Cuadro 7) indica que la precipitación en el periodo de análisis fue de 1,442.2 mm, con el mes de abril como el más

lluvioso, y el mes de diciembre el mes más seco. Al dividir la precipitación en cuartiles, se encuentra que en el cuartil más bajo es el de 0-360.5 mm; los meses de julio, septiembre, noviembre y diciembre, quienes juntos suman 307.09 mm de lluvia acumulados, sin embargo, solo el mes de abril, registró mayores valores que el cuartil inferior y que todos estos meses juntos sumados.

Es importante tomar en cuenta que los meses de julio, septiembre y diciembre apenas juntan 150 mm de precipitación en total, la mitad del último cuartil y representan el 33% del periodo experimental. De aquí, es preciso observar que los meses de julio y septiembre se encuentran entre los meses con menor precipitación, lo anterior podría parecer irrelevante; sin embargo, se trata del inicio y final del verano, el periodo de lluvia más intenso dentro del año. La alta precipitación en el mes de abril (primavera) y los bajos registros durante el verano hablan claramente de un año particularmente atípico, por lo que sería importante analizar con mayor detalle la información de los meses en análisis.

#### **Cuadro 7. Información meteorológica complementaria mensual**

<b>Mes</b>	<b>Pcp (mm)</b>	<b>H_R (%)</b>	<b>V_V (m/s)</b>	<b>H_I (horas)</b>	<b>Rad (MW/m<sup>2</sup>/d)</b>
Abril	396.24	74.14	1.28	6.70	19.64
Mayo	111.76	80.52	1.25	7.00	20.41
Junio	274.32	76.19	1.16	7.20	20.68
Julio	45.97	80.23	0.44	7.20	20.60
Agosto	106.68	77.62	0.42	7.00	20.10
Septiembre	74.42	81.07	0.28	6.70	18.75
Octubre	246.13	87.64	0.15	6.20	16.37
Noviembre	156.21	90.91	0.07	6.00	14.38
Diciembre	30.48	87.56	0.06	6.00	13.54

**NOTA:** Pcp, precipitación; H\_R, Humedad Relativa; V\_V, velocidad del viento; H\_I, Horas de insolación; Rad, radiación.

Los registros de precipitación del cuadro 7, muestran la existencia de un período de canícula o sequía dentro del periodo húmedo. En el mes de junio (274.32 mm) inicia el año hidrológico en los climas con lluvias en verano, como es el caso, y la precipitación es elevada; sin embargo, hay un descenso importante en el mes de julio (45.97 mm) que lo hace el segundo mes más seco dentro del periodo de análisis. Si se observa con mayor detenimiento el periodo de lluvias en el verano (inicio en el 21 de junio), se observa que se registró muy baja cantidad, por debajo del cuartil más bajo.

Un verano prácticamente seco, donde las lluvias estuvieron concentradas en el final de la primavera y el principio del otoño, esta condición resulta de particular importancia para la agricultura de temporal, y en general para las plantas de crecimiento veraniego, puesto que altera el ritmo normal de la curva de crecimiento, desarrollo, floración y senescencia (Allen *et al.*, 1998).

