



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MEXICO



S.E.P.

TNM

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTEPEC

TEMA

“EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES AGRONÓMICAS Y CLIMÁTICAS EN LA CALIDAD AROMÁTICA DE LA VAINILLA (*Vanilla planifolia*)”

PRODUCTO

TESIS

POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS

PRESENTA

IBQ. ANTONY SOTO ENRIQUE

DIRECTORA

DRA. ARACELI PEREZ SILVA

CO-DIRECTORA INTERNA

MCA. ERNESTINA PAZ GAMBOA

CO-DIRECTOR EXTERNO

DR. PAULO CESAR PARADA MOLINA

VOCAL

DRA. ROSELIS CARMONA GARCÍA

VOCAL SUPLENTE

DR. JUAN GABRIEL TORRUCO UCO

SAN JUAN BAUTISTA TUXTEPEC, OAXACA NOVIEMBRE DEL 2022

**Tesis realizada dentro del marco del Proyecto de Investigación
“Estrategias para la adaptación y mitigación al cambio climático
necesarias para el rescate del cultivo de la vainilla en México”,
proyecto no. 297484, financiado por el CONACYT**



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Tuxtepec
División de Estudios Profesionales

Autorización de Presentación Electrónica de Tesis

San Juan Bautista Tuxtepec, Oax., **11/Noviembre/2022**

Oficio No. DEP/CT- 6331

C. ANTONY SOTO ENRIQUE
EGRESADO DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ALIMENTOS
CON NÚMERO DE CONTROL M14350470
PRESENTE

POR MEDIO DE LA PRESENTE ME PERMITO COMUNICARLE QUE EL COMITÉ TUTORIAL INTEGRADO POR LOS CC. ARACELI PÉREZ SILVA, ERNESTINA PAZ GAMBOA, PAULO CÉSAR PARADA MOLINA, ROSELIS CARMONA GARCÍA Y JUAN GABRIEL TORRUCO UCO, REVISÓ Y APROBÓ EN SU TOTALIDAD EL TRABAJO PROFESIONAL DENOMINADO "EVALUACIÓN DE LA CONDICIONES AGRONÓMICAS Y CLIMÁTICAS EN LA CALIDAD AROMÁTICA DE LA VAINILLA (VANILLA PLANIFOLIA)." PRESENTADO POR USTED COMO PRODUCTO DE TESIS DE ACUERDO AL LINEAMIENTO DE TITULACIÓN CORRESPONDIENTE, PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN ALIMENTOS.

POR LO ANTERIOR Y DE ACUERDO A LOS LINEAMIENTOS INSTITUCIONALES SE LE DA TRÁMITE LEGAL PARA QUE PROCEDA A LA PRESENTACIÓN DEL TRABAJO PROFESIONAL

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica.

JULIÁN KURI MAR
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

ccp. Depto. Servicios Escolares
Archivo
M/MDM/mdom*



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTEPEC

**SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA**

Av. Dr. Víctor Bravo Ahuja Num. 561, Col. Predio el Paraíso, C.P.68350 Tuxtepec, Oaxaca
Tel. (287) 8751044 y (287) 51880 e-mail: cyd_tuxtepec@tecnm.mx | tuxtepec.tecnm.mx



2022 Flores
Año de Magón

PRELACIÓN EN LA REFORMA EDUCATIVA



Carta de Cesión de Derechos Autorales

Tuxtepec, Oaxaca **10/NOVIEMBRE/2022**

Título de la Tesis	Evaluación de las condiciones agronómicas y climáticas en la calidad aromática de la vainilla (<i>Vanilla planifolia</i>)
Autor principal	Antony Soto Enrique
Email de contacto	ase011296@gmail.com
No. de Control	M14350470
Director de Tesis	Dra. Araceli Pérez Silva
Registro ISBN / ISSN (Cuando aplique)	

Por este conducto manifiesto que es mi libre voluntad el ceder los derechos patrimoniales relativos a la obra literaria de la cual soy el autor, a favor del Tecnológico Nacional de México / Campus Tuxtepec; para que sea publicada, sin más límites que los establecidos en la Ley Federal del Derecho de Autor.

Extiendo la presente para los fines legales a que haya lugar.

Atentamente

Autor: [Antony Soto Enrique]

Firma

NOMBRE DEL TRABAJO

ANTONY SOTO-TESIS MCA 10-11-2022
APS.docx

RECuento DE PALABRAS

15936 Words

RECuento DE CARACTERES

82763 Characters

RECuento DE PÁGINAS

69 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

16.3MB

FECHA DE ENTREGA

Nov 10, 2022 4:59 PM CST

FECHA DEL INFORME

Nov 10, 2022 5:03 PM CST**● 30% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos

- 29% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 14% Base de datos de trabajos entregados
- 8% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

DEDICATORIAS

A mi Familia

Para mi padre Fernando Soto Delgado y toda mi familia que siempre me ha brindado de su apoyo incondicional gracias infinitas.

A Dios

Ya que sin el nada es posible y con su gracia nos da la oportunidad de ser mejores persona y nos brinda de infinitas oportunidades para seguir superándonos, muchas gracias Dios padre.

Al sector productivo

Sin la producción agrícola no podríamos tener este tipo de investigaciones, esta pequeña aportación es para ustedes, me siento feliz de haber conocido mucha gente que vive del campo y por habernos compartido de sus experiencias.

AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Tuxtepec.

Por el apoyo y la excelencia de sus servicios e instalaciones durante toda la trayectoria del posgrado.

A la Dra. Araceli Pérez Silva

Por ser el pilar en mi formación durante el desarrollo de mi tesis, por los consejos y el entusiasmo que transmite y nos motiva siempre a dar lo mejor de cada uno siempre con la gracia de Dios.

Al posgrado Maestría en Ciencias en Alimentos.

Por las enseñanzas y experiencias de todos los profesores durante mi proceso de formación.

Al Fordecyt-Conacyt

Por la beca otorgada al presente trabajo del Proyecto de investigación “Estrategias para la adaptación y mitigación al cambio climático necesarias para el rescate del cultivo de vainilla en México”

Al equipo Vainilla-ITTUX.

Por el apoyo en todo momento para el desarrollo de mi tesis

A los Productores e industriales participantes de la Investigación.

Por los frutos de vainilla y por los fertilizantes para el desarrollo de esta investigación.

RESUMEN

El objetivo de este proyecto fue evaluar la influencia de las condiciones agronómicas y climáticas en la calidad aromática de la vainilla (*Vanilla planifolia*) producida en México. Se seleccionaron 8 plantaciones de *V. planifolia* en los estados de Oaxaca (3), Veracruz (4) y San Luis Potosí (1). Se colectaron frutos, con aproximadamente 8 meses de madurez, a los cuales se les midió peso, longitud y grosor, así como el contenido de humedad mediante un método gravimétrico. Se cuantificó la glucovanillina y vainillina, mediante HPLC-DAD, y la actividad enzimática de β -glucosidasa mediante espectrofotometría. El análisis climatológico del periodo 2010-2019 se realizó con datos de estaciones climatológicas de la CONAGUA cercanas a las plantaciones estudiadas; se realizó un análisis comparativo de variables climáticas y microclimáticas (periodo 2020-2021), medidas con estaciones automatizadas instaladas al exterior y al interior, de 3 plantaciones con diferente altitud y sistema de cultivo. El análisis de fertilidad de suelo se realizó en 4 plantaciones; en una parcela se evaluó la aplicación de un fertilizante órgano mineral (NutriQuicker®). Los resultados indican que el peso, longitud y grosor promedio de las vainas fue de 17 g, 19 cm, 1.5 cm, respectivamente. Se identificaron valores de contenidos de glucovanillina y vainillina libre que oscilaron entre 0.5-12 y 0.5-4.5 (g/100 g m.s.), respectivamente; con un potencial aromático en vainillina de 3.5 a 6.5%, el contenido de humedad de los frutos osciló entre 80 - 84 %. En el área de estudio la temperatura osciló de 17-32 °C y la precipitación anual de 1700-4000 mm. Las altitudes de las plantaciones variaron de 20-1250 msnm. Las diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las condiciones climáticas y microclimáticas en el acahual muestran que este sistema es más favorable para el desarrollo de la vainilla, humedad relativa de 88.4 a 89.7 %, déficit de presión de vapor de 0.26 a 0.48 kPa, temperaturas de 16 a 32 °C. Los resultados del análisis de suelo indican mejor adaptabilidad del cultivo a suelos francos, pH de 6.5 a 7.3, densidad aparente de 0.8 a 1 g/cm³, capacidad de campo de 29 a 37 %, contenido de materia orgánica osciló entre 6 y 15% y ricos en N, P, K, B, Zn y Fe. Los potenciales más altos en

vainillina fueron cuantificados en los frutos provenientes de cultivos establecidos entre 600 y 1100 msnm, bajo sistemas de malla sombra y acahual respectivamente. La aplicación del fertilizante mejoró el contenido de materia orgánica en la parcela de 13.5 a 15 %, aumentando la actividad enzimática de la β -glucosidasa de 610 a 1100 nkat g⁻¹ y el contenido de glucovanillina de 2.5 a 11 g/ 100 g m.s., en los frutos. La calidad aromática de la vainilla no depende estrictamente de la altitud ni del sistema de cultivo sino del manejo agronómico en cada etapa fenológica específica.

CONTENIDO

	Página.
1. INTRODUCCIÓN	15
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1. <i>Vanilla planifolia</i>	17
2.1.1. Características morfológicas.....	18
2.1.2. Floración.....	18
2.1.3. Polinización manual de flores.....	19
2.1.4. Desarrollo del fruto.....	20
2.1.5. Cosecha.....	21
2.2. Sistemas de cultivos para la producción de vainilla en México.....	22
2.2.1. Tradicional o acahual.....	22
2.2.2. Cielo abierto o monocultivo.....	22
2.2.3. Malla sombra o Invernadero.....	23
2.3. Condiciones climáticas y agronómicas del cultivo de vainilla.....	24
2.3.1. Clima.....	24
2.3.2. Temperatura.....	24
2.3.3. Precipitación.....	24
2.3.4. Altitud.....	24
2.3.5. Luz/sombra.....	25
2.3.6. Selección y propagación del material vegetativo.....	25
2.3.7. Características físicas del suelo.....	26
2.3.8. Preparación de composta.....	26
2.3.9. Nutrición.....	28
2.4. Plagas y enfermedades del cultivo de vainilla.....	29
2.4.1. Pudrición de la raíz.....	29
2.4.2. Quemaduras por el sol.....	29
2.4.3. Antracnosis.....	30
2.4.4. Roya.....	30
2.4.5. El amarillento y caída de frutos tiernos.....	31
2.4.6. La chiche o Piojo Rojo (<i>Tentecoris confusus</i>).....	31
2.4.6. Gusano Peludo (<i>Prusia aurífera</i>).....	32
2.4.7. Caracoles y Babosas.....	33

2.5. Calidad aromática.....	34
2.5.1. Aroma vainilla.....	34
2.5.2. Precusores glucosilados.....	34
2.5.3. Glucovainillina.....	35
2.5.4. Potencial aromático.....	35
3. ANTECEDENTES.....	36
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	38
5. JUSTIFICACIÓN.....	38
6. OBJETIVOS.....	39
6.1 Objetivo general.....	39
6.2 Objetivos específicos.....	39
7. MATERIALES Y MÉTODOS.....	40
7.1. Identificación y georreferenciación de las plantaciones.....	40
7.2. Polinización manual y colecta de los frutos.....	40
7.3. Caracterización agronómica de las plantaciones.....	40
7.4. Caracterización de las condiciones climáticas.....	41
7.5. Caracterización de las condiciones Micro climáticas.....	41
7.6. Evaluación de fertilizante en plantación de vainilla.....	42
7.7. Caracterización física de los frutos verdes.....	42
7.8. Determinación de humedad en vainas verdes.....	42
7.9. Determinación de la actividad enzimática de la β -glucosidasa.....	43
7.10. Cuantificación del potencial en vainillina por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC-DAD).....	43
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
8.1. Identificación y geolocalización de las plantaciones.....	44
8.2. Evaluación Agronómica.....	45
8.2.1. Evaluación de la textura del suelo.....	45
8.2.2. Evaluación del pH del suelo.....	46
8.2.3. Punto de Saturación (PS) y Capacidad de Campo (CC) del suelo.....	47
8.2.4. Densidad aparente del suelo.....	47
8.2.5. Contenido de Materia Orgánica (MO) del suelo.....	48
8.2.6. Contenido de Macro nutrientes del suelo.....	49
8.2.7. Contenido de Micro nutrientes del suelo.....	51

8.3. Análisis Climatológico de las plantaciones de vainilla.....	52
8.4. Análisis Climático y Microclimático en 3 sistemas de Cultivo de vainilla.	54
8.4.1. Sistema Tradicional o Acahual.....	54
8.4.2. Sistema semi tecnificado o cielo abierto	55
8.4.3. Sistema en Invernadero o malla sombra	56
8.5. Caracterización física de los frutos verdes de vainilla.....	57
8.6. Contenido de humedad de los frutos verdes de vainilla.	58
8.7. Potencial Aromático de frutos verdes de vainilla.....	60
8.8. Evaluación del fertilizante en una plantación de vainilla.....	61
8.8.1. Características físicas del suelo	61
8.8.2. Fertilidad de suelo	62
8.8.3. Determinación de las características de los frutos.	63
8.8.4. Contenido de glucovainillina y potencial aromático	64
9. CONCLUSIONES	66
10. REFERENCIAS.	67

Índice de figuras

	Página
Figura 1. Planta de vainilla en periodo de floración.....	3
Figura 2. Flor, fruto y tallo de la planta de vainilla.....	4
Figura 3. Polinización manual de flores de vainilla.....	5
Figuras 4. Datos de series cronológicas sobre el desarrollo de frutos de (<i>V. planifolia</i>), longitud y diámetro (INIFAP).....	6
Figura 5. Características de los frutos de vainilla durante su maduración.....	7
Figura 6. Sistema de cultivo en acahual.....	8
Figura 7. Sistema de producción de vainilla en cielo abierto.....	9
Figura 8. Sistema de producción de vainilla en malla sombra.....	9
Figura 9. Esqueje o bejuco de vainilla listo para sembrar.....	11
Figura 10. Características del suelo.....	12
Figura 11. Preparación de composta para las plantas de vainilla.....	13
Figura 12. Sistema radicular de una planta de vainilla.....	14
Figura 13. Planta de vainilla dañada por Fusarium.....	15
Figura 14. Fruto de vainilla afectado por antracnosis.....	16
Figura 15. Hoja de vainilla con afectaciones causadas por roya.....	17
Figura 16. Tallo y hoja de vainilla con presencia de chinche roja.....	18
Figura 17. Gusano peludo en tallo de vainilla.....	19
Figura 18. Caracol y babosa en plantas de vainilla.....	19

