



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTENCIA

INSTITUTO DE HORTICULTURA

VALORACIÓN DE SUSTRATOS EN LA PRODUCCIÓN

HIDROPÓNICA VERTICAL DE FRESA (*Fragaria x ananassa* Duch.)

T E S I S

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

PRESENTA:

JORGE ENRIQUE MENDOZA PAREDES

JUNIO DE 2015

CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES



Instituto de Horticultura

**VALORACIÓN DE SUSTRATOS EN LA PRODUCCIÓN HIDROPÓNICA
VERTICAL DE FRESA (*Fragaria x ananassa* Duch.)**

Tesis realizada por **Jorge Enrique Mendoza Paredes** bajo la dirección del Comité Revisor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

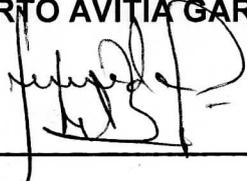
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR: 

DRA. ANA MARÍA CASTILLO GONZÁLEZ

ASESOR: 

DR. EDILBERTO AVITIA GARCÍA

ASESOR: 

DR. JOEL PINEDA PINEDA

ASESOR: 

DR. LUIS ALONSO VALDEZ AGUILAR

DEDICATORIA

A mis padres que son el pilar fundamental de los que soy ahora, Pedro Jorge Mendoza Cuatecontzi y Blanca Estela Paredes Sánchez por su increíble apoyo y amor.

A mi novia, esposa, amiga y alma gemela Carla Irene Campos Balon por su infinito amor y comprensión.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo por abrirme sus puertas para adquirir nuevos conocimientos.

Al comité asesor, a la Dra. Ana María Castillo González, Dr. Edilberto Avitia García, Dr. Joel Pineda Pineda y al Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar, por su disposición e importantes aportaciones realizadas al desarrollo del presente trabajo.

A la Q.F.B. Ángela Barrera por el apoyo brindado en el laboratorio de anatomía de frutales para la realización de este trabajo.

Al Lic. Juan Botello por su amistad y apoyo durante la fase experimental del cultivo en el invernadero.

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología por el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios de maestría.

A los profesores del Instituto de Horticultura que brindaron sus conocimientos de manera desinteresada y amable.

DATOS BIOGRÁFICOS

El autor de la presente tesis, Químico Farmacobiologo Mendoza Paredes, Jorge Enrique, nació en Atizapán de Zaragoza Estado de México el 11 de octubre de 1989. En 2007 ingresa a la Facultad de Ciencias Químicas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, egresando en diciembre del 2012 con el reconocimiento de los cinco mejores promedios de la generación 2007 – 2012, para entrar en enero del 2013 a la Maestría en Ciencias en Horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo.

INDICE

ÍNDICE DE CUADROS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
RESUMEN/ABSTRACT	9
1.- INTRODUCCIÓN.....	1
2.- OBJETIVOS	3
3.- REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1 Descripción del género <i>Fragaria</i>	4
3.2 Cultivares	9
3.3 Situación mundial de la fresa (2013).....	10
3.4 Situación nacional de la fresa (2013).....	11
3.5 Cultivo vertical	11
3.6 Sustratos y sus características físicas.	14
4.- MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
4.1 Localización.....	18
4.2 Material vegetal utilizado	18
4.3 Diseño experimental	24
4.4 Temperatura y Humedad relativa	24
4.5 Temperatura del sustrato.....	25
4.6 Características físicas y químicas de los sustratos	26
4.6.1 Características físicas de sustratos	26
4.6.1.1 Curvas de liberación de humedad	26
4.6.1.2 Densidad aparente.....	27

4.6.1.3 Espacio poroso total.....	28
4.6.1.4 Capacidad de retención de humedad.....	28
4.6.1.5 Capacidad de aireación.....	29
4.6.1.6 Agua fácilmente disponible (%).....	30
4.6.1.7 Agua de reserva.....	30
4.6.1.8 Agua difícilmente disponible.....	31
4.6.1.9 Agua total disponible.....	31
4.6.2 Características químicas de los sustratos.....	32
4.7 Intensidad luminosa.....	32
4.8 Temperatura de hoja.....	33
4.9 Concentración de CO ₂ ambiental.....	33
4.10 Oxígeno disuelto y temperatura de la solución nutritiva.....	33
4.11 Variables de planta.....	34
4.11.1 Longitud de peciolo.....	34
4.11.2 Diámetro de peciolo.....	34
4.11.3 Peso seco de planta, de la parte aérea y de la raíz.....	34
4.11.4 Relación parte aérea/ raíz.....	35
4.11.5 Área foliar.....	35
4.12 Análisis nutrimental.....	35
4.13 Variables del fruto.....	36
4.13.1 pH del fruto.....	36
4.13.2. Acidez titulable.....	36
4.13.3. Sólidos solubles totales.....	37