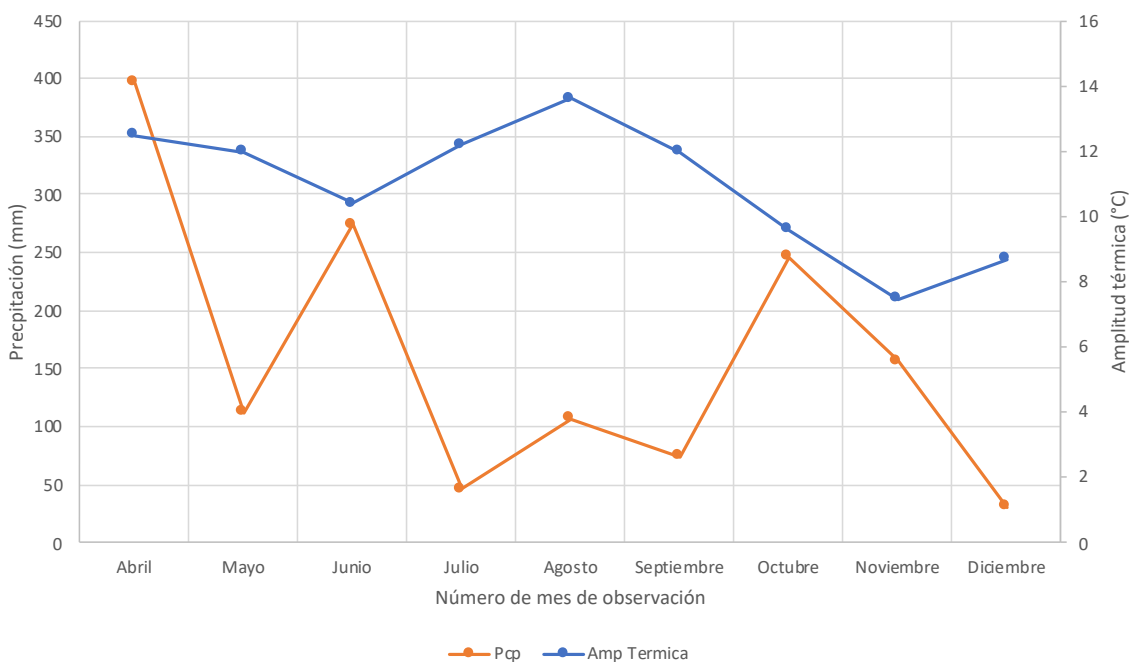
Siguiendo el procedimiento indicado para el cálculo de la anomalía de la precipitación (OMM, 2012), se construyó la figura 13, aunque la recomendación original es para ciclos anuales, se hizo el procedimiento para estudiar la anomalía del periodo de análisis, con base en el valor de precipitación promedio mensual para ilustrar la variación de la precipitación a pesar de que la Organización Meteorológica Mundial, encuentra adecuado este procedimiento solo para series de tiempo.



**Figura 13. Anomalía absoluta de la precipitación**

De lo mostrado por la figura 13, se observa que los meses que estuvieron con precipitación por debajo de la media, son los meses de mayo (época seca), julio, agosto y septiembre lo que habla de un verano especialmente seco, como ya se apuntaba.

La Amplitud Térmica se relacionó con la lámina de precipitación observada (Figura 14), lo que permitió conocer que durante el verano a medida que disminuyó la precipitación, hubo incrementos en la amplitud térmica. El caso inverso se presenta durante el otoño, donde sin importar el volumen de precipitación la amplitud térmica disminuyó. Esto tiene relación directa con la evaporación del medio y la cantidad de humedad disponible para dicha reacción. Los casos de los meses de junio y octubre, extremos de precipitación antes y después del verano, muestran que cuando incrementó la precipitación, el clima fue más estable como producto de la nubosidad y el efecto de acondicionamiento térmico que hace el agua en los ecosistemas, en este punto, la estacionalidad pasa a segundo término.



**Figura 14. Relación entre precipitación y amplitud térmica**

La Humedad Relativa (HR) promedio mensual durante la fase experimental fue de 81.77%, lo que habla de un ambiente con mucha humedad por encima de la mínima para climas sub-húmedos establecida en 45% con velocidades del viento de bajas a moderadas establecidas en alrededor de 2 m/s (Allen *et al.*, 1998). En el sitio experimental, la velocidad del viento promedio mensual obtenida a partir de promedios diarios, fue de 0.56 m/s. En el sitio experimental, se observó que cuando la velocidad del viento disminuyó hubo incrementos en la humedad relativa, especialmente en los meses de octubre (muy lluvioso) noviembre y diciembre. Los meses de octubre y diciembre, presentaron valores similares de humedad relativa, aunque tuvieron diferencias importantes en el volumen de precipitación.

Con respecto a las horas de insolación y la radiación diaria recibida, se tiene una relación en la cual, a mayor amplitud solar del día, mayor radiación; dentro de los factores del clima, estos dos elementos, están influenciados por la latitud del lugar.

#### **6.4 Cálculo del Kc**

Las variables que intervienen en el cálculo del Kc (Cuadro 8) fueron integradas a nivel mensual para el cálculo inicial. En vista de la resolución de los valores de las variables de entrada, los valores obtenidos fueron divididos por el número de días de cada mes para sacar el estimado diario, solo como una referencia de lo que se espera en cada caso.

El valor promedio del Kc mensual en la etapa de análisis es de 0.25, con valores por debajo de cultivos de solanáceas en etapa inicial como la papa dulce (Mulovhedzi *et al.*, 2020) cultivado a campo abierto y el tomate (Gong *et al.*, 2020) cultivado en invernadero.