Índice de tablas

	Página
Tabla 1. Técnicas utilizadas para el análisis de suelo.....	27
Tabla 2. Marcación, ubicación y referencias de las plantaciones evaluadas.....	30
Tabla 3. Características físicas del suelo.....	31
Tabla 4. Contenido de Materia Orgánica (MO), Macro y Micro nutrientes del suelo.....	34
Tabla 5. Análisis climatológico de las plantaciones de vainilla en el periodo 2010-2019.....	38
Tabla 6. Análisis climatológico de vainilla en sistema de acahual.....	40
Tabla 7. Análisis climatológico de vainilla en sistema de cielo abierto.....	41
Tabla 8. Análisis climatológico de vainilla en sistema de malla sombra.....	42
Tabla 9. Caracterización física de los frutos verdes de vainilla de las plantaciones estudiadas.....	43
Tabla 10. Contenido de humedad de los frutos verdes de vainilla de las plantaciones estudiadas.....	44
Tabla 11. Potencial aromático en frutos de vainilla de diferentes plantaciones.....	45
Tabla 12. Características físicas del suelo con y sin fertilizar.....	46
Tabla 13. Resultados de la fertilidad de suelo con y sin fertilizante.....	48
Tabla 14. Características físicas de los frutos de vainilla con y sin fertilizante.....	49
Tabla 15. Resultados de calidad aromática en frutos con sin fertilizante.....	50

1. INTRODUCCIÓN

La planta de vainilla (*Vanilla planifolia* Jacks ex Andrews) pertenece al género *Vanilla* y forma parte de la familia *Orchidaceae*; existen alrededor de 110 especies distribuidas en las zonas tropicales de México y el mundo (Soto & Dressler 2010). Es hemiepipíta, perenne, utiliza los árboles del bosque (selva alta perennifolia) en su hábitat natural como apoyo, sombra y humus natural. En México *V. planifolia* se cultiva con fines comerciales, debido a que es la más demandada en la industria; su cultivo comercial se originó los estados de Veracruz y Puebla (Lubinsky *et al.*, 2008). La vainilla se cultiva en los estados de Veracruz, Oaxaca, Puebla, Hidalgo, San Luis Potosí, Chiapas, Tabasco, Quintana Roo y Yucatán (Flores-Jimenez *et al.*, 2017; Parada-Molina *et al.*, 2022). *V. planifolia* se desarrolla en climas tropicales cálidos y húmedos a una altitud de 0 a 1100 msnm, humedad relativa mayor al 80 %, requiere una precipitación promedio anual de 2000 a 3000 mm, temperatura media entre 22 a 32 °C y temperaturas mínimas superiores a 10 °C, con un porcentaje de sombra de 50-70 % (Parada-Molina *et al.*, 2022). En México la vainilla se cultiva en 3 diferentes sistemas, el más utilizado es el sistema tradicional (acahual) que es un sistema agroforestal con diversidad de árboles nativos e introducidos; el sistema semi tecnificado (a cielo abierto o monocultivo), consistente en usar una sola especie arbórea y tener a la vainilla intercalada en él; y el sistema tecnificado (malla sombra), en el cual se utiliza una malla plástica de color negro (50 % a 80 % de sombra) que regula la luminosidad para simular las condiciones que requiere la vainilla de manera natural. Estos diversos sistemas de manejo de vainilla permiten regular y modular las condiciones térmicas, hídricas y la incidencia de la radiación, que influyen en la fotosíntesis y, por ende, en el desarrollo de este cultivo (Azofeifa-Bolaños *et al.*, 2014; Parada- Molina *et al.*, 2022). El aroma de las vainas de vainilla proviene principalmente de compuestos que se forman durante los últimos meses de crecimiento del fruto y se acumulan como glucósidos. Actualmente se han identificado más de 30 agliconas a partir del hidrólisis de estos precursores. En los frutos de *V. planifolia*, la glucovainillina es el principal precursor aromático, el 90% de la vainillina se almacena en forma glicosilada. El aroma se va

desarrollando durante la hidrólisis enzimática al inicio del beneficiado de las vainas. El beneficiado generalmente comienza con un tratamiento térmico, lo que provoca una desestructuración celular que favorece el contacto entre las β -glucosídicas intracelulares y los precursores glicosilados, lo que permite hidrolizar los enlaces β -1,4 de la glucovainillina y de esta forma liberar la vainillina (Pérez-Silva et al., 2021). Se han realizado estudios sobre el manejo agronómico de la vainilla, para evaluar la producción en frutos verdes y el desarrollo o crecimiento de la planta, mediante la aplicación de riego controlado y fertilizantes orgánicos. Sin embargo, la mayoría se han hecho a partir de variables físicas ya sea de la planta o del suelo, por lo que existe no hay información sobre trabajos que relacionen datos agroecológicos, climatológicos y calidad aromática de los frutos de vainilla.

El presente trabajo brinda información de la evaluación de las condiciones agronómicas y climáticas en la calidad aromática en los frutos de vainilla (*Vanilla planifolia*). Partiendo de una búsqueda bibliográfica de los diferentes sistemas de producción de vainilla, problemas que afectan la producción de la vainilla hasta los resultados obtenidos en el estudio de la influencia del clima, de las condiciones del manejo agronómico, que incluye nutrición, sistema del cultivo y el efecto de la fertilización en la calidad aromática de los frutos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. *Vanilla planifolia*.

La planta de vainilla (*Vanilla planifolia* Jacks ex Andrews) es una especie originaria de los bosques tropicales de Mesoamérica (Lubinsky *et al.*, 2008). Pertenece al género *Vanilla* y forma parte de la familia *Orchidaceae*; existen alrededor de 110 especies distribuidas en las zonas tropicales de México y el mundo (Ramírez *et al.*, 2007; Bory *et al.*, 2008). Es hemiepífita, perenne, utiliza los árboles del bosque (selva alta perennifolia) en su hábitat natural como apoyo, sombra y humus natural, es trepadora y de tallo flexible, cilíndrico, simple o ramificado, de color verde y está formado por entrenudos de cinco a 15 cm de longitud y de uno a dos centímetros de diámetros dispuestos en zigzag (Padilla-Vega, 2010). De sus frutos se obtiene la vainillina, considerada la sustancia aromática y saborizante más popular a nivel mundial (Bory *et al.*, 2008; Pérez-Silva *et al.*, 2011).



Figura 1. Planta de vainilla (*Vanilla planifolia*) en periodo de floración.

En términos generales es una planta en forma de bejuco o esqueje trepador de la cual florece una orquídea efímera que al ser polinizada da como resultado un fruto o capsula en forma de vaina por la cual lleva su nombre, Figura 1. Esta peculiar vaina al madurar es cosechada y beneficiada mediante un secado al sol para transformarla en vainilla, especia de la cual se extrae el aroma y sabor natural más popular del mundo

2.1.1. Características morfológicas.

Las hojas son de forma elíptica-oblonga, angostamente oblonga, raramente ovada, ampliamente elíptica u oblanceolada, algo oblicua, con los márgenes frecuentemente paralelos. (Soto & Dressler, 2010).

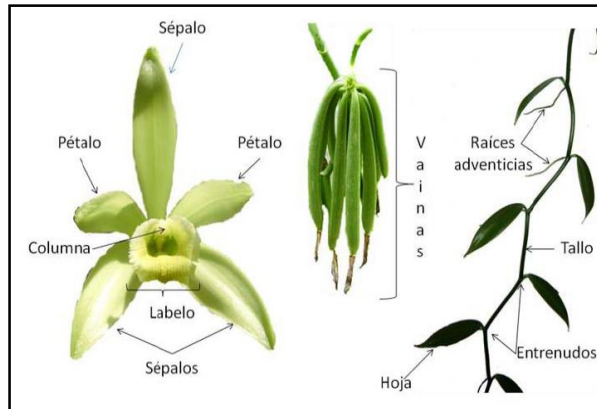


Figura 2. Flor, fruto y tallo de la planta de vainilla, (Padilla-Vega, 2010).

Las flores se presentan en inflorescencia o racimos conocidos como “raquis” y brotan de las axilas de las hojas; por lo general, son simples de 5 a 8 cm de longitud y agrupadas. La planta llega a tener de 10 a 15 racimos de flores, compuesto cada uno de por más de 10 flores individuales, las cuales son de color aperlado, blanco amarillento. El fruto es una cápsula dehiscente, que presenta tres costados cóncavos, en forma cilíndrica, de color verde brillante cuando inmaduro y el cual se torna verde, a amarillo, a café a medida que madura. Su longitud varía de 13 a 25 cm y su diámetro entre 10 y 15 mm como se aprecia en la Figura 2. (Padilla-Vega, 2010; Inifab, 2014).

2.1.2. Floración

La vainilla (*V. planifolia*) normalmente florece una vez al año, la primera floración ocurre tres años después de la siembra o cuando la vainilla se cultiva en casas de sombra, se inician en floración en el segundo año, incluso cuando se usan esquejes más pequeños (80–100 cm de largo), ya que las plantas tienden a crecer más vigorosamente como resultado de una mayor consistencia. (Odoux & Grisoni, 2011).

La floración es promovida por el estrés climático o mecánico. Los siguientes son algunos ejemplos:

a) Sequía: el estrés hídrico induce a que florezcan individuos reproductivamente maduros de vainilla y muchas otras plantas. (Anónimo, 2000, 2005).

b) Temperaturas frías: el principal estrés en México que induce a la floración son las bajas temperaturas de otoño-invierno, cuando las masas de aire frío conocidas como "nortes", temperaturas entre 12-14 °C.

c) Manejo de la planta: se recomienda a los cultivadores realizar una serie de tareas dos meses antes de la floración: (1) poda de la punta apical, al menos 10–15 cm, (2) suspensión temporal del riego, (3) uso abundante del riego una vez que se ha abierto el 10% de las floraciones (Odoux & Grisoni, 2011).

2.1.3. Polinización manual de flores

Para realizar la polinización de la flor de vainilla se utiliza como herramienta un palillo o cualquier otro material delgado con punta (figura 3), este puede ser opcional, plástico, metal, astillas o espinos según sea la disponibilidad de la región. Se toma la flor abierta y con la punta del “palillo” se rompe el labelo (pétalo modificado de la flor en forma tubular) para descubrir los órganos reproductivos de la flor.



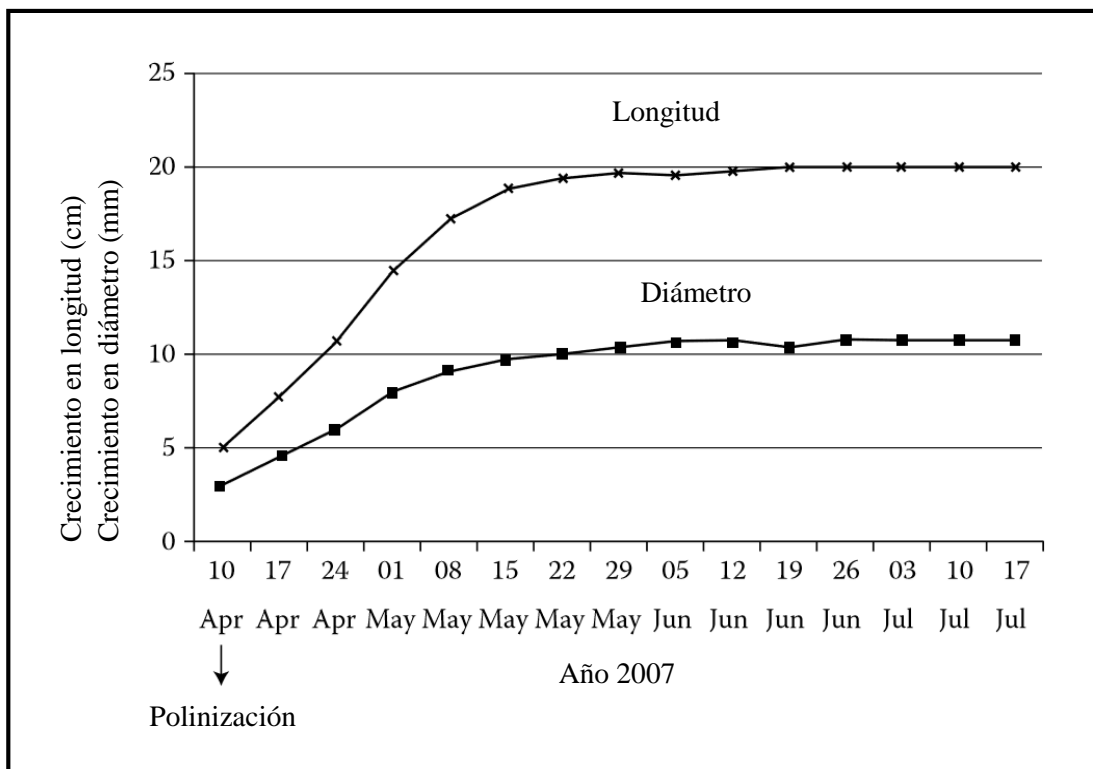
Figura 3. Polinización manual de flores de vainilla.

Con la punta del palillo, se levanta el róstelo (membrana que separa la parte masculina y femenina de la flor) para que la antera haga contacto con el estigma. Enseguida con el dedo pulgar e índice, se presiona ligeramente la antera para que su polen se adhiera al estigma y casi al mismo tiempo, se retira el “palillo”.

2.1.4. Desarrollo del fruto.

Una vez que se haya realizado la polinización manual de las flores, comienza el proceso de desarrollo y maduración del fruto, el proceso ocurre muy rápido ya que inmediatamente después de la polinización manual, los tubos de polen comienzan su germinación, crecimiento y la fecundación final de los óvulos.

A nivel fisiológico dentro de la flor fecundada el ovario comienza a agrandarse rápidamente y asume un aspecto verde oscuro y fuerte a medida que se orienta hacia abajo toma una forma cilíndrica alargada a lo cual comúnmente se le conoce como vaina de vainilla la cual es una capsula de color verde. A medida que pasan los días la longitud y diámetro máximo de la fruta de vainilla se alcanza regularmente entre los 40 y 50 días después de la polinización manual Como se puede observar en la Figura 4. A partir de entonces, el crecimiento cesa y la fruta entra en un período de maduración que dura aproximadamente de 7 a 8 meses (Odoux & Grisoni, 2011).