4.13.4. Relación Solidos Solubles Totales/Acidez Titulable	37
4.13.5. Firmeza	37
4.14 Peso por fruto total	37
4.15 Rendimiento por corte, Número de frutos por corte, Rendimiento total y Número de frutos total	38
4.16 Análisis de datos	38
5.- RESULTADOS	39
5.1 Comportamiento de la temperatura a través de los meses de evaluación	39
5.1.1 Temperatura del sustrato	39
5.1.2 Intensidad luminosa	48
5.1.3 Temperatura de hoja por nivel del tubo y hora del día	49
5.1.4 Concentración de CO ₂ ambiental.....	50
5.1.5 Oxígeno disuelto y temperatura de la solución nutritiva	51
5.2 Características físicas y químicas de sustratos	53
5.2.1 Características físicas iniciales de los sustratos	53
5.2.2 Características físicas finales de los sustratos.....	59
5.2.3 Características químicas iniciales de los sustratos	65
5.2.4 Características químicas finales de sustratos	65
5.3. Variables de planta	66
5.4 Concentración nutrimental en la planta.....	83
5.5 Características del fruto	93

5.5.1 Caracterización química del fruto	93
5.6 Número de frutos y rendimiento por corte·planta ⁻¹ , número de frutos totales·planta ⁻¹ , rendimiento total·planta ⁻¹ (g) y peso del fruto (g)	96
6. DISCUSIÓN.....	110
7.- CONCLUSIÓN.....	149
8. LITERATURA CITADA	150
ANEXO.....	170

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Concentración y fertilizantes utilizados para la preparación de la solución de Steiner, aplicada en cultivo vertical de fresa.	23
Cuadro 2. Temperatura (T) y humedad relativa (HR) media, máxima y mínima registrada en los meses de duración del cultivo vertical de fresa.	25
Cuadro 3. Temperatura y humedad relativa promedio Día/Noche.	25
Cuadro 4. Resultados de la concentración de CO ₂ (ppm) ambiental en cuatro diferentes horas del día por nivel del tubo en el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.	50
Cuadro 5. Características físicas iniciales de los sustratos utilizados en el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.	58
Cuadro 6. Resultados de las características físicas de sustratos finales utilizados en cultivo vertical hidropónico de tres cultivares de fresa.	60
Cuadro 7. Correlaciones de las características de sustratos finales utilizados en el cultivo vertical hidropónico de tres cultivares de fresa.	64
Cuadro 8. Valores iniciales de pH y conductividad eléctrica de sustratos usados en el cultivo hidropónico vertical de fresa.	65
Cuadro 9. Valores de pH y conductividad eléctrica por sustrato y por nivel del tubo al final del ciclo de cultivo hidropónico vertical de fresa.	65
Cuadro 10. Correlaciones de las características de las plantas obtenidas en el cultivo vertical hidropónico de tres cultivares de fresa.	82
Cuadro 11. Firmeza de fruto (lb) en los diferentes sustratos de tres cultivares de fresa en cultivo hidropónico vertical.	94

Cuadro 12. Resultados de pH de fruto, acidez titulable, firmeza, sólidos solubles totales, relación sólidos solubles totales /acidez titulable en frutos de tres cultivares de fresa.95

Cuadro 13. Número de frutos totales·planta⁻¹ de los tres sustratos de fresa y niveles del tubo bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.....103

Cuadro 14. Rendimiento total·planta⁻¹ de los tres sustratos por nivel del tubo del cultivo hidropónico vertical de fresa.....107

Cuadro 15. Número de frutos totales·planta⁻¹, Rendimiento total·planta⁻¹ y Peso de fruto total·planta⁻¹ obtenido en la producción hidropónica vertical de fresa.....108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Posición y distribución de las plantas de fresa en los tres niveles en los tubos de plástico negro verticales.	21
Figura 2. Comportamiento de la temperatura de los sustratos utilizados en cultivo hidropónico vertical de fresa.	39
Figura 3. Comportamiento de la temperatura de los sustratos utilizados en los diferentes niveles del tubo en el cultivo hidropónico vertical de fresa.	40
Figura 4. Comportamiento de la temperatura de los sustratos utilizados en el cultivo hidropónico vertical de fresa en cuatro horas del día.	41
Figura 5. Temperatura en los diferentes sustratos utilizados en el cultivo hidropónico vertical de fresa.	42
Figura 6. Temperatura de sustrato en los diferentes niveles del tubo evaluados en el cultivo hidropónico vertical de fresa.	43
Figura 7. Temperatura de sustrato en las diferentes horas del día en el cultivo hidropónico vertical de fresa.	44
Figura 8. Temperatura del sustrato en cuatro horas del día en el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.	46
Figura 9. Temperatura de sustrato en cuatro diferentes horas del día por nivel del tubo en el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.	47
Figura 10. Variación de la intensidad luminosa en diferentes horas del día por nivel del tubo en el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.	48

Figura 11. Variación de la temperatura de la hoja en diferentes horas del día y por nivel del tubo en el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.....	49
Figura 12. Concentración de oxígeno disuelto en la solución nutritiva en el tanque de almacenamiento a diferentes horas del día utilizada en el cultivo hidropónico de fresa.....	51
Figura 13. Temperatura de solución nutritiva en el tanque de almacenamiento en diferentes horas del día en el cultivo hidropónico de fresa.	52
Figura 14. Curva de liberación de humedad para el sustrato Tez 100 al momento del establecimiento del cultivo hidropónico vertical de fresa. ..	54
Figura 15. Curva de liberación de humedad para el sustrato Tez 75 al momento del cultivo hidropónico vertical de fresa.....	55
Figura 16. Curva de liberación de humedad para el sustrato Tez 50 al momento del establecimiento del cultivo hidropónico vertical de fresa.....	56
Figura 17. Curva de liberación de humedad para el sustrato Tez 100 al final del ciclo de cultivo hidropónico vertical de fresa.....	61
Figura 18. Curva de liberación de humedad para el sustrato Tez 75 al final del ciclo de cultivo hidropónico vertical de fresa.....	62
Figura 19. Curva de liberación de humedad para el sustrato Tez 50 al final del ciclo de cultivo hidropónico vertical de fresa.....	63
Figura 20. Morfología de las plantas completas cosechadas obtenidas del sustrato Tez 100 al finalizar el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.	67