En general, los resultados muestran un valor de Kc menor que lo reportado para el Kc promedio en la etapa inicial de 0.35 (Kelso-Bucio *et al.*, 2012), de hecho los valores más altos encontrados en este estudio fueron 0.35 (mayo, el más alto) y 0.34 (junio, el segundo más alto) que están en la parte inferior del estudio reportado con anterioridad en un sitio experimental próximo al lugar donde se desarrolló el experimento que aquí se reporta.

Estos resultados contradicen lo esperado de conformidad con el comportamiento normal del Kc, donde se asume que los valores iniciales son menores en la etapa inicial, aumentan con el crecimiento y comienzan el descenso al entrar en la etapa senescente (Allen *et al.*, 1998).

**Cuadro 8. Kc mensual y sus variables de cálculo**

DJ	Mes	Mensual			Promedio diario		
		ET0 (mm)	ETr (mm)	Kc	ET0 (mm)	Etr (mm)	Kc
120	Abril	116.14	36.32	0.31	3.87	4.46	0.31
151	Mayo	139.03	48.76	0.35	4.48	4.63	0.34
181	Junio	139.08	46.95	0.34	4.48	5.83	0.34
212	Julio	137.93	30.89	0.22	4.45	4.61	0.22
243	Agosto	135.89	34.32	0.25	4.38	4.33	0.24
273	Septiembre	117.94	32.11	0.27	3.93	3.18	0.27
304	Octubre	98.49	20.00	0.20	3.18	2.49	0.20
334	Noviembre	73.47	10.59	0.14	2.45	1.50	0.14
365	Diciembre	66.18	10.65	0.16	2.14	1.29	0.16

De lo mostrado por el cuadro 8, se observa que la mayor demanda evapotranspirativa de referencia (Allen *et al.*, 1998), en el periodo de análisis, se presenta en el mes de junio con lámina unitaria de 139.08 mm/mes, mientras que la menor demanda es en el mes de diciembre con 66.18 mm/mes.

De conformidad con la definición de evapotranspiración del cultivo de referencia, se trata de los meses en que se tiene la mayor y menor radiación que, al parecer, en esa zona influye de manera determinante en la capacidad del ambiente para propiciar el cambio del estado líquido al gaseoso del agua. De igual manera, las dos fechas coinciden con los meses en los que ocurre en el solsticio de verano y de invierno, los dos puntos extremos, cuya influencia



es más marcada a mayor latitud, en tanto que, en las regiones ecuatoriales, y cercanas a él, su influencia disminuye para dar paso a otras variables del clima como las determinantes en la tasa de evapotranspiración.

Con respecto a la evapotranspiración real (Cuadro 8), fue calculada con base en la información del volumen de riego y drenado en el área experimental. El mayor volumen de consumo se tuvo en el mes de mayo (lámina unitaria de 48.76 mm/mes), en tanto que el menor volumen fue requerido en el mes de noviembre y diciembre con valores muy próximos (10.59 y 10.65 mm/mes respectivamente). Lo anterior, tiene una estrecha relación con la disponibilidad de humedad en el ambiente, pues durante el mes de mayo, se sintieron los efectos debidos a la época de seca.

En efecto, el mes de mayo acumuló una baja humedad relativa precedida de una más baja humedad en el mes de abril, aunque se tuvieron eventos de lluvia, fueron de poca importancia puesto que el módulo experimental se encontró cubierto de las inclemencias del tiempo atmosférico.