Figuras 4. Datos de series cronológicas sobre el desarrollo de frutos de (*V. planifolia*), longitud y diámetro (INIFAP, México).

2.1.5. Cosecha

Este aspecto tiene que ver con la madurez de la fruta ya que los indicadores de cuándo cosechar vainilla es cuando la vaina alcanza su madurez comercial, y puede observarse cuando el punto distal de la fruta cambia de verde a amarillo (Figura 5), generalmente 8–9 meses después de la polinización.

Existen problemas relacionados con la cosecha cuando el corte se realiza antes de los 8 meses ya que está demostrado que los frutos cosechados a temprano tiempo pesan menos y son más susceptibles al ataque de hongos y, ya que cuando son beneficiados, producen cantidades más pequeñas de vainillina debido a que sus precursores glucosilados aún no se encuentran en cantidades suficientes para cumplir con la calidad aromática (Pérez-Silva *et al.* 2018).

Otro aspecto de importancia en la cosecha es cuando los frutos son cosechados en una fecha tardía es decir después de los últimos nueve meses ya que a ese tiempo de madurez los frutos comienzan a abrirse, y cambian de verde a amarillo a marrón oscuro o negro. Se debe tener especial interés ya que estas frutas se tienen menos valor (Odoux & Grisoni, 2011).



Figura 5. Características de los frutos de vainilla durante su maduración.

2.2. Sistemas de cultivos para la producción de vainilla en México.

La vainilla es cultivada bajo sistemas con distinta intensidad de manejo, los cuales permiten regular y modular las condiciones térmicas, hídricas y la incidencia de la radiación, que influyen en la fotosíntesis y, por ende, en el desarrollo de este cultivo.

2.2.1. Tradicional o acahual.

Está basado en un sistema agroforestal con diversidad de árboles nativos e introducidos, consiste en limpiar el terreno para establecer la plantación en la época de lluvia, Figura 6.

Se seleccionan los árboles grandes con buena sombra, las especies arbustivas se podan a una altura de 2 m para usarlas como tutor, acción que nos permitirá una mejor condición de manejo del material y evitar que las guías crezcan a más de 8 metros de altura donde no puede practicarse la polinización manual (Curtí-Díaz 1995).



Figura 6. Sistema de cultivo en acahual.

2.2.2. Cielo abierto o monocultivo.

Consistente en usar una sola especie arbórea y tener a la vainilla intercalada en él, bajo este sistema de producción se utilizan en su mayoría los tutores que se emplean son cítricos u especies propias de la zona, con el objetivo de ofrecer una buena condición de sombra para la vainilla, véase Figura 7. En este sistema es recomendable realizar podas de las ramas laterales e inferiores para controlar el

exceso de sombra y la aireación del suelo, con el fin de facilitar las actividades de manejo de la planta. Se recomienda agregar composta en el suelo sobre las raíces de la planta en proporciones de 10 kg de lombricomposta y 20 kg materia orgánica (hojarasca) en un radio de 1.5 m alrededor del tronco, esto permitirá mantener las raíces de la vainilla cubiertas sanas y bien fertilizadas (Curtí-Díaz 1995).



Figura 7. Sistema de producción de vainilla en cielo abierto.

2.2.3. Malla sombra o Invernadero.

Este sistema de producción trata de asimilar las condiciones que requiere la vainilla en forma natural como se muestra en la figura 8.

La regulación de sombra se logra colocando malla color negro al 50 % a 80 % de sombra, la humedad se satisface con un sistema de riego ya sea por goteo o aspersión. Esto permite un microclima ideal semejante a las que ofrecen el dosel de los árboles para el manejo de vainilla en áreas de pequeñas superficies (Curtí-Díaz 1995).



Figura 8. Sistema de producción de vainilla en malla sombra (A) e invernadero (B)

2.3. Condiciones climáticas y agronómicas del cultivo de vainilla.

2.3.1. Clima

V. planifolia prospera en climas tropicales cálidos y húmedos (Odoux & Grisoni, 2011).

2.3.2. Temperatura.

V. planifolia crece mejor a temperaturas que varían de 20 °C a 30 °C (Childers y Cibes, 1948; Ranadive, 2005), y puede tolerar temperaturas altas de 32 °C (Purseglove *et al.*, 1981; Anandaraj *et al.*, 2005). Las temperaturas por debajo de 20 °C inhiben el crecimiento de las plantas y la intensidad de la floración (Ranadive, 2005); temperaturas superiores a 32 °C causan el amarilleo de las partes vegetativas y la caída prematura de los frutos (Anandaraj *et al.*, 2005; Hernández., 2007).

2.3.3. Precipitación.

V. planifolia requiere una precipitación promedio anual de 2000 a 3000 mm (Sasikumar *et al.*, 1992; Soto-Arenas, 2003), está bien distribuida durante todo el año, excepto durante la floración / polinización. Debido a que las fuertes lluvias pueden disminuir la polinización exitosa, es mejor regar las plantas en sus bases durante la floración. *V. planifolia* necesita de 2 a 3 meses relativamente secos para estimular la floración. En áreas donde la precipitación anual promedio supera los 3000 mm, las plantas son más propensas a los ataques de hongos (por ejemplo, *Fusarium sp.*). En el otro extremo, es decir, donde la precipitación es inferior a 2000 mm, y cuando no existe un sistema de riego, la falta de agua compromete en gran medida la capacidad de la planta para realizar funciones fisiológicas básicas (Odoux & Grisoni, 2011).

2.3.4. Altitud.

Las mejores altitudes para cultivar *V. planifolia* se encuentran entre el nivel del mar y 600 m (Flores-Jiménez 2017), aunque los sistemas de cultivo ocurren tan alto como 1100 msnm en México (Soto, 2003). En la India, se informa que *V. planifolia*

se cultiva hasta 1500 msnm (Anandaraj *et al.*, 2005), y en Uganda, el cultivo se practica con éxito entre 800 y 1200 msnm (Odoux & Grisoni, 2011).

2.3.5. Luz/sombra.

V. planifolia muestra un crecimiento más vigoroso bajo 50% de sombra. En los períodos secos con luz solar intensa, es preferible utilizar una sombra de 50 a 70% (Hernández., 1943; Ranadive, 2005) para una mejor conservación del suelo y la humedad del aire. En periodos lluviosos, la cantidad de sombra debe reducirse a 30-50% para evitar crear condiciones favorables para el crecimiento de patógenos. El exceso de sombra causa un crecimiento débil y una pobre producción de flores, mientras que el exceso de luz solar quema las hojas y los tallos, así como la caída temprana de los frutos. Las plantas que sufren demasiada luz solar o sombra son las que tienen más probabilidades de desarrollar enfermedades (Odoux & Grisoni, 2011).

2.3.6. Selección y propagación del material vegetativo.

La propagación se realiza por esquejes o bejuco, este debe de ser por lo menos de 80 cm de longitud con cuatro o cinco yemas viables (figura 6), proveniente de lotes de vainilla en producción considerando lo siguiente: productividad, sanidad y vigor.



Figura 9. Esqueje o bejuco de vainilla listo para sembrar.

2.3.7. Características físicas del suelo.

El suelo debe contener una buena cantidad de materia orgánica y un drenaje que permita el flujo eficiente del agua a través de él, se recomienda que el pH sea de 6 a 7 para evitar problemas de baja disponibilidad de macro elementos y que la planta sea orientada hacia el este para aprovechar los rayos del sol matutinos, figura 10.



Figura 10. Características del suelo.

2.3.8. Preparación de composta

La composta más común para la vainilla proviene de la hojarasca en descomposición que se deriva de la caída de las hojas de los árboles, la poda y de las plantas herbáceas en la vainilla (figura 11).

La corteza de árbol descompuesta y en descomposición también se utiliza en forma de aserrín. Cuando no se encuentra material vegetal orgánico suficiente en el vainillal, la composta puede hacerse con rastrojo de kudzu (*Pueraria phaseolides*), pasto elefante (*Pennisetum sp.*) o pasto de Guinea (*Panicum maximum*) (Bouriquet, 1954; Ranadive, 2005).

La fibra de coco también es un acolchado popular porque es poroso, liviano y tiene una excelente capacidad para retener la humedad y conservar un microclima apropiado para promover el crecimiento de las raíces. El aserrín debe tener muy poca humedad ya que en estado fresco puede contener sustancias tóxicas para plantas tales como fenoles, resinas, terpenos y taninos.

El estiércol entre menos humedad tenga es mejor ya que el estiércol fresco no está bien descompuesto también y puede quemar o causar la pudrición de la raíz y la mortalidad. Finalmente, al contar con todos estos materiales es importante realizar una mezcla de todos los ingredientes para después aplicarlos a las plantas de vainilla (Odoux & Grisoni, 2011).



Figura 11. Preparación de composta para las plantas de vainilla.

De acuerdo a Odoux & Grisoni (2011), la distribución de nutrientes, la composta tiene los siguientes beneficios:

- (1) ayuda a mantener la humedad del suelo,
- (2) sirve como un sustrato poroso, ayuda en la aireación del suelo y permite el desarrollo sin restricciones de las raíces
- (3) mantiene una temperatura adecuada
- (4) disminuye la incidencia de malezas.

Por otro lado, es importante mencionar que las coberturas aumentan la actividad biológica de los microorganismos y promueven el desarrollo de asociaciones de micorrizas (Porras Afaro & Bayman, 2007).

2.3.9. Nutrición.

Tanto las raíces aéreas como las que tienen contacto con el suelo tienen funciones de asimilación de nutrimentos importantes para el desarrollo de *V. planifolia*, figura 12.

Los nutrientes más importantes para la vainilla son calcio, potasio, nitrógeno, fósforo, hierro y cobre. Los niveles normales u óptimos de nutrición requeridos por la vainilla no se han estudiado en detalle, y en la práctica, los requerimientos nutricionales de la vainilla se deducen de las especies hortícolas de otros miembros de las Orchidaceae (Cibes *et al.*, 1947; Childers *et al.*, 1959; Domínguez, 2005; Ranadive, 2005).



Figura 12. Sistema radicular de una planta de vainilla.

En general, En México la vainilla no se fertiliza más allá del aprovisionamiento de la composta. Sin embargo, en la India recomiendan a los productores que apliquen 40–60 g de nitrógeno, 20–30 g de fósforo (P_2O_5) y 60–100 g de potasio (K_2O) por planta por año. También se recomiendan los aerosoles foliares, como las aplicaciones del 1% de fertilizante Triple 17 (17:17:17) una vez al mes para estimular el crecimiento y la floración (Anandaraj *et al.*, 2005).

2.4. Plagas y enfermedades del cultivo de vainilla.

2.4.1. Pudrición de la raíz.

Es causada por el hongo *Fusarium oxysporium vanillae* es el mayor problema en las plantaciones de vainilla. Tiene los siguientes síntomas: las plantas empiezan a marchitarse, las hojas se cuelgan hacia abajo y se tornan amarillas. El tallo se seca y se marchita cerca del suelo y finalmente la planta muere, véase figura 13.

Se recomienda eliminar todas las plantas y las raíces afectadas, quemándolas y traer tierra fresca. Debe escarbarse hacia fuera y eliminar la tierra afectada, No se recomienda replantar de inmediato, sino hasta la siguiente temporada y asegurarse de que la zona afectada tenga buen drenaje. Prevención: Aplicaciones de *Trichoderma harzianum*, buen drenaje en el suelo mediante la aplicación de material orgánico como hojarasca, palo podrido, pasto seco, etc. (SAGARPA 2015).



Figura 13. Planta de vainilla dañada por Fusarium.

2.4.2. Quemaduras por el sol.

Causadas por problemas fisiológicos. El síntoma es que las hojas se tornan de un color amarillo claro. Prevención: aumentar los niveles de sombra y plantar un número adecuado de las especies apropiadas de sombra, para poder mantener la sombra en niveles correctos

2.4.3. Antracnosis.

Es causada por el hongo *Colletotrichum vanillae* que puede atacar el tallo, las hojas y las vainas, sobre todo en la época fría; puede presentarse en las flores también (figura 14). Cuando los frutos son atacados presentan una maduración prematura, se reduce el valor comercial y caen. Se caracteriza por la aparición de pequeñas manchas café al principio, después se tornan de color café hundidas, las cuales se mueren progresivamente hasta formar lesiones grandes que detienen el crecimiento de la planta. Estas lesiones pueden ser la puerta de entrada para el *Fusarium oxysporium vanillae*, que puede secar a toda la planta.

Prevención: Aplicaciones de *Trichoderma harzianum*, buen manejo de la sombra. Cuando el problema es grave hacer aplicaciones intercaladas de Maneby Benomyl®, se aplican en dosis de 3 y 1 gramo respectivamente por litro de agua, más un adherente a la dosis de la etiqueta (SAGARPA 2015).



Figura 14. Fruto de vainilla afectado por antracnosis.

2.4.4. Roya.

Causada por el hongo *Uromyces joffrini*. Esta enfermedad es menos frecuente que las anteriores, sin embargo, en las plantaciones con exceso de sombra, los problemas de ventilación y de humedad abundante, pueden causar serios daños. Ataca principalmente las hojas de la planta de vainilla en forma de pústulas o puntos

de color amarillo anaranjado, lo que, al avanzar el ataque, llegan a secar a toda la hoja, como lo muestra la figura 15.

Prevención: Puede prevenirse con la regulación de la sombra y evitando el exceso de acumulación de humedad mediante una buena ventilación de la plantación de vainilla. Las hojas y tallos dañados se colecten y sean quemados para reducir el inóculo de la enfermedad (SAGARPA 2015).



Figura 15. Hoja de vainilla con afectaciones causadas por roya.

2.4.5. El amarillento y caída de frutos tiernos.

Este se presenta cuando las temperaturas son altas, mayores de 32 °C y una humedad relativa baja, menor de 80%, principalmente en la primera quincena de junio, o sea, dos meses después de la polinización. Este problema ocurre aún en plantaciones con riego, así como en plantas vigorosas y aparentemente sanas. Generalmente, se amarillan y caen los frutos, a los que se les ha caído el residuo floral (SAGARPA 2015).