Figura 21. Morfología de las plantas completas cosechadas obtenidas del sustrato Tez 75 al finalizar el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.	68
Figura 22. Morfología de las plantas completas cosechadas obtenidas del sustrato Tez 50 al finalizar el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.	69
Figura 23. Longitud de peciolo de hoja en los diferentes sustratos utilizados en el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.	70
Figura 24. Longitud de peciolo de planta de los diferentes cultivares utilizados en el cultivo hidropónico vertical de fresa.	71
Figura 25. Grosor de peciolo de planta de los diferentes cultivares utilizados en el cultivo hidropónico vertical de fresa.	72
Figura 26. Peso seco por planta en los diferentes niveles del tubo del cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.	73
Figura 27. Peso seco por planta en los diferentes cultivares utilizados en el cultivo hidropónico vertical de fresa.	74
Figura 28. Peso seco aéreo por planta en los diferentes niveles del tubo del cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.	75
Figura 29. Peso seco aéreo por planta en los diferentes cultivares utilizados en el cultivo hidropónico vertical de fresa.	76
Figura 30. Peso seco de raíz por planta en los diferentes niveles del tubo del cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.	77

Figura 31. Relación peso seco aéreo por planta/peso seco de raíz por planta en los diferentes niveles del tubo del cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.	78
Figura 32. Relación peso seco aéreo/peso seco de raíz por planta en los diferentes cultivares utilizados en el cultivo hidropónico vertical de fresa.	79
Figura 33. Área foliar en los diferentes niveles del tubo del cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.	80
Figura 34. Área foliar por planta de los diferentes cultivares utilizados en el cultivo hidropónico vertical de fresa.....	81
Figura 35. Concentración de nitrógeno en plantas de fresa de tres cultivares bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.	83
Figura 36. Concentración de fósforo en plantas de fresa en tres diferentes niveles del tubo bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.....	84
Figura 37. Concentración de fósforo en plantas de fresa de tres cultivares bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.	85
Figura 38. Concentración de potasio en plantas de fresa cultivadas en tres sustratos bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.	86
Figura 39. Concentración de potasio en plantas de fresa cultivadas en tres diferentes niveles del tubo bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.....	87
Figura 40. Concentración de potasio en plantas de fresa de tres cultivares bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.	88

Figura 41. Concentración de magnesio en plantas de fresa cultivadas en tres sustratos bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.	89
Figura 42. Concentración de magnesio en plantas de fresa de tres cultivares bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.	90
Figura 43. Concentración de sodio en plantas de fresa cultivadas en tres diferentes niveles del tubo bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.....	91
Figura 44. Concentración de sodio en plantas de fresa de tres cultivares bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.	92
Figura 45. Número de frutos por corte·planta ⁻¹ en los diferentes sustratos utilizados en el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa....	97
Figura 46. Número de frutos por corte·planta ⁻¹ en los diferentes niveles del tubo del cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.	98
Figura 47. Número de frutos por corte·planta ⁻¹ de los tres cultivares de fresa bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.	99
Figura 48. Número de frutos totales·planta ⁻¹ en los diferentes niveles del tubo del cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.	100
Figura 49. Número de frutos totales·planta ⁻¹ de los tres cultivares de fresa bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.	101
Figura 50. Número de frutos totales·planta ⁻¹ en los tres sustratos de fresa bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.	102
Figura 51. Rendimiento total·planta ⁻¹ en los tres sustratos utilizados en el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.	104

Figura 52. Rendimiento total·planta⁻¹ en los diferentes niveles del tubo del cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.105

Figura 53. Rendimiento total·planta⁻¹ de los tres cultivares de fresa bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.106

VALORACIÓN DE SUSTRATOS EN LA PRODUCCIÓN HIDROPÓNICA VERTICAL DE FRESA (*Fragaria x ananassa* Duch.)

SUBSTRATES ASSESSMENT IN THE HYDROPONIC STRAWBERRY VERTICAL PRODUCTION (*Fragaria x ananassa* Duch.)