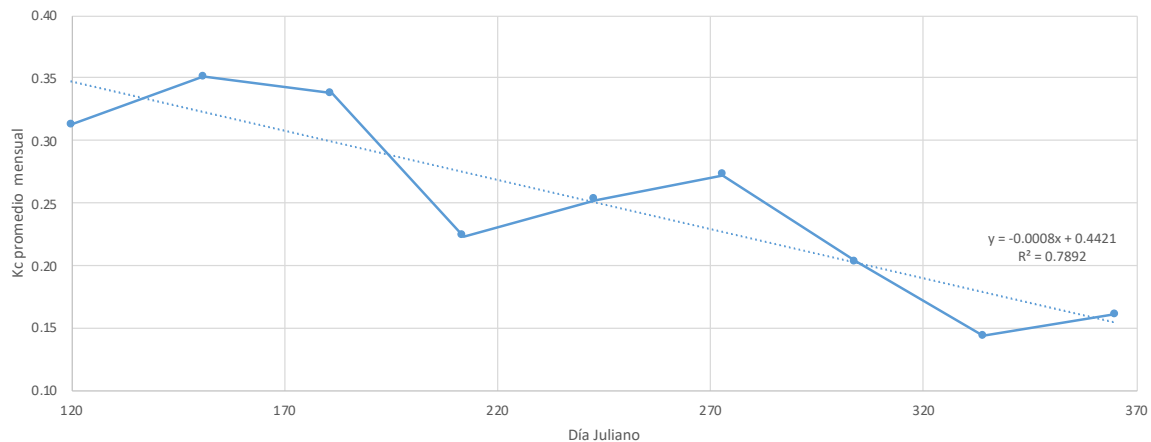
Así, aunque los eventos de precipitación pueden ser despreciables en este estudio, la humedad relativa relacionada a la precipitación tiene influencia en el desarrollo del cultivo y en la dinámica del consumo/pérdida de agua por parte de las plantas, puesto que influye sobre el proceso de apertura y cierre estomático. Ello explica el hecho de que durante junio se tuvieron eventos de lluvia, pero el consumo de agua (Etr) fue ligeramente menor que en el mes previo.

Con los datos sobre el  $K_c$ , calculado con el cuadro 8, se construyó la figura 15, que esquematiza el desarrollo temporal de los valores de  $K_c$  obtenidos a partir de la serie de tiempo mensual.

Los valores de  $K_c$  en el periodo, se pueden modelar a través de un ajuste lineal, que da un ajuste  $R^2$  de 0.8 redondeado al decimal. Lo interesante es observar la pendiente descendente que mantiene el  $K_c$ ; sin embargo, se puede observar un fenómeno oscilatorio periódico con

dos crestas y dos valles, pero la pendiente general es descendente, que va en términos generales de 0.34 en el segundo mes de análisis hasta 0.14 en el penúltimo mes, como los valores extremos encontrados.

Aunque en el cuadro 8 se pueden apreciar estimaciones diarias del  $K_c$ , éste debe tomarse con las debidas precauciones, puesto que el valor procede de los cálculos mensuales de  $ET_0$  y  $E_{tr}$  divididos por el número de días del mes, por lo que su uso es meramente ilustrativo.



**Figura 15. Valores mensuales de  $K_c$**

Con respecto a los valores de  $K_c$ , los espaciamientos estrechos entre plantas, así como la mayor altura y rugosidad de la superficie producen  $K_c$  mayores a 1.0 como la caña de azúcar (Libardi *et al.*, 2019); además, es necesario notar que aunque en FAO56 (Allen *et al.*, 1998) se recomiendan algunos valores de  $K_c$ , en general los valores locales de  $K_c$ , pueden tener variaciones del orden del 40% durante la etapa de desarrollo de los cultivos.

Aunque la mayoría de las especies abren los estomas en respuesta al aumento del calentamiento por la radiación solar, los cultivos que pueden cerrar sus estomas durante el día (por ejemplo en piña) poseen valores bajos del coeficiente del cultivo (Allen *et al.*, 1998); además, las especies que presentan estomas solo en la parte inferior de la hoja y/o que presentan gran resistencia en las hojas, resultan con valores relativamente menores de  $K_c$ , como los cítricos y frutales de hojas caducas.

El comportamiento del Kc a lo largo del periodo de análisis invita a buscar explicación sobre el comportamiento temporal de otras variables climáticas. Puesto que, en este caso, la precipitación no influye directamente en el cálculo del Kc, se relacionó el valor del Kc con la amplitud térmica, similar a lo mostrado por la figura 14 para la Humedad Relativa.

En la agricultura de riego, como lo es el caso de este experimento, siempre que se cuenta con la adecuada aplicación en volumen y tiempo (Mulovhedzi *et al.*, 2020), se ha encontrado que los rendimientos se pueden incrementar desde un 20% hasta 140% de rendimientos con respecto a la agricultura de temporal (Mandal *et al.*, 2020), quizá eso explica los resultados obtenidos para el crecimiento de brotes en la India (Sujatha & Bhat, 2010) y características morfológicas de los frutos, obtenidos en México (Cervantes *et al.*, 2018; Hernández-Hernández *et al.*, 2019); aunque los resultados de la India fueron obtenidos en condiciones similares, con agricultura bajo riego utilizando como criterio de volumen de riego el tanque tipo A y algunas variaciones del coeficiente de tanque.