2.4.6. La chiche o Piojo Rojo (*Tentecoris confusus*).

El adulto mide de 5 a 6 milímetros, es de color rojo y tiene el cuerpo cubierto de una coraza de color negro en forma de escudo (figura 16); al salir del huevecillo, en el estado de ninfa, es de color claro y mide un milímetro menos. Esta plaga insectil es la más dañina para la planta de vainilla. Si las poblaciones son bajas, se recomienda control manual, ya que se aglomeran en el envés de la hoja y resulta fácil eliminarlas con las manos, las cuales se secan con el ataque de los insectos. También se alimentan de los tallos y de las vainas. Se considera que el daño más grande que

le ocasiona a la planta son las heridas, por las cuales puede penetrar el hongo *Fusarium*. Tan pronto se observen huevecillos y ninfas, deberá hacerse una liberación de *Chrys* o *Pertarufilabris*. Si la plaga llega a niveles que se consideren peligrosos, en casos extremos pueden utilizar dos aspersiones de Malathion, en dosis de 1.5 mL. por litro de agua, pero cuando se dirija la aspersión, esta debe ir al envés de las hojas, para lograr mayor efectividad del tratamiento (SAGARPA 2015).



Figura 16. Tallo y hoja de vainilla con presencia de chinche roja.

2.4.6. Gusano Peludo (*Prusia aurífera*).

Las larvas de este insecto son de color café oscuro o negro; se alimentan de las partes tiernas de la planta (hojas y meristemos o cogollos), lo cual retrasa el crecimiento y la producción (figura 17).

El hongo *Fusarium* puede penetrar en la planta de vainilla atacada, por las heridas que causan las larvas del gusano peludo. La inspección o monitoreo de las plantas, para detectar los huevecillos de esta plaga ayudará a definir el momento oportuno para utilizar las liberaciones de la avispa *Trichogramma pretiosum*, la cual ayudará a romper el ciclo de reproducción biológica de esta plaga, se recomienda el uso de las aspersiones de un insecticida biológico a base de *Metarhizium anisopliae*, de 250 a 500 gramos por ha. Aplicaciones de Neem a dosis de 50 gramos por ha. Solamente en el caso extremo, entonces deberán procederse a utilizar aspersiones de Malation (SAGARPA 2015).

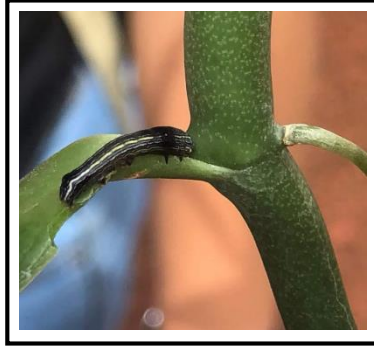


Figura 17. Gusano peludo en tallo de vainilla.

2.4.7. Caracoles y Babosas.

Estas plagas se alimentan de las partes jóvenes de las plantas. Se encuentran entre la materia orgánica y generalmente son de hábito nocturno, figura 18. Se les controla con cebos envenenados, con las fórmulas tradicionales a base de formaldehídos para éstos casos, los cuales se distribuyen en los sitios en donde se observe el daño (SAGARPA 2015).



Figura 18. Caracol y babosa en plantas de vainilla.

2.5. Calidad aromática.

2.5.1. Aroma vainilla.

El aroma vainilla es una mezcla compleja de diferentes compuestos volátiles. Se han identificado 250 compuestos volátiles en muestras de vainilla de diferente origen (Adedeji *et al.*, 1993, Pérez-Silva *et al.*, 2006). Los más importantes son: la vainillina, el p- hidroxibenzaldehído, el ácido vainillínico y el ácido p- hidroxibenzoico. Siendo la vainillina el principal responsable del aroma de la vainilla. Se han detectado 26 compuestos aromáticos mediante análisis de cromatografía de gases-olfatometría de extracto orgánico de vainilla beneficiada, de los cuales incluyen derivados de shikimato (11), ácidos orgánicos (5), aldehídos (4), ésteres (3), cetonas (2) y un alcohol alifático. La mayoría de estos compuestos no están presentes en las vainas verdes ya que se encuentran presentes como precursores glucosídicos inodoros, como la vainillina y la mayoría de los derivados del shikimato. Por lo tanto, se necesita un proceso específico, llamado “curado”, para iniciar su formación (Pérez-Silva *et al.*, 2006).

2.5.2. Precursores glucosilados.

El aroma de las vainas de vainilla proviene principalmente de compuestos que se forman durante los últimos meses de crecimiento de la fruta y se acumulan como glucósidos. Actualmente, se han identificado más de 30 agliconas a partir del hidrólisis de estos precursores. En los frutos de *V. planifolia*, la glucovainillina es el principal precursor aromático y representa hasta el 6 % del peso seco (Peña-Mojica *et al.*, 2019), y se almacena en el mesocarpio en los orgánulos de feniloplasto. En frutos maduros, el 90% de la vainillina se almacena en forma glicosilada. Las diferencias de los perfiles aromáticos en las vainas de vainilla están relacionadas por factores como la especie, la madurez de la vaina, el lugar de producción y el beneficiado (Perez Silva *et al.*, 2016; 2021).

2.5.3. Glucovainillina

La glucovainillina es el glucósido más abundante presente en *Vanilla planifolia*, la hidrólisis enzimática de la glucovainillina permite la liberación de la vainillina durante el beneficiado de la vainilla. La hidrólisis de la glucovainillina ocurre en la última etapa de maduración de la fruta (durante la senescencia), y el beneficiado de la vainilla durante las etapas de marchitamiento y sudado, originando una descompartimentación celular, permitiendo el contacto de las enzimas endógenas de la vaina (β -glucosidasas) con la glucovainillina, obteniendo de esta manera glucosa y vainillina (Odoux *et al.*, 2000; 2006).

2.5.4. Potencial aromático

El potencial de vainillina en frutos maduros se determina sumando el contenido de vainillina libre y el 48,4% (= relación de pesos moleculares de vainillina/glucovainillina) del contenido de glucovainillina (Pérez-Silva *et al.*, 2021). Durante el proceso de beneficiado o secado tradicional, la concentración de vainillina libre va de 0.2 a 2.3 g/100 g m.s., mientras que la concentración de vainillina total se mantiene constante, con un valor promedio de 5,4 g/100 g m. s. La tasa de hidrólisis al final de la etapa de sudoración 2 es del 43%, lo que concuerda con los resultados obtenidos en Reunión cuando se monitoreó un proceso de curado tradicional (Odoux, 2000).

3. ANTECEDENTES

1. Sujatha & Bhat (2010), evaluaron el efecto del riego y nutrición del suelo en el cultivo de vainilla (*Vanilla planifolia* A.) en la India, mediante un ensayo de campo de 5 años para evaluar el impacto del riego de microsprinkler, la aplicación de fertilizante recomendado (60:17:83 kg N:P:K ha) y estiércol orgánico en forma de vermicompost en la producción de vainilla. Los análisis indicaron que el riego por microsprinkler dio lugar a un rendimiento de vainas verdes de 842 kg/ha, la aplicación de estiércol orgánico en forma de vermicompost (720 kg/ha), el NPK recomendado fue de (718 kg/ha).
2. Grisoni *et al.* (2011), realizaron un diagnóstico de la producción de vainilla en la región del Totonacapan, mediante visitas a vainillales, levantamiento de encuestas y entrevista con productores de vainilla de la región de mayor producción en Veracruz, los resultados demostraron que se detectó un aborto prematuro de los frutos. El 80% de la producción de vainilla se perdió. La principal causa fue atribuida al cambio climático por las altas temperaturas registradas en los últimos años.
3. Flores - Jiménez *et al.* (2017), evaluaron los perfiles bioclimáticos en México de la diversidad de *Vanilla spp.* (*Orchidaceae*). Se obtuvo el perfil bioclimático de cada especie considerando 19 variables de World Clim, y altitud a una resolución espacial de aproximadamente 1 Km². Se obtuvieron los intervalos de las condiciones ambientales extremas (mínimo, promedio y máximo) para cada una de las especies de vainilla, en conclusión *V. planifolia* presentó un rango altitudinal promedio de 0 a 1 650 m.s.n.m., mayor rango de adaptabilidad a la precipitación de 1 021 a 4 450 mm y temperatura la cual fue de 16.7 a 27.8 °C.

4. Pérez - Silva *et al.* (2018), evaluaron la evolución del contenido de glucovainillina y de la actividad β -glucosidasa durante el desarrollo de los frutos de vainilla (*Vanilla planifolia*). Se estudiaron frutos de 2 lotes a partir del 5to. mes de madurez hasta los 10 meses, a los cuales se les determinó la actividad enzimática de la β -glucosidasa mediante un espectrofotómetro y cuantificación de glucovainillina por HPLC-DAD. Tanto la actividad enzimática de la β -glucosidasa como la concentración de glucovainillina tuvieron un aumento significativo a partir del 8vo. mes con una actividad de 823 nkatal/g, 884 nkatal/g y 12.5, 13.02 g/100 g m.s. respectivamente, por lo cual se recomienda realizar la cosecha de la vainilla, cuando las vainas tengan una madurez de al menos 8 meses después de ser polinizadas.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El efecto del calentamiento global en el cultivo de vainilla a derivado escenarios adversos para producir frutos de calidad como lo son la caída prematura de frutos, retrasos en la floración, amarillamiento de la hoja entre otros, a causa de condiciones climáticas muy intensas y cambios agroecológicos que están siendo cada vez más evidentes y que sin duda afecta en la producción anual de cada productor y por ende en el sustento de sus familias, familias que buscan una solución para acondicionar sus cultivos y producir frutos de calidad y poder soportar los inevitables cambios ocasionados por el calentamiento global.

5. JUSTIFICACIÓN

Muchos de los productores de vainilla esperan que después del beneficiado sus vainas cuenten con las condiciones de calidad que los mercados nacionales e internacionales especifican, como el tamaño de las vainas y cantidad de vainillina. Sin embargo, muchos productores no pueden vender su producto debido a esos factores y el resultado de no lograr una producción de calidad internacional propicia vender el producto más barato y en consecuencia parte de los pequeños y medianos productores abandonan del cultivo por no recuperar su inversión y sin duda es un problema grave. Esta necesidad nos lleva a identificar tres aspectos importantes para la comercialización de vainilla natural los cuales son: el sistema de cultivo, manejo agronómico y el contenido del principal precursor aromático (glucovainillina). Es por ello que, al caracterizar las condiciones climáticas y agronómicas del cultivo, en diferentes sistemas de producción, además de evaluar el potencial aromático de los frutos, se puede generar información científica que permita proponer alternativas que promuevan una mayor producción de vainilla con excelente calidad aromática. Generando a los productores mejoras económicas.

6. OBJETIVOS

6.1 Objetivo general

- Evaluar las condiciones agronómicas y climáticas en la calidad aromática de la vainilla (*Vanilla planifolia*) producida en México.

6.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las condiciones agronómicas y climáticas de las zonas de producción de vainilla a estudiar (previamente seleccionadas y georreferenciadas).
- Evaluar las condiciones microclimáticas de diferentes sistemas de cultivo establecidos a diferente altitud, mediante la instalación de una Red Climatológica.
- Realizar la caracterización física, actividad enzimática y aromática de los frutos de *Vanilla planifolia* obtenidos después de los 8 meses de su polinización.
- Evaluar la calidad de los frutos de vainilla como resultado de la aplicación de un abono órgano-mineral (fertilizante) en una parcela en estudio.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Identificación y georreferenciación de las plantaciones.

Se seleccionaron 8 plantaciones de *V. planifolia* con diferentes sistemas de cultivo y diferente altitud en los estados de Oaxaca, Veracruz y San Luis Potosí con ayuda de productores e industriales de vainilla, se realizó una geolocalización de las plantaciones mediante la plataforma del INEGI, mapa Digital de México para referenciar (Tabla 2) las especificaciones geográficas de cada plantación.

7.2. Polinización manual y colecta de los frutos

La polinización de las flores se realizó de manera manual, con ayuda de los productores quienes apoyaron a monitorear el periodo de floración sobre todo en los lugares donde no se tuvo acceso debido a la pandemia del COVID19. Los frutos de *V. planifolia* fueron cosechados aproximadamente 8 meses después de su polinización, posteriormente los frutos fueron recibidos y analizados en el laboratorio, donde se llevó a cabo la caracterización física, humedad y potencial aromático mediante la determinación del contenido de glucovainillina.

7.3. Caracterización agronómica de las plantaciones.

Se realizó un muestreo de suelo (NMX-AA-132-SCFI-2016) en 4 plantaciones ubicadas en el estado de Oaxaca durante el periodo de floración para realizar el análisis de fertilidad de suelo (NOM-021-RECNAT-2000) a través de FertiLab®, Laboratorio de fertilidad de suelos ubicado en Guanajuato, en los que se determinaron las variables físicas (Tabla 1): clase textural, acidez del suelo: pH, punto de saturación. (%), capacidad de campo. (%) y densidad aparente. (g cm^3) y variables de fertilidad: materia orgánica: MO, macro elementos N, P, K, Mg. (ppm) y micro elementos B, Cu, Fe, Zn. (ppm).

Tabla 1. Técnicas utilizadas para el análisis de suelo.

Análisis	Métodos
Textura del suelo	Método Bouyoucos
Punto de Saturación	Método gravimétrico
Capacidad de Campo	Método gravimétrico
Densidad aparente	Método de la probeta modificado
pH	Método relación 1:2 (suelo:agua)
Materia Orgánica	Método Walkley and Black
Fósforo	Método Bray y Kurtz
Nitrógeno inorgánico	Micro-Kjeldahl
Potasio, Magnesio	Acetato de Amonio 1N, pH 7
Micronutrientes (Fe, Zn, Cu, B)	Método DTPA-Sorbitol pH 7

7.4. Caracterización de las condiciones climáticas.

A través de la información estadística climatológica proporcionada en la página Web de la Comisión Nacional del Agua mediante el Servicio Meteorológico Nacional se seleccionaron 8 estaciones climatológicas cercanas a cada plantación para realizar un monitoreo de los promedios diarios de temperatura (°C) y precipitación anual acumulada (mm) durante el periodo 2010 – 2019.

7.5. Caracterización de las condiciones Micro climáticas.

3 estaciones climatológicas de la marca Davis Vantage Pro2® fueron instaladas en plantaciones con sistemas de cultivo tradicional, semitecnificado y tecnificado para el monitoreo de las variables de temperatura (°C), precipitación (mm), humedad relativa, HR (%) y déficit de presión de vapor, DPV (kPa) durante el periodo diciembre-2020 a noviembre-2021 el cual fue clasificado en 4 temporadas, temporada fría-seca (**DEF**), cálida-seca (**MAM**), cálida-húmeda (**JJA**) y fría-húmeda (**SON**).