RESUMEN

México es el segundo país exportador de fresa a nivel mundial; sin embargo, existe poca información del potencial del cultivo hidropónico vertical en fresa. Con los objetivos de evaluar el efecto de diferentes mezclas de sustratos sobre el desarrollo, rendimiento, estado nutrimental y calidad del fruto de tres cultivares de fresa en cultivo hidropónico vertical y determinar si existen cambios físicos y químicos en cada sustrato a lo largo del contenedor que influyan en el desarrollo y rendimiento del cultivo, se establecieron plantas de los cultivares Camino Real, Monterey y Festival en bolsa de polietileno negro de 15 cm de diámetro, 160 cm de altura y de 28.3 L de capacidad en donde se colocaron 14 plantas por bolsa. Se probaron tres sustratos: tezontle 100 % (Tez 100), tezontle + turba proporción 3:1 (v/v) (Tez 75) y tezontle + turba 1:1 (v/v) (Tez 50). Los riegos se hicieron con la solución nutritiva de Steiner al 100 %, mediante riego localizado. El diseño experimental fue al azar con tres repeticiones por tratamiento en arreglo factorial. Los factores fueron: sustrato, cultivar, hora del día (7:00, 10:00, 13:00 y 16:00 h) y altura de las plantas en el tubo (nivel alto, 160 a 130 cm; nivel medio, 110 a 80 cm y nivel bajo, 60 a 30 cm). Se evaluó la temperatura del sustrato y de la hoja, la intensidad luminosa y concentración de CO₂ por encima de la hoja, las características físicas y químicas de los sustratos al inicio (noviembre 2013) y al final del ciclo de cultivo (mayo 2014); la concentración nutrimental de las plantas, el número, peso y calidad de los frutos y el rendimiento por planta. Los resultados mostraron que al final del ciclo, en todos los sustratos la densidad aparente se incrementó entre 43 y 37 %; el espacio poroso total disminuyó 48.4 % en Tez 100, la capacidad de aireación varió entre sustratos, disminuyó 81.3 % en Tez 100, aumentó 41 % en Tez 75 y 311% en Tez 50. La capacidad de retención de humedad aumentó 55 % en Tez 100, disminuyó 19 % en Tez 75 y 14 % en Tez 50. La temperatura del sustrato fue mayor en Tez 100 (19.7 °C), en el nivel alto (20.1 °C) y a las 16:00 h (27.4 °C). La mejor acumulación de peso seco de la planta se presentó en el nivel alto (9.6 g) y medio del tubo (8.6 g), sin diferencias entre sustratos. El estado nutrimental de la planta fue similar entre sustratos y niveles del tubo; la calidad del fruto fue similar entre sustratos y cultivares, el peso del fruto fue mayor en las plantas de 'Monterey' (10.7 g); el mejor rendimiento (60.7 g·planta⁻¹) y número de frutos (6.1) por planta fue obtenido con Tez 100, en el nivel medio y con el cultivar Festival. La mayor temperatura (23.9 °C) e intensidad luminosa (68.55 watts·m⁻²) de la hoja se presentó en el nivel alto y a las 13:00 h; la concentración de CO₂ fue muy similar en todos los niveles del tubo (428.4 a 427.5 ppm), a las 07:00 h se presentó la concentración más alta (444.8 ppm). Se concluye que el mejor sustrato fue tezontle al 100 % y el cv. Festival para esta técnica de cultivo en fresa.

Palabras clave: Cultivo vertical, temperatura de sustrato, hidroponía, cultivo sin suelo, tezontle.

SUMMARY

México is the second largest exporter country of strawberries worldwide; however, there is little information of the potential of growing this species under vertical hydroponic systems. Fourteen strawberry plants of cultivars Camino Real, Monterey and Festival were transplanted into black polyethylene vertical containers (15 cm diameter, 160 cm height, 28.3 L volume) in order to assess the effect of several growing media on development, yield, nutrient status and quality of fruits, and to determine whether there are changes in their physical and chemical properties through the container profile that may modify plants growth and yield. Three growing media were evaluated: tezontle 100% (Tez 100), tezontle + sphagnum peat at 3:1 (v/v) (Tez 75) and tezontle + sphagnum peat at 1:1 (v/v) (Tez 50). Irrigations were conducted with Steiner's nutrient solution at full strength through a localized irrigation system. The experiment was set up in a factorial completely randomized design with three replications per treatment; the factors studied were: the growing medium, cultivar, hour of sampling (7:00, 10:00, 13:00 and 16:00 h) and height of the plant in the vertical column (top level: 160 - 130 cm; medium level: 110 - 80 cm and bottom level: 60 - 30 cm). Growing medium and leaf temperature, light intensity, CO₂ concentration above the leaves, initial (Nov. 2013) and final (May 2014) physical and chemical parameters of the media and nutrient concentration, number, weight, quality and yield of fruits were measured. The results showed that at the end of the study the apparent density of all the media were increased from 37% to 43%, pore space decreased 48.4% in Tez 100, air capacity varied among the three growing media, decreasing 81.3% in Tez 100, increasing 41% and 311% in Tez 75 and Tez 50, respectively. Moisture retention capacity increased 55% in Tez 100, decreased 19% and 14% in Tez 75 and 50%, respectively. Temperature of the growing medium was higher in Tez 100 (19.7 °C) at the top level (20.1 °C) and at 16:00 h (27.4 °C). The highest dry weight was observed in plants located at the top (9.6 g) and medium (8.6 g) level, with no differences among growing media. Nutrient status in plants was similar among the growing medium and the height of the plant in the vertical column; fruit quality was similar among the growing media and cultivars, fruit weight was higher in plants of cultivar 'Monterey' (10.7 g). The highest yield (60.7 g·plant⁻¹) and number of fruits per plants (6.1) were observed in plants grown in Tez 100, in the middle level and with cultivar 'Festival'. The highest temperature (23.9 °C) and light intensity (68.55 watts·m⁻²) in leaves were observed in plants at the top level and at 13:00 h; CO₂ concentration was similar in all the levels of the vertical column (428.4 to 427.5 ppm), at 07:00 h the highest concentration was detected (444.8 ppm). It was concluded that the best growing medium was tezontle at 100% and cultivar 'Festival' for this technique of strawberry cultivation.