Los valores más altos de amplitud térmica fueron durante el verano (Figura 15), especialmente el mes de agosto y en condición casi similar, los meses de julio y septiembre. A partir del mes de septiembre y hasta diciembre se observa un acoplamiento del Kc con la amplitud térmica promedio mensual; por lo anterior se puede inferir que, a partir del mes de septiembre, las variaciones en la temperatura máxima y mínima, tienen relación directa con el desarrollo del cultivo de vainilla, afectando el Kc, por encima del resto de las variables analizadas.

En este periodo de acoplamiento lineal entre Kc y amplitud térmica media anual, se dan las menores tasas de crecimiento de los brotes, como lo mostraron el cuadro 5 y la figura 10b; por esta razón se puede inducir que el crecimiento de la vainilla es termo sensible, toda vez que la humedad relativa, y el resto de las variables meteorológicas, especialmente la precipitación permanecen desacopladas del funcionamiento del Kc.

Al estudiar la correlación entre amplitud térmica y Kc (Figura 16) en los meses de septiembre a diciembre, se encontró un ajuste con  $R^2$  de 0.98 al utilizar una función lineal con pendiente positiva. Estos resultados se asemejan al caso de los cereales, donde se ha encontrado que el rendimiento se encuentra relacionado positivamente con la radiación y la temperatura y, negativamente o desacoplado de la precipitación estacional (Yang *et al.*, 2020).



**Figura 16. Análisis conjunto de Kc y Amplitud Térmica**

Durante el mes de julio, en promedio los frutos cesan el crecimiento longitudinal y radial (Cuadro 3 y Figura 7), en ese momento la planta cambia de prioridades, por lo que disminuye su Kc. En lo sucesivo, la vainilla enfoca sus energías a la concentración de activos de calidad productiva en los frutos, en tanto que comienzan a aparecer los brotes vegetativos; en efecto, en el mes de junio, hay dos brotes y, junto con la carga del crecimiento de frutos, se tiene un Kc con valores altos, los más altos durante mayo y junio.

Hay un mes de diferencia entre los primeros dos brotes vegetativos ocurridos en junio y hasta el tercero que ocurre a finales del mes de julio; por esta razón, la planta disminuye el Kc en julio, mientras realiza ajustes a sus prioridades energéticas, independiente a la amplitud térmica que, por cierto, es baja en junio, donde comienza un ciclo ascendente con cúspide en el mes de agosto, para seguir el patrón sinodal similar al del Kc.

## VII. CONCLUSIONES

La vainilla tiene un coeficiente de cultivo promedio mensual en la etapa de análisis de 0.25 con un periodo alto entre los meses de mayo y junio, que alcanza valores de 0.35 y 0.34 respectivamente; en contraste, durante los meses de noviembre y diciembre se presentan los valores más bajos de 0.14 y 0.16 respectivamente con muy bajo consumo de agua. La evolución temporal de Kc, se puede estudiar a través de un modelo lineal con pendiente descendente que presenta un  $R^2$  de 0.8.

Las plantas de vainilla tienen periodo de floración en el mes de abril que requiere polinización manual, para pasar al crecimiento de los frutos, los cuales requieren de 80 días en promedio para alcanzar la longitud y talla máximos, durante este periodo la vainilla requiere mayor consumo de agua, puesto que el Kc alcanza valores más altos (0.35 y 0.34).

Durante el fin de la primavera e inicios del verano, la vainilla cesa el crecimiento de los frutos y enfoca sus energías a la calidad del fruto y, la aparición y crecimiento de brotes vegetativos, en esta transición el valor del Kc disminuye.

El crecimiento de los brotes de vainilla es intenso para los que aparecen durante el fin de la primavera a inicios del verano en contraste con aquellos que surgen en el otoño. La tasa de crecimiento tuvo variación de 2.33 para los primeros, que surgieron a 1.22 para los últimos; por tanto, los brotes del otoño tienen un crecimiento 48% menor que los que aparecen con mayor periodo de insolación, aunque se trate de cultivos bajo sombra.

Durante el otoño, la vainilla presenta una tasa de consumo de agua regulada por la amplitud térmica (diferencia entre temperatura máxima y mínima), con bajos consumo de agua que se acoplan a un ajuste lineal con  $R^2$  de 0.98 entre Kc y amplitud térmica.