7.6. Evaluación de fertilizante en plantación de vainilla.

El estudio fue realizado durante la producción de vainilla del año 2019. La plantación de vainilla con una superficie de 1/2 hectárea. La cual estaba ubicada en la comunidad “La Florida”, Santa María Jacatepec, Oaxaca a una altitud de 137 msnm con un sistema de producción agroforestal (acahual, con relieve irregular y con una pendiente de 35°). Se seleccionaron 6 plantas con frutos, 3 plantas sin tratamiento (LFS) y 3 plantas tratadas con un fertilizante (LFC), a las cuales se les aplicó el fertilizante órgano-mineral líquido de la marca NUTRIQUICKER FOLIGROW® FORTE 20-10-20 que contenía nitrógeno, fósforo, potasio, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos. El volumen de aplicación por planta fue de 10 L con una dosis de 250 mL del producto. Se realizaron aplicaciones cada 30 días a partir del tercer mes de desarrollo de los frutos hasta el séptimo mes, la aplicación se realizó vía fertirriego al sistema radicular de la planta. Los frutos fueron cosechados al octavo mes después de la polinización de las flores.

7.7. Caracterización física de los frutos verdes

Se obtuvieron los promedios de la medición de los frutos de acuerdo a su longitud (cm), peso (g) y grosor(cm), la longitud se obtuvo mediante un flexómetro para identificar los frutos más largos, el peso utilizando una balanza eléctrica y el grosor con un Vernier electrónico.

7.8. Determinación de humedad en vainas verdes

Para la determinación del contenido de humedad cada muestra se analizó por triplicado mediante el método gravimétrico, según Odoux, 2000. Se pesaron aproximadamente 1 g de muestra en una balanza analítica marca Discovery modelo BL 210S, posteriormente las muestras se colocaron en una estufa de secado a 110 °C durante 24 h.

7.9. Determinación de la actividad enzimática de la β -glucosidasa

La determinación se llevó a cabo de acuerdo a lo establecido por Pérez Silva *et al.*, 2011, 10 g de muestra fueron molidos con 50 mL Buffer fosfato de sodio a pH 7, posteriormente fue filtrada con papel Whatman No. 4., se adiciono el sustrato el *p*-nitrofenil- β -glucopiranosido (*p*NPG) en la solución de fosfato de sodio con la solución enzimática por un tiempo de 20 minutos a una temperatura de 40 °C, finalmente la hidrólisis se detuvo por adición de solución de NaOH a 0.1 N para posteriormente realizar un análisis de espectrofotometría utilizando un espectrofotómetro de la marca Agilent Cary 60 UV-Vis a una longitud de onda de 400 nm.

7.10. Cuantificación del potencial en vainillina por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC-DAD)

La determinación de la glucovainillina, se realizó mediante una extracción en baño ultrasónico y fue analizado por HPLC. Se pesó el polvo de vainilla verde, posteriormente los compuestos volátiles fueron extraídos en una mezcla de solventes metanol-agua acidificada la mezcla fue sometida a efectos ultrasónicos en el equipo Elmasonic P, modelo D78224 a temperatura ambiente durante 10 minutos, los extractos fueron pasados a través de un filtro de 120 mm y 0.45 μ m de diámetro (Pérez-Silva *et al.*, 2011). Cada extracción fue realizada por duplicado, y posteriormente fueron analizadas en un (HPLC-DAD).

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. Identificación y geolocalización de las plantaciones.

A través de los vínculos que el Instituto Tecnológico de Tuxtepec tiene con productores e industriales de diferentes estados se seleccionaron 8 plantaciones las cuales fueron georreferenciadas con ayuda de los datos del INEGI, Mapa digital de México y el Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS 84)., la tabla 2 muestra la ubicación de las plantaciones en los estados de Oaxaca, Veracruz y San Luis Potosí., las diferentes plantaciones cuentan con 3 sistemas de cultivos de las cuales 4 son Tradicional o Acahual, 2 de Semi-tecnificado o Cielo Abierto y 2 en Tecnificado o Malla sombra, la elevación de las plantaciones varía desde los 20 hasta los 1250 msnm lo que es bueno ya que se puede tener un estudio más profundo sobre la implicación de la altitud en el cultivo de vainilla.

Tabla 2. Marcación, ubicación y referencias de las plantaciones evaluadas

Plantación	Ubicación	Coordenadas	Altitud	Sistema
		Latitud/longitud	m.s.n.m.	de Cultivo
TCL	Fuerte de Anaya, Tecolutla, Veracruz.	N 20° 17' 52.001" / O 96° 58' 51.001"	20	Semitecnificado
				Cielo Abierto
GTZ	El Ojite, Gtz. Zamora, Veracruz.	N 20° 27' 37.031" / O 97° 10' 24.213"	30	Tecnificado
				Malla Sombra
TMZ	Tamazunchale, San Luis Potosí.	N 21° 15' 39.723" / O 98° 47' 25.675"	120	Tradicional
				Acahual
LFA	La Florida, Jacatepec, Oaxaca.	N 17° 52' 33.501" / O 96° 12' 19.232"	137	Tradicional
				Acahual
LSR	Loma San Rafael, Valle Nal., Oaxaca.	N 17° 54' 23.255" / O 96° 20' 31.318"	475	Tradicional
				Acahual
MSG	Mesa de Gpe., Alto Lucero, Veracruz.	N 19° 33' 59.938" / O 96° 42' 19.693"	860	Tecnificado
				Malla Sombra
SMR	San Miguel Reaguí, Camotlán, Oaxaca.	N 17° 27' 34.429" / O 96° 13' 52.594"	1020	Tradicional
				Acahual
JLT	La Concepción, Jilotepec, Veracruz.	N 19° 36' 21.361" / O 96° 53' 56.984"	1250	Semitecnificado
				Cielo Abierto

8.2. Evaluación Agronómica

8.2.1. Evaluación de la textura del suelo.

La clase textural del suelo es muy importante en la agricultura ya que dependiendo de la estructura del suelo puede o no aventajar el desarrollo de cualquier cultivo sobre todo en los cultivos en los que el crecimiento radicular sea en base a raíces no muy profundadas que necesiten poca compactibilidad ya que las raíces puedan ser superficiales, donde la nutrición radicular depende más del equilibrio entre los nutrientes del suelo y el contenido de materia orgánica, en forma de composta como es el cultivo de vainilla.

En base a los resultados de la tabla 3 podemos observar que solo una plantación se caracterizó como arcillosa en su totalidad ya que en su mayoría fueron del tipo Franco clase textural la cual se le atribuye una cualidad más porosa misma que se conforma por gránulos más homogéneos que permiten buena absorción y a su vez buena retención de agua, más aún la compactibilidad es menor en etapas de baja disponibilidad hídrica en el sentido agronómico las plantaciones de vainilla necesitan establecerse en suelos del tipo Franco o Franco arcillas, si el suelo es del tipo arcilloso lo ideal será agregar arena o algún tipo de material que permita a la suelo tener menor compactibilidad y mejor drenaje estas recomendaciones son compartidas en base a los recorridos autorizados por el instituto por diferentes plantaciones en diferentes estados de la república.

Tabla 3. Características físicas del suelo.

Plantación	Textura	pH	PS (%)	CC (%)	DA (g/cm³)
LFA	Franco	5.93	93	50.1	0.96
LSR	Arcilla	7.13	61	32.7	1.09
MSG	Franco	7.08	55	29.4	0.85
SMR	Franco Arcilloso	6.99	60	32.3	1.02

PS: Punto de saturación, CC: Capacidad de campo, DA: Densidad aparente.

8.2.2. Evaluación del pH del suelo

Los resultados de pH del suelo de las 4 plantaciones oscilaron entre 5.93 y 7.13, estos resultados son similares con lo reportado por (Padilla-Vega, 2010) quien obtuvo resultados de pH de suelo en cultivos de vainilla en Chiapas de 6 a 7.

Los resultados obtenidos demuestran de acuerdo a la norma oficial NOM-021-RECNAT-2000 que la plantación de la florida marcada como LFA se encuentra dentro del rango denominado moderadamente ácido (5.1-5.9) a diferencia de las otras 3 en el rango neutro y moderadamente alcalino lo que es bueno para el cultivo, la plantación en la que se obtuvo un suelo ligeramente más ácido, puede estar relacionado por el manejo agronómico, por sustratos que puedan causar el aumento en la acidez como desechos de madera verde o por la falta del mismo sustrato u hojarasca ya que suelos con escasa cobertura suelen erosionarse y provocar cambios en el pH al igual que el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, de acuerdo a (Hernández-Jiménez *et al.*, 2020) la acidificación en suelos ocurre por transformaciones químico-mineralógicas, por factores naturales y antropogénicos, naturales por ejemplo en zonas lluviosas cuando los suelos sufren pérdidas de macro y micronutrientes debido a la saturación por hidrógeno esto hace que parte del calcio del suelo se pierda y como consecuencia se eleve la acidez.

De acuerdo a (Damian *et al.*, 2018) para mejorar la calidad de los suelos se ha utilizado la aplicación de enmiendas como el yeso agrícola, compost enriquecido con microorganismos y el humus de lombriz, ya que actúan sobre los cambios en la estabilidad estructural y también aumentan la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. Por ello para tener un adecuado control de la acidez del suelo es importante suministrar materia orgánica al suelo y al sustrato, así como fertilizantes ricos en ácidos húmicos y fúlvicos al igual que adicionar microorganismos benéficos como hongos y bacterias que mejoren la micro biota del suelo, es importante también balancear la aplicación de nitrógeno en el suelo en forma nítrica y amoniacal 50/50, en algunos cultivos como el limón se realizan encalado después de la temporada de lluvias para suministrar el calcio que se pudo haber perdido por factores bióticos.

8.2.3. Punto de Saturación (PS) y Capacidad de Campo (CC) del suelo

Los resultados obtenidos demuestran una muy buena capacidad de absorción de agua en el suelo y la misma vez una muy buena retención y es precisamente una característica de gran valor en la agricultura sobre todo al establecer algún cultivo en donde se requiera altas cantidades de agua ya que estas dos variables permiten esclarecer esas cualidades del suelo que está estrechamente relacionadas también con la textura del suelo.

De acuerdo a los valores obtenidos en la tabla 3, el valor más alto del punto de saturación es el de la muestra LFA (93%) y un valor de la capacidad de campo de 50.1%, mientras que el valor más bajo fue el de la muestra MSG con un punto de saturación de 55% y una capacidad de campo de 29.4%. Los resultados indican buena retención de agua para las cuatro plantaciones, ya que los valores son similares a los reportados para suelos cultivados con café donde oscilan entre 60-30 % de punto de saturación y de 40-20% en capacidad de campo (Salamanca A. & Sadeghian S., 2014). Estos resultados se atribuyen a suelos fértiles con buen manejo agronómico lo que podría constatar que los resultados obtenidos en los suelos cultivados con vainilla son también fértiles. Sin embargo, con base a las necesidades de este cultivo es recomendable un suelo con una mayor retención de humedad o con un manejo agronómico que permita conservar la humedad durante los periodos de altas demanda hídrica como lo es la fructificación de las plantas y desarrollo de los frutos, particularmente en la época de sequía, es decir durante los meses abril y mayo.

8.2.4. Densidad aparente del suelo

Los resultados mostraron suelos con una buena porosidad ya que de acuerdo con lo reportado por Salamanca A. & Sadeghian S., (2014) en cultivos de café suelos los resultados oscilaron entre 0.7 a 1.2 g/cm³, similares a lo reportado en este estudio. Sin embargo, en comparación con el cultivo de vainilla es preferible que la densidad aparente no exceda 1.5 g/cm³ ya que entre más baja sea la densidad mejor es la porosidad del suelo, favoreciendo más el crecimiento radicular de las plantas.

8.2.5. Contenido de Materia Orgánica (MO) del suelo

De acuerdo con los datos de la tabla 4, los resultados de materia orgánica (MO) oscilaron entre 6.15 y 13.5%, la plantación con el más bajo contenido de materia orgánica fue la plantación ubicada en Mesa de Guadalupe (MSG) con un total de 6.15%, mientras que la más alta (13.5%) se determinó en la plantación de la Florida (LFA) como se muestra en la tabla 4. El hecho de que el contenido de materia orgánica sea el doble en una plantación, es gracias en mayor medida al manejo agronómico empleado por los productores, particularmente por la adición la composta con la que alimentan las plantas. Los contenidos de materia orgánica determinado en suelos son superiores a lo registrado en otros cultivos, esto debido a que la vainilla como orquídea exige un suministro alto de materia orgánica para el buen desarrollo de las plantas. De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000 se considera que suelos con valores mayores a 6% de MO son denominados suelos con muy alto contenido de MO. En este sentido es de especial interés enriquecer los suelos con composta con mezclas y desechos que puedan incrementar el contenido de materia orgánica, ya que, si los niveles están por debajo de los 4%, en los cultivos de vainilla es recomendable aumentar el % de MO. La presente investigación permitió constatar que la adición de ácidos húmicos y fúlvicos en la composta mejora la descomposición de los desechos de madera y a su vez enriquece el suelo permitiendo el crecimiento de microorganismos benéficos que hace más eficiente el sustrato para las plantas.

Tabla 4. Contenido de Materia Orgánica (MO), Macro y Micro nutrientes del suelo.

Plantación	MO %	Macro nutrientes ppm			Micro nutrientes ppm		
		N	P	K	B	Zn	Fe
LFA	13.5	32.1	6.91	100	0.23	3.61	20.2
LSR	7.34	15.8	2.31	124	0.11	2.38	24.1
MSG	6.15	27.3	601	412	1.23	13.3	14.2
SMR	8.08	91.8	256	961	0.42	6.11	52

8.2.6. Contenido de Macro nutrientes del suelo

En la tabla 4 se muestran el contenido de macronutrientes, los contenidos de nitrógeno en los suelos analizados indican que la plantación de Loma San Rafael LSR mostró un contenido bajo (15.8 ppm), según la norma NOM-021-RECNAT-2000; mientras que la plantación MSG registró un nivel medio 27.3 ppm. Bajos contenidos de nitrógeno en los suelos puede provocar en la planta efectos adversos como ocasionar amarillamiento o defoliaciones en las hojas, así como poca vigorosidad y un crecimiento lento.