Keywords: Vertical farming, substrate temperature, hydroponics, soilless culture, tezontle.

1.- INTRODUCCIÓN

La fresa es una de las frutillas más cultivadas a nivel mundial y valorada por su fuente de vitaminas y minerales, sabor y la capacidad para ser procesada industrialmente para un sin número de productos. Es uno de los cultivos de elevada importancia socioeconómica y un alto potencial de mercado; sin embargo, en el país el cultivo se enlaza con problemas de descapitalización, baja productividad y deficiente comercialización.

Este cultivo se desarrolla en cerca de 11 entidades del país, de las cuales tres son las que concentran la mayor superficie: Michoacán, Guanajuato y Baja California, los que contribuyen con el 95% tanto de la superficie sembrada como de la producción. Si bien la fresa ocupa menos del 1% de la superficie total dedicada a la agricultura, tiene un papel importante a nivel regional; su importancia radica en dos aspectos: 1) en el número de empleos que genera en la época de cosecha y en las diversas actividades que se realizan en las empacadoras; y 2) en las grandes inversiones que se canalizan para su producción (SIAP, 2015).

México a nivel mundial, es el tercer productor de fresa con 379 464 t, por debajo de China y Estados Unidos, con rendimientos entre 3 005 304 y 1 360 869 t; China es el principal productor con 3 005 304 t (FAOSTAT, 2013).

En los últimos años el cultivo de fresa ha dado un giro en las técnicas de producción, introduciendo la hidroponía y cultivo en sustrato con la finalidad de evitar los patógenos propios del suelo que limitan el desarrollo del material vegetal y ampliar la superficie cultivada; sin embargo, para lograr la eficiencia

de estas técnicas productivas, se requiere de experimentación para controlar aspectos que en el cultivo en suelo son imperceptibles.

Los sustratos para la producción de cultivos deben de cumplir con ciertos requerimientos en propiedades físicas y químicas. Para alcanzar dichos requerimientos se recurre a la mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos para conformar el sustrato. Numerosos han sido los intentos por caracterizar un sustrato ideal, estos estudios tienen un enfoque principal en las propiedades físicas, químicas y biológicas del sustrato, debido a que ejercen un enorme impacto en la calidad final de la planta (Neal y Wagner, 1983).

De acuerdo con las condiciones que debe cumplir un sustrato, Fonteno (1994) menciona las siguientes: 1) proveer agua, 2) suministrar nutrimentos, 3) permitir intercambio de gases hacia y desde las raíces y 4) dar soporte a las plantas. Desafortunadamente, se piensa que estas condiciones están inmediatamente presentes después de que los componentes del sustrato se mezclan. Para valorar la calidad de un sustrato no basta conocer las propiedades generales de sus principales componentes, sino que es necesario determinarlas para cada componente o mezcla en particular, ya que las variaciones suelen ser muy importantes.

El cultivo hidropónico vertical de fresa es un sistema poco implementado en México, por desconocimiento de las ventajas y manejo del cultivo en este sistema.

2.- OBJETIVOS

1. Evaluar el efecto de diferentes mezclas de sustratos sobre el desarrollo, rendimiento, estado nutrimental y calidad del fruto de tres cultivares de fresa en cultivo hidropónico vertical.
2. Determinar si existen cambios físicos y químicos en cada sustrato al final del ciclo de cultivo y a lo largo del contenedor que influyan en el desarrollo y rendimiento del cultivo.

3.- REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Descripción del género *Fragaria*

La fresa pertenece a la familia *Rosaceae*, teniendo distribuidos a nivel global especies de este género desde climas fríos a tropicales, existiendo en consecuencia un género con adaptabilidad a diferentes climas (Hancock, 1999).

La fresa comercial cultivada es un híbrido en la *F. chilonesis* Duch. y *F. virginiana* dando por resultado a *Fragaria x ananassa* Duch. (Galletta y Bringhurst, 1990; Hancock, 1999; Vega, 2008).

La planta de fresa es herbácea perenne, de porte bajo no supera los 30 cm de altura. El tallo, denominado corona, es un órgano corto, fibroso, de donde se originan las raíces, hojas, frutos y estolones. La velocidad con que se forman los distintos órganos y su cantidad, así como la predominancia ó coexistencia del estado vegetativo y el reproductivo, son determinados por la interacción de factores ambientales, por las características genéticas propias del cultivar y por el manejo a que es sometida la planta (Galletta y Bringhurst, 1990; Dávalos *et al.*, 2011).

El sistema radical de la fresa está formado por raíces primarias y secundarias. Las primeras son producidas en una sucesión acrópeta en los nudos que se forman en la corona y son de naturaleza fibrosa; tienen una vida media, de uno a dos años. Las raíces de la fresa pueden crecer en diversas texturas de suelo, aunque su desarrollo es más profuso en suelos de textura gruesa que en arcillosos (Hancock, 1999; Ellis *et al.*, 2006).