Los resultados experimentales permiten calificarlo como un caso exitoso debido a las características productivas y de crecimiento vegetativo obtenido, así como la ausencia de enfermedades debidas al exceso de humedad.

## VIII. LITERATURA CITADA

- Aboukhaled, A., Alfaro, J. y Smith, M. (1986). Los lisímetros. Estudio FAO. Riego y Drenaje. Documento N° 39.
- Aguilera, M. y Martínez, R. (1996). Relaciones agua suelo planta atmosfera. Patronato Universitario de la Universidad Autónoma Chapingo.
- Allen R., G., L. Pereira S., D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy. 298 p.
- Allen R., G., M. Smith., A. Perrier, and L. Pereira S. 1994. An update for the definition of reference evapotranspiration. ICID Bull. 43(2):1-34.
- Allen, G. R., Pereira, S. L., Raes, D. y Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Riego y Drenaje, FAO, no. 56.
- Bonet P, C., Acea, I., Brown, M. O., Hernández, V. M., & Duarte, D. C. (2010). Coeficientes de cultivo para la programación del riego de la piña. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(3), 23-27.
- Bouriquet G. 1954. Le vanillier a la vanille. Encyclopédie biologique. Editions Paul Lechevalier. Paris. 746 p.
- Brasa, R. A. (1997). Determinación mediante teledetección de la evapotranspiración en regadíos extensivos. Tesis doctorales. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.
- Castro, M. (2008). Desarrollo de un sistema de riego automatizado en tiempo real con base en balance hídrico climático, medición de humedad del suelo y lisímetro. Tesis de doctorado, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. De México.
- Castro, P. M., Águila, F. M., Quevedo, N. A., Kleisinger, S., Tijerina, C. L., & Mejía, S. E. (2008). Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro. *Agricultura técnica en México*, 34(4), 459-470.

- Castro-Bobadilla, G. 2008. Evaluación y producción de vainilla en la zona de Papantla, Veracruz, México. Tesis de Doctorado. Secretaría de Posgrado, Instituto de Ecología, A. C. Xalapa, Veracruz, México. 93 p.
- Cervantes Castillo, A., Lima Morales, M., Delgado Alvarado, A., Herrera Cabrera, B. E., Arévalo Galarza, G. A., Soto Hernandez, R. M., ... Arévalo Galarza, M. de L. C. (2018). Calidad de frutos vainilla (*Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews) procedente de la Huasteca Potosina, México. *Nova Scientia*, 10(21), 360. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1586>
- Cisneros, Z. E., Rey, G. R., Martínez, V R., López, S. T., & González, R. F. (2015). Evapotranspiración y coeficientes de cultivo para el cafeto en la provincia de Pinar del Río. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(2), 23-30.
- Curti E. D. 1995. Cultivo y beneficiado de vainilla en México. Organización Nacional de Vainilleros Indígenas de México.
- Damirón R. V. 2004. El cultivo de la vainilla. Veracruz agrícola, Dirección General de Agricultura y Fitosanitaria. Gobierno del estado de Veracruz, México.
- De Santa, F.M. y De Juan, J.A. (1993). *Agronomía del riego*. Ediciones Mundi Prensa: Madrid.
- De Santa, O.M.F.M., López, F. P. y Calera, B. A. (2005). *Agua y agronomía*. Barcelona: Ediciones Mundi-Prensa.
- Doorembos, J. y W. Pruit. (1977). *Las necesidades de agua de los cultivos*. Serie Riego y Drenaje No 24. FAO, Roma, 193 p.
- FAO. 2011. *Elaboración y uso del bocashi*. Centro nacional de Tecnología agropecuaria y forestal, Ministerio de agricultura y ganadería. El Salvador.
- FAOSTAT. 2019. *Crops*. Disponible en <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (al 13 de agosto de 2019).