En cuanto a contenido de fósforo las dos plantaciones LFA Y LSR mostraron contenidos bajos en este micro elemento 6.91 y 2.31 ppm, respectivamente. Mientras que las plantaciones MSG y SMR mostraron contenidos altos de 601 y 246 ppm, respectivamente, esto de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000. Fernández (2007) indica que los factores climáticos como bajas temperaturas y sequías promueven la reducción del fósforo en el suelo, lo cual ocasiona la fijación del carbonato de calcio. Además, el exceso de humedad y compactación que pueden causar deficiencias temporales de este macronutriente.

Las reacciones en la planta por deficiencia de fósforo en cultivos pueden producir coloración morada en los márgenes de las hojas, crecimiento lento y retraso de la maduración en frutos o grano y enrollamiento de las hojas (Fernández, 2007).

Las formas de adicionar fósforo en suelos pueden variar: en el cultivo de tomate se han reportado dos métodos el convencional químico y la fertilización orgánica. Los abonos químicos como, superfosfato simple y superfosfato triple. La fertilización orgánica mediante cachaza más roca fosfórica y cachaza enriquecida con el biofertilizante Azotofos (*Pseudomonas fluorescens* y *Azotobacter chroococcum*) (Díaz et al., 2016). Con base a la información precedente lo más viable para el cultivo de vainilla sería enriquecer la composta con biofertilizantes a base de microorganismos benéficos.

Los contenidos de potasio registrados mostraron niveles medios y altos, para dos plantaciones LFS y LSR el contenido de potasio fue de 100 y 124 ppm, respectivamente; mientras que las plantaciones con niveles más altos en potasio fueron MSG y SMR con un contenido de 601 y 412 pmm, respectivamente. Estos resultados coinciden con lo reportado por Espinoza et al., (2018). Los contenidos de potasio más altos fueron determinados en las plantaciones ubicadas por arriba de los 500 msnm. Sin embargo, este comportamiento pudo ser casual, por lo cual es importante realizar estudios más profundos y puntuales a lo largo de las etapas fenológicas de las plantas situadas diferentes altitudes.

De acuerdo a lo antes mencionado la importancia del potasio en las plantas radica en el crecimiento, llenado y maduración del fruto principalmente, lo que concuerda con lo reportado por Martínez et al. (2008) donde mencionan que la deficiencia de este elemento produce pérdida de turgencia y marchitamiento, más acentuado cuando hay déficit hídrico, ya que este nutriente se caracteriza por dar firmeza a los tejidos y grosor a las paredes celulares. La forma de suministrar potasio en el suelo más ideal para el cultivo de vainilla son los abonos orgánicos o compostas ya que es posible mejorar el contenido de este nutriente empelando alguno de estos compuestos, estiércol, langbeinita (sulfato de potasio y magnesio), rocas en polvo, algas, silvinita (cloruro de potasio, KCl) y ceniza de madera.

8.2.7. Contenido de Micro nutrientes del suelo.

De acuerdo a la tabla 4, los resultados indican que el contenido de boro en LSR fue muy bajo (0.11 ppm), seguido de LFA (0.23 ppm) clasificado como un nivel bajo; mientras que la plantación de MSG registró un contenido más alto (1.23 ppm) y finalmente el contenido de boro para la plantación SMR fue de 0.42 ppm clasificada como un nivel medio, estos parámetros de clasificación son similar a los reportado por Vanzetti (2014), en su mayoría estos resultados fueron bajos esto puede estar relacionado por las exigencias de la planta ya que este nutriente es indispensable en la etapa de floración. Por otro lado, el manejo agronómico integrado a un plan de fertilización pudo estar relacionado a la plantación que tuvo el mayor contenido de este micro elemento.

De acuerdo a Vanzetti (2014) las deficiencias de boro en plantas de aguacate provocan una reducción del contenido de clorofilas y proteínas solubles en las hojas, lo que provoca problemas en la fotosíntesis, esto a su vez provoca síntomas en las hojas jóvenes; éstas se tornan más pequeñas, flácidas y pierden el brillo. Cuando la deficiencia aumenta, se presentan deformaciones y clorosis que inician por el ápice de la hoja. Por el contrario, en hojas adultas se observó una coloración verde clara ligeramente mate.

8.3. Análisis Climatológico de las plantaciones de vainilla.

Los resultados climatológicos se indican en la tabla 5, incluyendo las temperaturas anuales promedio favorables para el cultivo de vainilla durante la última década 2010-19, como se puede observar en la plantación **LSR**, la temperatura máxima fue de 31.76 °C y en la plantación **LFA** fue de 31.69 °C, establecidas a una altitud de 137 y 475 msnm, respectivamente. La precipitación más alta fue de 4017 mm y corresponde a la plantación LSR. De acuerdo a los resultados a medida que la altitud aumenta, la temperatura desciende, siendo la temperatura más baja registrada de 10.55 °C para la plantación de **SMR** a una altitud de 1020 msnm. Por otro lado, la región con el menor nivel de precipitación anual acumulada fue para la plantación de MSG ubicada a 860 msnm.

Tabla 5. Análisis climatológico de las plantaciones de vainilla en el periodo 2010-2019.

Plantación	Elevación (msnm)	Tmax (°C)	Tmed (°C)	Tmin (°C)	Lluvia (mm)
TCL	20	28.16 ± 1.23 ^C	23.78 ± 0.51 ^B	19.39 ± 0.57 ^{BC}	1374
GTZ	30	28.16 ± 1.23 ^C	23.78 ± 0.51 ^B	19.39 ± 0.57 ^{BC}	1374
TMZ	120	29.34 ± 0.83 ^{BC}	24.60 ± 0.68 ^B	19.85 ± 0.65 ^{AB}	1644
LFA	137	31.69 ± 0.77 ^A	25.93 ± 0.46 ^A	20.17 ± 0.29 ^{AB}	3618
LSR	475	31.76 ± 1.42 ^A	26.18 ± 0.92 ^A	20.60 ± 0.68 ^A	4017
MSG	860	30.23 ± 0.85 ^B	24.51 ± 1.01 ^B	18.78 ± 1.24 ^C	906
SMR	1020	25.16 ± 0.59 ^D	17.85 ± 0.38 ^C	10.55 ± 0.23 ^D	1024
JLT	1250	22.39 ± 0.65 ^E	17.37 ± 0.46 ^C	12.35 ± 0.32 ^E	1759

Los valores son el promedio de 10 años ± su desviación estándar, letras diferentes indican diferencia significativa ($p < 0.05$).

En general los resultados climatológicos indican que las plantaciones de vainilla estudiadas se han desarrollado en un rango de altitud desde 20 a 1250 msnm, Tmax de 22.39 a 31.76 °C, Tmin de 10.55 a 20.17 °C, Tmed de 17.37 a 26.18 °C, con una precipitación de 906 a 4017 mm (tabla 5). Estos resultados puntuales obtenidos de plantaciones de vainilla en desarrollo indican que el cultivo de vainilla en México se desarrolla en diferentes rangos de condiciones climáticas, lo cual son cercanas a lo reportado por Flores-Jiménez et al. (2017), quienes reportan un rango altitudinal de 0 a 1650 msnm, Temperaturas de 16.7 a 27.8 °C, precipitación de 1021 a 4450 mm mediante un estudio de perfil bioclimático área *Vanilla planifolia* en México. Otros estudios indican que el rango altitudinal más factible para el cultivo de vainilla se encuentra entre los 0 a 600 msnm, con temperaturas que oscilen entre 20 y 32 °C, con precipitaciones de los 2000 a 3000 mm (Odoux & Grisoni 2011). Sin embargo, debido al cambio climático se ha observado que el cultivo de vainilla se ha desplazado a regiones de mayor altitud. En donde cada productor debe adecuar su cultivo a las condiciones de la zona en que se encuentre y por ende seleccionar el sistema que más convenga y buscar las herramientas necesarias para asegurar una buena producción.

8.4. Análisis Climático y Microclimático en 3 sistemas de Cultivo de vainilla.

8.4.1. Sistema Tradicional o Acahual.

Las diferencias entre los estudios climático y microclimático en el sistema de acahual muestran un comportamiento favorable para el cultivo en ambos casos, excepto en la época de septiembre a noviembre (SON), en donde se observaron valores de temperatura media más altos en el estudio climático. Sin embargo, no son valores extremos que puedan tener un efecto adverso en el cultivo, siendo la Tmax 31.8 °C en el periodo junio a agosto (JJA) (Tabla 6). En el periodo marzo a mayo (MAM), se observó el mayor valor del déficit de presión de vapor (DPV) con un valor de 0.48 kPa en la medición microclimática, lo que indica que en esta temporada la planta sufre un mayor estrés debido a la alta temperatura. Este resultado es muy interesante porque permite obtener información más puntual de las condiciones durante el desarrollo de la planta.

Tabla 6. Análisis climatológico de vainilla en sistema de acahual

Variable	DEF		MAM		JJA		SON	
	Microclima	Clima	Microclima	Clima	Microclima	Clima	Microclima	Clima
Tmed (°C)	19.6 ± 3.3	19.4 ± 3.4	24.2 ± 2.7	23.8 ± 2.5	27.1 ± 1.4	27.1 ± 1.3	23.6 ± 2.5	25.1 ± 2.6
Tmax (°C)	24.4 ± 4.8	23.4 ± 4.3	30.7 ± 4.1	28.3 ± 3.5	30.9 ± 2.5	31.8 ± 1.6	28.9 ± 3.9	29.1 ± 2.9
Tmin (°C)	16.5 ± 3.1	16.4 ± 3.2	20.4 ± 2.6	20.6 ± 2.7	23.6 ± 1.2	24.5 ± 1.1	20.3 ± 2.2	22.0 ± 2.5
HR (%)	89.2 ± 6.0	88.6 ± 6.6	86.73 ± 3.8	88.6 ± 3.6	89.7 ± 4.2	89.2 ± 3.1	88.6 ± 5.1	88.4 ± 4.3
DPV (kPa)	0.28 ± 0.1	0.26 ± 0.1	0.48 ± 0.2	0.34 ± 0.1	0.4 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.2	0.4 ± 0.2

La media ± desviación estándar de T: temperatura, Tmax: temperatura máxima, Tmin: temperatura mínima, HR: humedad relativa, DPV: déficit de presión de vapor, PAR.

8.4.2. Sistema semi tecnificado o cielo abierto

De acuerdo a la tabla 7, la temperatura máxima registrada (T_{max}) que se alcanzó en el sistema de producción en cielo abierto fue de 32.2 °C registrada en el análisis microclimático en la temporada marzo - mayo, este incremento de la temperatura puede estar relacionado a la cantidad de sombra que existe en los tutores ya que los tutores de cítricos no poseen mucha sombra por lo que en este sentido sería de vital importancia no realizar podas antes del inicio de la temporada seca.

Por otro lado, la temperatura más baja (T_{min}) fue de 13.8 °C registrada en la temporada fría diciembre-febrero en el análisis climatológico, lo que indica que en el microclima la temperatura es menos severa y puede estar relacionada a las cualidades del entorno ya que en el sistema de acahual la planta se encuentra protegida por la sombra y calor que pueden proveer los tutores.

La humedad relativa más baja fue de 77 % en la temporada seca marzo-mayo en el análisis climático, sin embargo de manera general esta variable es estable en los dos análisis, en cuanto al déficit de presión de vapor los valores registrados fueron mayor en el análisis micro climático durante toda la temporada, el valor más alto fue de 0.99 kPa en la temporada seca de MAM, este resultado puede estar relacionado al aumento en la transpiración de la planta a causa de un estrés por sequía por lo que los valores aumentan en el área de la plantación.

Tabla 7. Análisis climatológico de vainilla en sistema de cielo abierto.

Variable	DEF		MAM		JJA		SON	
	Microclima	Clima	Microclima	Clima	Microclima	Clima	Microclima	Clima
T (°C)	18.7 ± 2.8	17.9 ± 2.6	23.7 ± 3.0	23.6 ± 1.4	22.9 ± 1.2	22.7 ± 1.1	22.9 ± 1.3	21.8 ± 1.9
Tmax (°C)	25.3 ± 4.6	22.9 ± 3.5	32.2 ± 3.3	28.9 ± 2.0	28.2 ± 1.9	26.8 ± 1.5	28.6 ± 2.1	26.0 ± 2.2
Tmin (°C)	14.7 ± 2.2	13.8 ± 2.5	18.9 ± 1.2	19.9 ± 1.1	19.6 ± 1.0	19.3 ± 1.2	19.6 ± 1.0	18.3 ± 1.9
HR (%)	81.9 ± 9.1	83.2 ± 7.4	73.1 ± 10.8	77.0 ± 7.2	87.5 ± 4.6	84.6 ± 3.7	88.2 ± 4.2	85.4 ± 2.7
DPV (kPa)	0.50 ± 0.3	0.36 ± 0.2	0.99 ± 0.5	0.69 ± 0.2	0.4 ± 0.2	0.5 ± 0.1	0.4 ± 0.2	0.4 ± 0.1

La media ± desviación estándar de T: temperatura, Tmax: temperatura máxima, Tmin: temperatura mínima, HR: humedad relativa, DPV: déficit de presión de vapor, PAR.

8.4.3. Sistema en Invernadero o malla sombra

En comparación con los sistemas de producción anteriores, este en particular presenta las temperaturas más altas, principalmente en la temporada de seca (marzo a mayo, MAM) con una Tmax: 35.8 °C (tabla 8). La humedad relativa más baja fue de 71.8 % en la temporada MAM registrada en el análisis climático, en comparación con el estudio microclimático 72.8 %. Esto puede ser debido a las condiciones climáticas del lugar en donde está ubicado el cultivo y a la temporada. Por otro en este sistema de producción se registró el déficit de presión de vapor más altos con 1.3 y 1.1 kPa para el estudio micro y climático, respectivamente. Este alto valor del DPV es debido al incremento de la transpiración de las plantas por las altas temperaturas. Es un mecanismo que las planta utilizan para mitigar las altas temperaturas.

Tabla 8. Análisis climatológico de vainilla en sistema de malla sombra.