Las plantas adultas tienen de 20 a 35 raíces primarias; el sistema radical es considerado un sistema radical superficial. Las raíces primarias además de conducir el agua y nutrimentos y dar protección, funcionan como órganos para almacenar carbohidratos en invierno. El sistema radical de la fresa presenta diferencias tanto entre especies como entre cultivares; a ellas se atribuye la alta adaptación del cultivo (Smith *et al.*, 2006; Dávalos *et al.*, 2011).

Dentro de ciertos límites, el sistema radical de la fresa puede ser modificado o influenciado tanto por prácticas de cultivo (densidad, sistema de plantación y altura de surco), como por la nutrición.

En cultivares de día corto se ha observado que la mayor producción y desarrollo de las raíces ocurre durante el periodo de inactividad vegetativa y reproductiva (otoño – invierno). En las de día neutro, las cuales sí presentan actividad en otoño e invierno, no hay acumulación de carbohidratos en las raíces, lo que repercute en falta de vigor y poco desarrollo del sistema radical, consecuentemente son más susceptibles al ataque de patógenos (Galletta y Bringhurst, 1990).

Cualquier condición que afecte el crecimiento de las raíces, como suelos pesados, exceso de humedad poca cantidad de oxígeno en el suelo en invierno, así como la presencia de altas temperaturas en primavera, además de provocar estrés a las plantas, propician condiciones favorables para el ataque de patógenos (Smith *et al.*, 2006).

Al órgano de la fresa que botánicamente es un tallo, se le denomina corona. Es de tamaño corto, de entre 2 y 3 cm de longitud. Al ser trasplantada al vivero, o en siembras comerciales, la planta de fresa está constituida por sólo una corona primaria, pero con el transcurso de los días, alrededor de la corona primaria se desarrollan nuevas coronas, cuya formación es estimulada por temperaturas cálidas y fotoperiodos relativamente largos. Por lo tanto, las plantas adultas de fresa pueden tener de cuatro hasta siete coronas o más lo que depende del cultivar, del sistema de plantación y de la densidad de población. Las coronas son importantes porque es ahí donde se originan los racimos florales y los estolones. Por lo tanto, a mayor cantidad de coronas mayor número de flores ó estolones primarios. Para cada cultivar es deseable estimar su crecimiento vegetativo y la cantidad de coronas, de lo cual depende el máximo rendimiento de fruto (Galletta y Bringhurst, 1990; Hancock, 1999).

El estolón botánicamente es un tallo rastrero que es emitido por la planta cuando el fotoperiodo y la temperatura son favorables. El estolón o guía es una de las dos formas de propagación asexual de la fresa; la otra forma de propagación asexual convencional es por coronas (Dávalos *et al.*, 2011).

Dependiendo del cultivar, las hojas de la fresa varían en cantidad, tamaño, forma de la base, forma de los bordes, con lámina cóncava, plana ó convexa, disposición en la planta, grosor, color, pubescencia, durabilidad y número de folíolos. Normalmente el número de folíolos es tres. La producción de hojas también es regulada por condiciones ambientales, entre ellos fotoperiodo y temperatura: fotoperiodo largo y temperatura alta la favorecen; fotoperiodo corto

y baja temperatura la detienen parcial o totalmente. Las condiciones propicias para la emisión de hojas favorecen el crecimiento de la superficie foliar, en tanto que las adversas lo reducen (Galletta y Bringhurst, 1990; Smith *et al.*, 2006).

El fruto se origina en el racimo floral que depende directamente del tallo. Por lo general cada racimo consta de cuatro flores llamadas primaria, secundaria, terciaria y cuaternaria en razón de su tamaño y secuencia en que se forman. La flor primaria produce el fruto de mayor tamaño, mismo que disminuye en las flores secundarias y terciarias. Una inflorescencia tiene alrededor de 15 flores o más. Las flores de los cultivares comerciales son hermafroditas y autofértiles, aunque probablemente hay un alto porcentaje de polinización cruzada atribuible a las abejas y al viento. La flor de la fresa está conformada por 10 sépalos, cinco pétalos y 20 a 30 estambres con un promedio de 60 a 600 pistilos (Hancock, 1999), dependiendo de si es una flor terciaria o primaria respectivamente. Para que la fruta alcance un desarrollo uniforme es indispensable que todos los pistilos sean fecundados; de lo contrario, la fruta crecerá deforme, según el porcentaje de fallas en la fecundación. El fruto madura entre 25 y 35 días después de la fecundación, dependiendo del cultivar y época del año. En presencia de temperaturas relativamente cálidas el fruto madura con mayor rapidez pero tiende a perder tamaño (Hancock, 1999; Ellis *et al.*, 2006; Smith *et al.*, 2006; Dávalos *et al.*, 2011).