- Gong, X., Qiu, R., Sun, J., Ge, J., Li, Y., & Wang, S. (2020). Evapotranspiration and crop coefficient of tomato grown in a solar greenhouse under full and deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 235(January), 106154.  
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106154>
- Hernández H. J. 2014. Técnicas implementadas para el cultivo de vainilla en México. In: I Seminario internacional de vainilla. Araya Fernandez Carlos Roberto Cordero Solórzano, Amelia Paniagua Vásquez y José Bernal Azofeifa Bolaños. Ed. Promoviendo la investigación, la extensión y la producción de vainilla en Mesoamérica.
- Hernández J.; P. Lubinsky. 2011. Cultivation systems. In: Odoux E and M. Grisoni (ed.). *Vanilla (Medicinal and Aromatic Plants - Industrial Profiles)*. CRC Press, Boca Raton, Florida. 75-95.
- Hernández-Hernández, J., Curti-Díaz, S. A., & Ríos-Utrera, Á. (2019). Retention of *Vanilla planifolia* Jacks ex Andrews fruits with growth regulators. *Agronomy Mesoamerican*, 30(3), 695–704. <https://doi.org/10.15517/am.v30i3.33988>
- Herrera-Cabrera B. E.; M. Díaz-Bautista; Salazar-Rojas V. M.; A. Delgado-Alvarado. 2014. Variabilidad genética en vainilla (*Vanilla planifolia* Andrews) de México. In: I Seminario internacional de vainilla. Araya Fernandez Carlos Roberto Cordero Solórzano, Amelia Paniagua Vásquez y José Bernal Azofeifa Bolaños. Ed. Promoviendo la investigación, la extensión y la producción de vainilla en Mesoamérica.
- Kelso B. H. A. 2012. Estimación de coeficientes de desarrollo para *Vanilla* spp. y calibración regional de ETo en México. Tesis de doctorado, Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Interamericano de Recursos del Agua. Toluca, México.
- Kelso B., H., A. 2009. Determinación de las necesidades hídricas del cultivo de vainilla (*Vanilla planifolia* A), en el sureste de México. Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Interamericano de Recursos del Agua. Toluca, México

- Kelso, B. H. A., Bâ, K.-M., Sánchez, M. S., & Reyes, L. D. (2012). Automatización de un lisímetro de pesada. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (4), 807-811.
- Kelso, B. H. A., Bâ, K.-M., Sánchez, M. S., & Reyes, L. D. (2012). Estudio experimental para la determinación de los coeficientes de cultivo de la vainilla (*Vanillaspp.*). Recuperado a partir de <http://repositoriodigital.academica.mx/jspui/handle/987654321/344916>
- Kelso-Bucio, H. A., Bâ, K. M., Sánchez-Morales, S., & Reyes-López, D. (2012). In situ estimation of Kcini IN Vanilla (*Vanilla planifolia* A). *Agrociencia*, 46(5), 499–506.
- Ledesma, J.M. 2000. *Climatología y meteorología agrícola*. Editores Spain Paraninfo, S.A. España.
- Libardi, L. G. P., de Faria, R. T., Dalri, A. B., de Souza Rolim, G., Palaretti, L. F., Coelho, A. P., & Martins, I. P. (2019). Evapotranspiration and crop coefficient (Kc) of pre-sprouted sugarcane plantlets for greenhouse irrigation management. *Agricultural Water Management*, 212(April 2018), 306–316. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.003>
- Mandal, S., Vema, V. K., Kurian, C., & Sudheer, K. P. (2020). Improving the crop productivity in rainfed areas with water harvesting structures and deficit irrigation strategies. *Journal of Hydrology*, 586(December 2019), 124818. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124818>
- Martin, B. I. (2001). *Establecimiento, producción, beneficio y comercialización de la vainilla (Vanillaspp.) en México*. Tesis para obtener el título de ingeniero agrónomo. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Martínez-Quezada D.M.1; Sandoval-Zapotitla, E.; Solís-De la Cruz, J.; Velázquez-Vázquez, D.E.1 y Herrera-Cabrera, E.B. 2016. Caracterización anatómica y análisis de variación de epidermis foliar y caulinar entre dos genotipos de *Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews. *Agroproductividad*. 9 (1), 26-33.