Variable	DEF		MAM		JJA		SON	
	Microclima	Clima	Microclima	Clima	Microclima	Clima	Microclima	Clima
Tmed (°C)	22.5 ± 1.9	23.3 ± 1.4	28.6 ± 2.1	28.6 ± 2.1	27.8 ± 1.6	27.4 ± 1.5	27.0 ± 1.5	25.9 ± 2.1
Tmax (°C)	28.2 ± 3.5	28.6 ± 1.9	35.8 ± 3.2	35.4 ± 3.7	33.3 ± 2.3	32.7 ± 2.2	32.6 ± 2.2	30.9 ± 2.9
Tmin (°C)	18.7 ± 1.7	18.9 ± 1.2	23.4 ± 1.7	23.6 ± 1.6	24.0 ± 1.0	23.7 ± 1.0	23.5 ± 0.8	22.4 ± 1.8
HR (%)	83.7 ± 5.6	82.6 ± 7.3	72.8 ± 6.6	71.8 ± 4.4	82.7 ± 6.4	86.4 ± 6.8	87.2 ± 4.4	88.1 ± 6.5
DPV (kPa)	0.53 ± 0.2	0.50 ± 0.1	1.3 ± 0.4	1.1 ± 0.5	0.8 ± 0.3	0.6 ± 0.3	0.6 ± 0.2	0.5 ± 0.3

La media ± desviación estándar de T: temperatura, Tmax: temperatura máxima, Tmin: temperatura mínima, HR: humedad relativa, DPV: déficit de presión de vapor, PAR.

8.5. Caracterización física de los frutos verdes de vainilla

En la tabla 9 se muestran los resultados de la evaluación morfológica de los frutos verdes. El peso promedio osciló entre 14.44 y 20.40 g., la longitud entre 17.04 y 22.87 cm y el grosor entre 1.22 y 1.65 cm. Los mayores valores de estos parámetros fueron determinados en los frutos provenientes de las plantaciones ubicadas entre 50 y 120 msnm bajo sistemas de Acahual y Malla sombra. Los frutos más grandes fueron provenientes de la plantación TMZ, con las siguientes características: 20.4 g de peso, 22.87 cm de longitud y 1.65 cm de grosor.

Las características físicas de los frutos pueden depender del manejo agronómico: como la nutrición de la planta, la cantidad de flores fecundadas en la polinización, así como las condiciones de suelo y condiciones climatológicas. Sin embargo, en nuestro país también puede ser debido a la variedad de *V. planifolia*, debido a que existe una gran diversidad genética de esta especie.

No hay hasta ahora en la literatura algún reporte de estas observaciones relacionadas con las características física de los frutos; solo se han reportado el efecto de la nutrición en la producción de vainilla (Sujatha & Bhat., 2010)

Tabla 9. Caracterización física de los frutos verdes de vainilla de las plantaciones estudiadas

Plantación	Peso (g)	Longitud (cm)	Grosor (cm)
TCL	17.30 ± 0.02 ^{BC}	18.59 ± 0.03 ^C	1.37 ± 0.02 ^E
GTZ	17.60 ± 0.12 ^B	20.93 ± 0.02 ^B	1.42 ± 0.03 ^{DE}
TMZ	20.40 ± 0.02 ^A	22.87 ± 0.02 ^A	1.65 ± 0.02 ^A
LFA	16.20 ± 0.22 ^D	18.00 ± 0.09 ^E	1.58 ± 0.03 ^B
LSR	14.44 ± 0.15 ^F	18.05 ± 0.02 ^E	1.53 ± 0.02 ^{BC}
MSG	17.47 ± 0.03 ^{BC}	17.82 ± 0.02 ^F	1.22 ± 0.01 ^F
SMR	17.10 ± 0.30 ^C	18.20 ± 0.02 ^D	1.57 ± 0.01 ^B
JLT	15.17 ± 0.02 ^E	17.04 ± 0.01 ^G	1.47 ± 0.02 ^{CD}

Los valores son el promedio de 3 repeticiones ± su desviación estándar, letras diferentes indican diferencia significativa (p<0.05).

8.6. Contenido de humedad de los frutos verdes de vainilla.

Los resultados oscilaron entre 80-84% como se observan en la tabla 10. Lo cual es normal en frutos verdes con aproximadamente 8 meses de maduración. Los frutos con porcentajes de humedad más altos fueron los de las plantaciones LSR y GTZ con un contenido de 84.64 y 84.62 %, respectivamente. Mientras que la humedad de los frutos del resto de las plantaciones osciló entre 80 y 82 % de humedad, estos resultados son similares a los reportados por (Pérez Silva et al., 2011) quienes reportan contenidos humedad de frutos verde de entre 83-85 %.

La diferencia en el contenido de humedad puede ser debido a la nutrición de la planta en el periodo de fructificación y en algunos casos por cosecha prematura ya que se ha observado un retraso en la floración en zonas calurosas.

Tabla 10. Contenido de humedad de los frutos verdes de vainilla de las plantaciones estudiadas.

Plantación	Humedad (%)
TCL	81.91 ± 0.02 ^B
GTZ	84.62 ± 0.55 ^A
TMZ	81.92 ± 0.60 ^B
LFA	80.51 ± 0.60 ^B
LSR	84.64 ± 0.06 ^A
MSG	82.02 ± 0.09 ^B
SMR	81.80 ± 1.40 ^B
JLT	82.11 ± 0.37 ^B

Los valores son el promedio de 3 repeticiones ± su desviación estándar, letras diferentes indican diferencia significativa ($p < 0.05$).

8.7. Potencial Aromático de frutos verdes de vainilla

En la tabla 11 se muestra el potencial de vainillina determinado en los frutos, el cual osciló entre 3.43 – 6.54 g/100 g m.s. Estas diferencias podrían explicarse por factores ambientales relacionados con el lugar de cultivo, manejo agronómico o por la madurez de los frutos al momento de su cosecha (Hernández Vázquez, 2018; Pérez-Silva et al., 2021).

Tabla 11. Potencial aromático en frutos de vainilla de diferentes plantaciones.

Plantación	Glucovainillina g/100 g m.s.	Vainillina ligada g/100 g m.s.	Vainillina libre g/100 g m.s.	Potencial en Vainillina g/100 g m.s.	Altitud msnm	Sistema de Cultivo
TCL	0.05 ± 0.00 ^G	0.02 ± 0.00 ^G	4.50 ± 0.13 ^A	4.52 ± 0.13 ^{CD}	20	Cielo Abierto
GTZ	0.34 ± 0.00 ^G	0.16 ± 0.00 ^G	3.26 ± 0.14 ^B	3.43 ± 0.15 ^E	30	Malla Sombra
TMZ	2.05 ± 0.05 ^F	0.99 ± 0.05 ^F	3.39 ± 0.04 ^B	4.39 ± 0.06 ^D	120	Tradicional
LFA	11.02 ± 0.53 ^B	5.33 ± 0.26 ^B	0.10 ± 0.00 ^F	5.43 ± 0.26 ^B	137	Tradicional
LSR	8.57 ± 0.12 ^D	4.15 ± 0.06 ^D	0.88 ± 0.04 ^D	5.03 ± 0.02 ^{BC}	475	Tradicional
MSG	12.35 ± 0.21 ^A	5.97 ± 0.10 ^A	0.56 ± 0.01 ^E	6.54 ± 0.11 ^A	860	Malla Sombra
SMR	9.58 ± 0.37 ^C	4.64 ± 0.17 ^C	1.37 ± 0.00 ^C	6.01 ± 0.17 ^A	1020	Tradicional
JLT	6.50 ± 0.08 ^E	3.14 ± 0.04 ^E	0.64 ± 0.01 ^{DE}	3.78 ± 0.01 ^E	1250	Cielo Abierto

Los valores son el promedio de 2 repeticiones ± su desviación estándar, letras diferentes indican diferencia significativa (p<0.05).

8.8. Evaluación del fertilizante en una plantación de vainilla

8.8.1. Características físicas del suelo

El suelo de la plantación seleccionado se caracterizó con una textura tipo franco a la cual se le atribuye una cualidad más porosa misma que se conforma por gránulos más homogéneos que permiten buena absorción y a su vez buena retención de agua véase Tabla 12. Los resultados de pH de las dos muestras de suelo sin fertilizante (LFS) y con fertilizante (LFC) fueron 5.93 y 6.54, respectivamente. Estos valores comparados con lo establecido por la NOM-021-RECNAT-2000 demuestran que el pH para LFS se encuentra dentro del rango denominado moderadamente ácido (5.1-5.9) a diferencia de LFC la cual se encuentra en rango neutro lo que es favorable para el cultivo. Por consiguiente, la adición del fertilizante mejoró el pH del suelo.

Tabla 12. Características físicas del suelo con y sin fertilizar.

Muestra de suelo	Textura	pH	PS (%)	CC (%)	DA (g/cm ³)
Sin fertilizante (LFS)	Franco	5.93	93	50.1	0.96
Con fertilizante (LFC)	Franco	6.54	70	37.6	0.91

PS: Punto de saturación, CC: Capacidad de campo, DA: Densidad aparente.

Con respecto al punto de saturación del suelo, fue de 93% para la muestra LFS, siendo más alto respecto al de la muestra LFC con un 70 %. En cuanto a capacidad de campo, los valores para LFS y LFC fueron 50.1 y 37.6 %, respectivamente. Ambos valores altos de estos parámetros representan una buena retención de agua para las dos muestras contribuyendo a la fertilidad del suelo y al buen manejo agronómico. Sin embargo, la diferencia entre los valores de las muestras de suelo puede estar relacionada por la presencia de ácidos húmicos y fúlvicos (LFC). En la

muestra LFC la descomposición de la materia orgánica puede acelerarse por la disminución de la saturación del suelo y la capacidad de campo. En cuanto a la densidad aparente para LFS y LFC los resultados fueron 0.96 y 0.91 g/cm³, respectivamente. Ha sido reportado en suelos de cultivo de café que un valor ≥ 1 g/cm³ en la DA es característico de suelos más compactos (Salamanca et al., 2015).

Por lo tanto, ambos resultados en este estudio indican que el suelo de la parcela es adecuado para el cultivo de vainilla, debido a que es deseable tener una baja compactibilidad de suelo y que la densidad aparente no exceda 1 g/cm³, ya que entre más baja sea la densidad mejor porosidad tendrá el suelo, favoreciendo más el crecimiento radicular de las plantas. En términos generales, el efecto del fertilizante en el suelo mejoró las características del suelo, gracias a que favoreció el pH disminuyendo la acidez, lo que permitió proteger a las raíces de las plantas de ataques de hongos patógenos.

8.8.2. Fertilidad de suelo

Los resultados de materia orgánica (MO) de acuerdo a las muestras LFS y LFC fueron de 13.5 y 15.5 %, respectivamente (tabla 13). De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 se considera que suelos con contenidos $> 6\%$ de MO son denominados “suelos con muy alto contenido de MO”, en ambos casos el contenido de MO es alto. Aunque, la adición del fertilizante mejoró el contenido de materia orgánica.

El contenido de nitrógeno en el suelo LFC fue más alto (489 ppm), mientras que la muestra del suelo de LFS tuvo un valor medio de 32.1 ppm. El contenido de fósforo fue bajo en la muestra de suelo LFS con un valor de 6.91 ppm, mientras que para la muestra con fertilizante tuvo el contenido fue de 15.4 ppm. El contenido de potasio fue bajo para muestra LFS (100 ppm), siendo superior en la muestra LFC (154 ppm).

Tabla 13. Resultados de la fertilidad de suelo con y sin fertilizante.

Lote	Materia Orgánica (%)	Macro nutrientes (ppm)			Micro nutrientes (ppm)		
		N	P	K	B	Zn	Fe
LFS	13.5	32.1	6.91	100	0.23	3.61	20.2
LFC	15.5	489	15.4	154	0.1	5.49	21.4

Como puede observarse en la tabla 12, el contenido de boro en la muestra LFS fue de 0.23 ppm, mientras que en la muestra LFC fue de 0.1 ppm. El contenido de zinc fue mayor en la muestra LFC (5.49 ppm).

El contenido de hierro en ambas fue similar. De manera general la adición del fertilizante tuvo un efecto benéfico en el aumento de materia orgánica, esto puede estar relacionado por la descomposición de los desechos de madera por la presencia de los ácidos húmicos y fúlvicos.

El contenido de los macros y micros nutrientes en los suelos LFC fueron mayores, a excepción del B, debido a la adición del fertilizante, lo que permitió mejorar la fertilidad del suelo otorgando mejor disponibilidad de nutrientes a las plantas.

8.8.3. Determinación de las características de los frutos.

La caracterización física de los frutos obtenidos de plantas provenientes de suelos LFS y LFC no mostraron diferencia significativa respecto a su peso, longitud y grosor, como se puede observar en la tabla 14. Sin embargo, los contenidos de humedad en los frutos cosechados a los ocho meses mostraron diferencia significativa ($p < 0.005$).

Los frutos de suelos LFC presentaron una menor humedad (80.51 %) respecto a los provenientes de suelos LFS (85.25 %), lo que indica que la aplicación del fertilizante pudo acelerar la madurez del fruto, esto de acuerdo a estudios reportados que indican que el contenido de humedad de los frutos está en función su madurez, el

contenido de agua de los frutos disminuye conforme aumenta la madurez de los frutos de vainilla (Pérez-Silva et al., 2018).

Tabla 14. Características físicas de los frutos de vainilla con y sin fertilizante.

Lote	Peso (g)	Longitud (cm)	Grosor (cm)	Humedad (%)
LFS	16.60 ± 0.15 ^A	17.90 ± 0.03 ^A	1.56 ± 0.02 ^A	85.25 ± 0.15 ^A
LFC	16.20 ± 0.22 ^A	18.00 ± 0.09 ^A	1.58 ± 0.03 ^A	80.51 ± 0.60 ^B

Los valores son el promedio de 2 repeticiones ± su desviación estándar, letras diferentes indican diferencia significativa ($p < 0.05$).

8.8.4. Contenido de glucovainillina y potencial aromático

La actividad enzimática de la β -glucosídica en los frutos de suelos LFC presentaron una actividad de 1187.4 nkat g⁻¹ mientras que los frutos provenientes de suelos sin tratamiento obtuvieron un valor de 617.5 nkat g⁻¹ (tabla 15). Una alta actividad β -glucosídica es requerida para que los precursores aromáticos glucosilados sean hidrolizados al inicio del beneficiado de la vainilla (Pérez-Silva et al., 2021).

El indicador más importante en la calidad aromática de los frutos de vainilla es el potencial en vainillina. En la tabla 15 se muestra el contenido de glucovainillina, la concentración de vainillina libre y el del potencial de vainillina (el cual es el resultado de la sumatoria de la concentración de vainillina libre y el contenido de vainillina ligada (contenido de glucovainillia * 0.484).