El desarrollo de la fresa es regulado por factores medioambientales (principalmente la temperatura y el fotoperiodo), y fisiológicos los cuales afectan al rendimiento de frutos y crecimiento de la planta; también se establece que la

temperatura óptima de crecimiento de la planta de fresa es de 15 a 25 °C, lo cual también es dependiente del cultivar, por arriba o por debajo de estas temperaturas se tienen efectos negativos sobre el desarrollo de la planta y del fruto; si estas temperaturas se presentan durante el periodo de formación de botones florales o en el periodo de fructificación, las temperaturas regulan la iniciación floral y el crecimiento vegetativo, teniendo una tendencia de iniciar la floración conforme la temperatura es menor y de manera inversa para el inicio del desarrollo vegetativo (Galletta y Bringhurst, 1990; Hancock, 1999; Jones, 2005). La principal característica de las plantas se debe al efecto de la duración del fotoperiodo; las plantas de fotoperiodo corto tienen la característica de iniciar el desarrollo floral siempre y cuando la duración del fotoperiodo sea menor de 12 horas y las plantas de fotoperiodo neutro tienen la característica de iniciar el desarrollo floral sin importar el fotoperiodo pero manteniendo una temperatura adecuada para la floración (Hancock, 1999).

La temperatura óptima para la raíz de fresa es de 17 a 24 °C, (Biela *et al.*, 1999; Short, 2011), ya que si encuentra por arriba o por debajo de este intervalo se pueden esperar efectos negativos sobre la planta, sobre todo por arriba se disminuye físicamente la cantidad de la difusión y concentración de O² en la raíz.

La intensidad luminosa es un factor muy importante para el desarrollo de la planta, ya que ésta determina la tasa de asimilación de CO₂ de la fotosíntesis. El punto de saturación de la fresa en la asimilación de CO₂, se encuentra entre

800 y 1200 $\mu\text{m CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, siendo equivalente a 608.00 y 405.33 Wm^{-2} (Hancock, 1999).

3.2 Cultivares

El cultivar Camino Real es una planta de fotoperiodo corto, obtenida por la Universidad de California. Este cultivar presenta características físicas importantes, como que es de hábito de crecimiento muy compacto, los frutos típicamente son de forma cónica-simétrica, con gran calidad de fruto y buen rendimiento. Los rendimientos encontrados teóricos – experimentales son de 1 813 g planta^{-1} con una densidad de 43 250 plantas ha^{-1} con una duración de 6 meses de cosecha, junto con un tamaño de fruto promedio de 31.1 g (Shaw *et al.*, 2002).

El cultivar Monterey de relativo nuevo desarrollo, 2009, es un cultivar de fotoperiodo neutro, desarrollada por la Universidad de California, una de sus principales características es su alto rendimiento y su alta calidad de frutos; es similar al cultivar Diamante en cuanto a la característica de la planta. El cultivar Monterey es el típico cultivar de día neutro que produce frutos sin importar la duración del fotoperiodo cuando es tratada adecuadamente en cuanto a la temperatura ambiental, irrigación y nutrición. Los rendimientos obtenidos para este cultivar con una densidad de plantación de 43 250 planta ha^{-1} y con 6 meses de duración en el periodo de cosecha es de 3 301 g planta^{-1} , con un tamaño de fruto de 32.4 g (Shaw *et al.*, 2009).

Finalmente, Festival es un cultivar de fotoperiodo corto, el cual tiene la característica de ser una planta vigorosa; en relación a sus frutos, tienen un gran sabor, pulpa firme de color rojo intenso y forma cónica. Este cultivar fue desarrollada en el estado de Florida, por la compañía Florida Foundation Seed Producers Inc. Los resultados de rendimiento muestran que se obtienen 700 g planta⁻¹ con una densidad de plantación de 43 250 planta ha⁻¹ en un periodo de cosecha de 4 meses. Obteniendo frutos con un peso promedio de 31.6 g. (Chandler, 2004).

3.3 Situación mundial de la fresa (2013)

Los cinco primeros países con mayor superficie cosechada, China, Polonia, Rusia, Estados Unidos y Alemania han mantenido sus mismas posiciones a lo largo de estos años, teniendo además una tendencia de incrementar esta superficie.

La producción total anual a lo largo de estos cuatro años, el primer lugar lo ocupa China debido a su gran área de superficie cosechada; sin embargo, su rendimiento por hectárea es de 27.0 t ha⁻¹. Estados Unidos posee el segundo lugar de producción con rendimiento de entre los 56 y 60 t ha⁻¹, el tercer productor es Turquía seguido de España; sin embargo, para el año 2012 y 2013 México ocupó el tercer lugar con 379 464 t ha⁻¹.(FAOSTAT, 2015).

3.4 Situación nacional de la fresa (2013)

La situación nacional de la fresa, en relación al área cosechada el estado de Michoacán siempre ha sido el estado con la mayor área de cultivo dedicada al cultivo de fresa, seguido de Baja California, el tercer lugar corresponde al estado de Guanajuato y el cuarto lugar corresponde para casi todos los años excepto el 2013, para el Estado de México y para Jalisco en el 2013. En relación a la producción total por estado, el estado de Michoacán es el principal estado productor, seguido de Baja California. El tercer lugar lo ocupa Guanajuato. (SIAP, 2015).