- Montoya H. F. 1963. Tecnología en el cultivo de vainilla, México. Ed. Subsecretaría de Agricultura. 35p.
- Morales M. E. R.; Casanova L. F. 2015. Mezclas de sustratos orgánicos e inorgánicos, tamaño de partícula y proporción. *Agronomía Mesoamericana*, 26 (2), 365-372.
- Mulovhedzi, N. E., Araya, N. A., Mengistu, M. G., Fessehazion, M. K., du Plooy, C. P., Araya, H. T., & van der Laan, M. (2020). Estimating evapotranspiration and determining crop coefficients of irrigated sweet potato (*Ipomoea batatas*) grown in a semi-arid climate. *Agricultural Water Management*, 233(February), 106099. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106099>
- Pereira L., S. 2007. Drought impacts in agriculture: Water conservation and water saving practices and management. In: Rossi, G., T. Vega, and B. Bonaccorso (eds). *Methods and Tools for Drought Analysis and Management*. Springer, Netherlands. pp: 349-383.
- Pérez, A. (2001). Estudio agronómico y fisiológico en condiciones de infradotación hídrica. Memoria presentada para optar el grado de Doctor por la Universidad Politécnica de Cartagena.
- Puppo, L., García, C., Bautista, E., Hunsaker, D. J., Beretta, A., & Girona, J. (2019). Seasonal basal crop coefficient pattern of young non-bearing olive trees grown in drainage lysimeters in a temperate sub-humid climate. *Agricultural Water Management*, 226(July), 105732. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105732>
- Quiñónez P., H. 1997. Necesidades hídricas de los cultivos. Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). México. 28 p.
- Rechy Rodríguez U. 2018. Curvas de humedad y caracterización físico-química en sustratos para el cultivo de vainilla. Tesis profesional. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Reyes D., L., B. Rodríguez M., H. Kelso B., M. Huerta L., y A. Ibáñez M. 2008. Beneficiario tradicional de vainilla. Editorial Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. 72 p.

- Sánchez M., S. 1997. Caracterización de los principales sistemas de producción comercial de vainilla (*Vanilla planifolia* A) en México. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Sánchez, M.I. (1992). Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración. Geoforma ediciones. España.
- Santa Olalla M. F. M. 1992. Agronomía del riego. Ediciones Mundi-Prensa.
- Segura C. M. A.; Preciado R. P.; Gonzalez C. G.; Frias R. J. E.; Garcia L. G.; Orozco V. J. A. Enriquez S. M. 2008. Adición de material pomáceo a sustratos de arena para incrementar la capacidad de retención de humedad. *Inverciencia*, 33 (12), 923-928.
- Servín, P. M., Medina, G.G, Casas, F.I. y Catalán, E.A.V. (2012). Sistema en línea para programación de riego de chile y frijol en Zacatecas. Folletotécnico No. 42. INIFAP CENID-RASPA. Zacatecas.
- Soto A. M. A. 2009. Recopilación análisis de la información existente sobre las especies mexicanas del género *Vainilla*. Reporte a la comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO) México, D.F.
- Sujatha, S., & Bhat, R. (2010). Response of vanilla (*Vanilla planifolia* A.) intercropped in arecanut to irrigation and nutrition in humid tropics of India. *Agricultural Water Management*, 97(7), 988–994. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.01.031>
- Valverde, C.J.C. (2007). Riego y drenaje. San José, C.R: EUNED. Costa Rica.
- Vega Ramírez M. 2010. Diagnóstico de la situación actual de la vainilla (*vainilla planifolia*) en México. Tesis de licenciatura. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México.
- Yang, M., Wang, G., Ahmed, K. F., Adugna, B., Eggen, M., Atsbeha, E., ... Anagnostou, E. (2020). The role of climate in the trend and variability of Ethiopia's cereal crop yields. *Science of The Total Environment*, 723, 137893. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137893>.



**BUAP**

**Oficio No. IAH/281/2020**

**Asunto:** Impresión de Tesis.

**C. Irvin Omar López Bautista**  
**Egresado de la Facultad de Ingeniería Agrohidráulica**  
**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**  
**PRESENTE**

Con base en el dictamen emitido por el Dr. Delfino Reyes López (**Director de Tesis**), Dr. Fermín Pascual Ramírez (**Codirector**), Dr. Luis Antonio Domínguez Perales (**Asesor**) y M.C. Fabiel Vázquez Cruz (**Asesor**), en su calidad de Consejo Particular, se autoriza la impresión de la tesis titulada:

**“Coeficiente de Cultivo de *Vanilla planifolia* G. Jackson en la Etapa Final”**

Correspondiente a la Licenciatura en Ingeniería Agrohidráulica.

Sin otro particular por el momento me despido de Usted.

**Atentamente**

“Pensar bien, para vivir mejor”

San Juan Acateno, Teziutlán, Pue., a 17 de agosto del 2020

**Dr. Armando Ibáñez Martínez**  
Director de la Facultad de Ingeniería Agrohidráulica



c.c.p.- Archivo y Minutario  
DR. AIM/gra.