En ambas muestras se detectó una diferencia significativa en el en el potencial de vainillina en los frutos. En los frutos colectados de las plantas tratadas con fertilizante LFC el potencial en vainillina fue 5.33 g/100 g m. s., mientras que los frutos provenientes de los suelos sin tratamiento el potencial fue aproximadamente 50% menos. El potencial determinado en los frutos provenientes del suelo fertilizado puede garantizar una excelente calidad aromática en las vainas beneficiadas,

aunque se debe considerar que este potencial disminuye durante el beneficiado de la vainilla, debido a las transformaciones que sufre la vainillina durante este proceso (Peña-Mojica et al., 2019).

Tabla 15. Resultados de calidad aromática en frutos con sin fertilizante.

Lote	Actividad enzimática (nkat g⁻¹)	Glucovainillina (g/100 g m.s.)	Vainillina ligada (g/100 g m.s.)	Vainillina libre (g/100 g m.s.)	Potencial en Vainillina (%)
LFS	617.5 ± 60.9 ^B	2.47 ± 0.10 ^B	1.19 ± 0.05 ^B	1.66 ± 0.01 ^A	2.86 ± 0.06 ^B
LFC	1187.4 ± 145.2 ^A	11.02 ± 0.53 ^A	5.33 ± 0.26 ^A	0.10 ± 0.00 ^B	5.43 ± 0.26 ^A

Los valores son el promedio de 2 repeticiones ± su desviación estándar, letras diferentes indican diferencia significativa (p<0.05).

9. CONCLUSIONES

- Las plantaciones de *V. planifolia* indican mejor adaptabilidad a suelos francos, pH neutro, densidad aparente 0.8 – 1 (g/cm³), capacidad de campo (29-37 %) para una buena retención de humedad. Con suelos fértiles con un contenido de materia orgánica entre 6 y 15 % y ricos en N, P, K, B, Zn, Fe, (27, 600, 412, 1.3, 2 y 13 ppm), respectivamente.
- El análisis climatológico indica que el cultivo tiene buena respuesta a temperaturas que oscilan entre (17-32 °C), con precipitaciones acumuladas anuales de 1700-4000 mm, adaptabilidad desde 0 -1250 msnm con mejor respuesta a altitudes de 400-600 msnm.
- El análisis microclimático y climático demostró la variación entre los diferentes sistemas de cultivo, diferencias en temperatura (± 2 °C), humedad relativa del aire (± 3 %) y déficit de presión de vapor (± 0.5 kPa), esto permite confirmar la variación de algunas variables climáticas en sistemas de cultivos diferentes.
- Los frutos estudiados provenientes de las diferentes plantaciones presentaron un potencial aromático entre 3.5 a 6.5 % y un contenido de humedad entre 80-85 %.
- La implementación de un fertilizante órgano-mineral líquido mejoró las características y la fertilidad del suelo debido al aumento en un 2 % de materia orgánica, así como el contenido de macro y micro nutrientes del suelo.
- La calidad aromática de los frutos provenientes de suelos fertilizados mejoró por el incremento del potencial en vainillina y la actividad β -glucosídica.

10. REFERENCIAS.

1. Alberto Hernández-Jiménez, Violeta Llanes-Hernández, Elein Terry-Alfonso, Greter Carnero-Lazo. (2020), Cambios de ph en suelos pardos de cuba cuando se erosionan. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), carretera San José-Tapaste, km 31, Gaveta Postal 1, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. ISSN 1819-4087.
2. Anandaraj, M., J. Rema, B. Sasikumar, and R. Suseela Bhai, 2005. Vanilla (extension pamphlet). Indian Institute of Spices Research. Calicut, Kerala, India, 11pp.
3. Álvaro Flores Jiménez, Delfino Reyes López, Daniel Jiménez García, Omar Romero Arenas, José Antonio Rivera Tapia, Manuel Huerta Lara & Araceli Pérez Silva. (2017). Diversidad de Vanilla spp. (Orchidaceae) y sus perfiles bioclimáticos en México. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Instituto de Ciencias, Centro de Agroecología y Ambiente, Boulevard 14 sur 6301, Ciudad Universitaria, 72570 Puebla, Puebla, México. .Rev. Biol. Trop. (Int. J. Trop. Biol. ISSN-0034-7744), Vol. 65 (3): 000-000
4. Azofeifa-Bolaños J.B., Gigant L.R., Nicolás-García M., Pignal M., Tavares-González F.B., Hágsater E., SalazarChávez G.A., Reyes-López D., Archila-Morales F.L., García-García J.A., da Silva D., Allibert A., Solano-Campos F., Rodríguez-Jimenes G.d.C., Paniagua-Vásquez A., Besse P., Pérez-Silva A. & Grisoni M. 2017. A new vanilla species from Costa Rica closely related to *V. planifolia* (Orchidaceae). European Journal of Taxonomy 284: 1–26. <http://dx.doi.org/10.5852/ejt.2017.284>.
5. Anonymous, 2000. Agribusiness Development Centre (ADC) of the USAID-funded Uganda is Investment in Developing Export Agriculture (IDEA) project. ADC Commercialization Bulletin No. 1—Vanilla. 2000, 11pp. www.foodnet.cgiar.org/market/Uganda/report/vanilla.pdf. March, 2009.
6. Anonymous, 2005. Vanilla. Product Profile No. 9. Uganda Export Promotion Board. [www. data.mtti.go.ug/docs/vanilla.pdf](http://www.data.mtti.go.ug/docs/vanilla.pdf). Marzo, 2009.

7. Adedeji, J., Hartman, T. G., & Ho, C. (1993). Flavor characterization of different varieties of vanilla beans. *Perfumer and Flavors*, 18, 115–133.
8. Bory S., Lubinsky P., Risterucci A.-M., Noyer J.-L., Grisoni M., Duval M.-F. & Besse P. 2008. Patterns of introduction and diversification of *Vanilla planifolia* (Orchidaceae) in Reunion Island (Indian Ocean). *American Journal of Botany* 95: 805–815. <http://dx.doi.org/10.3732/ajb.2007332>
9. Bouriquet, G. 1954. Culture. In: *Le vanillier et la vanille dans le monde*. Editions Paul Lechevalier, Paris, 429–458.
10. Childers, N.F. and H.R. Cibes. 1948. Vanilla culture in Puerto Rico. Cir. No. 28. Federal Experiment Station in Puerto Rico (USDA). Mayaguez, Puerto Rico, 94pp.
11. Cibes, H.R., N.F. Childers, and A.J. Laoustalot. 1947. Influence of mineral deficiencies on growth and composition of vanilla vines. *Plant Physiology* 22:291–299.
12. Curtí Díaz, E. 1995. Cultivo y beneficiado de la vainilla en México. Primera Edición. Fondo regional de solidaridad del Totonocapan. Editorial ACRIBIA, Veracruz, México.
13. Childers, N.F. and H.R. Cibes. 1959. Vanilla culture in Puerto Rico. Cir. No. 28. Federal Experiment Station in Puerto Rico (USDA). Mayaguez, Puerto Rico, 94pp.
14. Damian, M.; F. Gonzáles; P. Quiñones & J. Terán. (2018). Plan de enmiendas, yeso agrícola, compost mejorado y enriquecido con EM y humus de lombriz, para mejorar el suelo. *Arnaldoa* 25(1): 141-158. doi: <http://doi.org/10.22497/arnaldoa.251.25109>.
15. Domínguez G.R. 2005. Crecimiento y niveles nutrimentales en vainilla planifolia. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillos, México, 59pp.
16. Eric Odoux & Michel Grisoni. 2011, *Vanilla, Medicinal and aromatic plants-- industrial profiles* ; 47) ISBN 978-1-4200-8337-8.
17. E. Peña-Mojica, A. Ariza-Castolo, M. A. Vivar-Vera, G. C. Rodríguez-Jimenes, A. Pérez-Silva, “Estudio del efecto enzimático, térmico y

- fotoquímico en la transformación de la vainillina”, *Journal CIM* Vol. 7, Núm. 1, 2019
18. Fernández, María Teresa., (2007), Fósforo: amigo o enemigo. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. XLI, núm. 2, 2007, pp. 51-57 Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar., Ciudad de La Habana, Cuba.
 19. Gustavo Vanzetti, (2014), Disponibilidad de boro en un suelo de Justiniano Posse y respuesta a la aplicación foliar en Soja. *Sistemas Agrícolas de Producción Extensivos Facultad de Ciencias Agropecuarias Universidad Nacional de Córdoba*.
 20. Hernández Vázquez, A. 2017. “Evaluación de los precursores glucosilados durante el desarrollo de frutos y perfil aromático de la vainilla (*Vanilla planifolia*)”. Tesis de Maestría en Ciencias en Alimentos. Instituto Tecnológico de Tuxtepec
 21. Hernández Hernández, J. 2007a. Tecnología de “casa-sombra” Producción Intensiva de Vainilla, en la Región del Totonacapan. *Revista Agroentorno* No. 90/Año octubre 10, 2007, 4pp.
 22. Hernández Medina, E. 1943. Studies of the shade requirements of vanilla. *The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico* 27, 27–37.
 23. J. -A. Salamanca, K.H. -S. Sadeghian, 2014, “La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana”, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.
 24. José Padilla Vega. (2010). Estudio fisiológico de *Vanilla planifolia* Andrews (Orchidaceae), cultivada en sistemas forestales en Ixcomitán Chiapas, México. Colegio de la Frontera Sur.
 25. K. Rahman, M. K. -B. Thaleth, G. -M. Kutty, R. Subramanian, “Pilot scale cultivation and production of *Vanilla planifolia* in the United Arab Emirates”. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 25 (6), 1143–1150, 2019.
 26. Lubinsky, P., M. Van Dam, and A. Van Dam, 2008. Pollination of *Vanilla* and evolution in Orchidaceae. *Lindleyana* 75:926–929.

27. Martínez, Fabio Ernesto; Sarmiento, Jenny; Fischer, Gerhard; Jiménez, Francisco, (2008) Efecto de la deficiencia de N, P, K, Ca, Mg y B en componentes de producción y calidad de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) *Agronomía Colombiana*, vol. 26, núm. 3, pp. 389-398 Universidad Nacional de Colombia Bogotá, Colombia.
28. M. -S. Basurto, R. -C. Rodríguez, R. -E. Santiago, J. -R. Hernández y E. P. -V. García, "Manejo orgánico vs manejo convencional en la etapa inicial del cultivo de vainilla (*Vanilla planifolia* A.)", *Revista Científica Biológico Agropecuaria Tuxpan*, ISSN: 2007-694, 2021.
29. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis, Diario Oficial. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
30. Norma Mexicana, NMX-AA-132-SCFI-2016, Muestreo de suelos para la identificación y la Cuantificación de metales y metaloides, y Manejo de la muestra.
31. Odoux, E., Escoute, J., & Verdeil, J. L. (2006). The relation between glucovanillin, β -Dglucosidase activity and cellular compartmentation during the senescence, freezing and traditional curing of vanilla beans. *Annals of Applied Biology*, 149, 43–52.
32. Pérez Silva A., Gunata Z., Lepoutre J.-P. & Odoux E. (2011). New insight on the genesis and fate of odor-active compounds in vanilla beans (*Vanilla planifolia* G. Jackson) during traditional curing. *Food Research International* 44: 2930–2937. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2011.06.048>
33. Perez-Silva, A., E. Odoux, P. Brat, F. Ribeyre, G. Rodriguez-Jimenes, V. Robles-Olvera, M. A. Garcia-Alvarado, and Z. Gunata. (2006). GC–MS and GC–olfactometry analysis of aroma compounds in a representative organic aroma extract from cured vanilla (*Vanilla planifolia* G. Jackson) beans. *Food Chemistry* 99:728–735.
34. Pérez-Silva A., L. A. Hernández-Vásquez, M. A. Vivar-Vera, F. B. Tavares-González, E. Paz-Gamboa, (2018), "Evaluación del contenido de

- glucovainillina durante lamaduración de los frutos de *Vanilla planifolia*”, Journal CIM Vol. 6, Núm. 1.
35. Pérez-Silva A, M. Nicolas-Garcia, T. Petit · J. B. Dijoux, M. Á. Vivar-Vera, P. Besse, M. Grisoni, (2021) “Quantification of the aromatic potential of ripe fruit of *Vanilla planifolia* (Orchidaceae) and several of its closely and distantly related species and hybrids”, *European Food Research and Technology*, 247, 1489–1499.
 36. P. C. Parada-Molina, A. Pérez-Silva, C. R. Cerdán-Cabrera, A. Soto-Enrique, (2022), “Condiciones climáticas y microclimáticas en sistemas de producción de vainilla (*Vanilla planifolia* Jacks ex Andrews) en México”, *Agronomía Mesoamericana*, vol. 33(2), 2022.
 37. Purseglove, J.W., E.G. Brown, C.L. Green, and S.R.J. Robbins. 1981. *Spices*. Vol. 2, Longman, London, pp. 644–733.
 38. Porras Afaro, A. and P. Bayman, 2007. Mycorrhizal fungi of *Vanilla*: Diversity, specificity and effects on seed germination and plant growth. *Mycologia* 99:510–525.
 39. Ranadive, A.S. 2005. *Vanilla cultivation*. The Proceedings of the First International Congress. Princeton, NJ, USA, November 11–12, 2003, 25–31.
 40. Ramírez, R. S., Gravendeel, B., Singer, R. B., Marshall. C. R., & Pierce, N. E. (2007). Dating the origin of the Orchidaceae from a fossil orchid with its pollinator. *Nature*, 448, 1042-1045.
 41. Salamanca J., A; sadeghian KH., S., (2014) La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia. Cenicafé .
 42. Soto Arenas, M. A. & Robert Dressler., (2010). A revision of the Mexican and Central American species of *vanilla plumier ex miller* with a characterization of their its region of the nuclear ribosomal dna. Instituto de Ecología, UNAM, Circuito Exterior s.n. Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510 México D.F., MEXICO. 285—354. 2010.

43. Soto Arenas, M.A. 2003. Vanilla. In: Pridgeon, A. M., P. J. Cribb, M. W. Chase, and F. N. Rasmussen, eds. *Genera Orchidacearum Vol. 3. Orchidoideae (Part two). Vanilloideae*. Oxford University Press, Oxford, 321–334.
44. SAGARPA-SIAP. (2014). Inifab. Consulta de base de datos de producción, superficie, rendimiento y precio de productos agropecuarios. Sistema agropecuario de consulta (SIACON), 1980-2009. Versión Electrónica. México.
45. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2015., “Muestreo y diagnóstico de plagas y enfermedades presentes en el cultivo de vainilla”. COFUPRO.
46. Sasikumar, B., J. Rema, and P.N. Ravindran. 1992. Vanilla. *Indian Cocoa, Arecanut and Spices Journal* 16:6–10.