3.5 Cultivo vertical

El cultivo vertical es una técnica que lleva aproximadamente 40 años de ser investigada, utilizando diversos cultivos de porte pequeño los cuales principalmente han sido las lechugas y las fresas. Esta fue desarrollada en Europa particularmente en Italia y España (Anicua *et al.*, 2008; Resh, 2013). Las investigaciones iniciales se llevaron a cabo durante los años 1975 – 1985 por Morgan (1974); Tropea (1976); Tropea (1976); Giorlando (1978); Schippers (1978); Giorlando (1979); Janowski y Skapski (1980); Tropea (1980); Petralia *et al.* (1982); Manios (1984); Kapylov y Pupova (1985); Manios *et al.* (1985); Morard (1985). Su característica de plantación es utilizar un contenedor, sea una bolsa de polietileno larga de por lo mínimo un metro de altura, pero con diámetro no mayor a los 30 cm o utilizando macetas tipo piramidales de poliestireno o plástico rígido colocadas una encima de otras de manera diagonal

a sus vértices, donde en el primer ejemplo se colocaran plantas a los costados de la bolsa a lo largo de esta y en el segundo ejemplo en cada vértice de la maceta (4 en total por maceta), serán colocadas plantas y mientras más macetas se coloquen una encima de otra mayor cantidad de plantas se podrán colocar en el mismo espacio solo aumentando la altura de la columna.

La característica fundamental, es la ganancia y el uso eficiente del espacio para cultivar, ya que de manera tradicional solo se cultiva de manera horizontal, existiendo como límite la superficie física en donde se realiza; sin embargo, en el cultivo vertical se puede aumentar la densidad de plantas en un espacio determinado ya que estas al estar colocadas en una columna de cultivo se pueden ir colocando plantas a diferentes alturas generando así un aumento bastante considerable sin la necesidad de aumentar la superficie física requerida como en la manera tradicional (horizontal). Regularmente se han podido alcanzar densidad de plantas por m^2 de hasta 50 (Linsley-Noakes *et al.*, 2006), con un mínimo registrado de 20 plantas m^{-2} (Ramírez, 2011), de manera regular diversos autores manejan una densidad promedio de 24 plantas m^{-2} (Manios *et al.*, 1985; Anagnostou y Vasilakakis, 1995; Paraskevopoulou-Paroussi *et al.*, 1995; Vlachonasios *et al.*, 1995; Al-Raisy *et al.*, 2010; Villagra *et al.*, 2012). Tanto en suelo como en otros sistemas hidropónicos como el NFT, NGS, en bolsas, bolis con sustrato en una configuración horizontal, la densidad puede ser de 4 hasta 12 plantas m^{-2} (Jones, 2005; Resh, 2013).

Existen 3 tipos de sistema vertical, en los cuales todos utilizan sustrato como medio de crecimiento: bolsas colgantes, bolsas verticales y columnas ó torres con macetas.

Las bolsas colgantes son un tipo de técnica muy poco utilizada ya que la principal desventaja es que se debe tener una estructura que soporte el peso de estas, lo que hace que sea no tan rentable. Se utilizan sustratos ligeros como la perlita o piedra pómez (Marfa *et al.*, 1986).

El segundo tipo, bolsas verticales, éstas tienen la característica de estar colocadas sobre el suelo a diferencia de las anteriores, se pueden utilizar una gran diversidad de sustratos, como ejemplo se han utilizado sustratos orgánicos como la turba, cascarilla de arroz, fibra de coco, e inorgánicos como perlita, tezontle, vermiculita, arena y piedra pómez, aunque casi por lo regular se ocupan mezclas con sustratos orgánicos e inorgánicos (Janowski y Skapski, 1980; Tropea, 1980; Manios *et al.*, 1985; Marfa *et al.*, 1986; Anagnostou y Vasilakakis, 1995; Paraskevopoulou-Paroussi *et al.*, 1995; Vlachonasios *et al.*, 1995; Durner, 1999; Özeker *et al.*, 1999; Takeda, 1999; Nimah *et al.*, 2004; Jones, 2005; Linsley-Noakes *et al.*, 2006; Caso *et al.*, 2009; Al-Raisy *et al.*, 2010; Rowley *et al.*, 2010; Ramírez, 2011; Villagra *et al.*, 2012; Resh, 2013;).

Finalmente el tipo columna o torre con macetas es un sistema relativamente reciente, donde se utilizan macetas cuadradas de poliestireno diseñadas principalmente por la compañía Verti-Gro ® de Estados Unidos. En este sistema se puede crear una torre con estas macetas colocándolas una encima

de otra y soportadas por un tubo enterrado en el suelo, que le confiere estabilidad; las plantas se colocan en los vértices de las macetas y al colocar las macetas una encima de otra son colocadas en diagonal para dejar un espacio libre donde poner la planta. Es un sistema muy eficiente ya que se puede cultivar como si fuese una maceta colocada en el suelo; sin embargo, la gran desventaja de este sistema es el costo, ya que el poliestireno al ser un material relativamente frágil y ser susceptible a la degradación solar, hacen que no sea tan durable a largo plazo y requiera ser sustituido por uno nuevo en un cierto tiempo (cada cuatro años). El costo de cada una de estas macetas al mayoreo es de aproximadamente 4.75 dólares lo cual es caro (Resh, 2013).

De manera general las bolsas verticales y las columnas pueden ser utilizadas como un sistema hidropónico abierto o cerrado.

3.6 Sustratos y sus características físicas.

Los sustratos utilizados en la agricultura, poseen propiedades físicas y químicas diferentes e inherentes a su naturaleza, estas también pueden variar entre sí dependiendo de la forma u origen de donde son extraídos o transformados. (Abad *et al.*, 2004; Adams, 2004; Anicua *et al.*, 2008; Wallch, 2008). En muchos sistemas comerciales donde se ocupan cultivos sin suelo, pueden ocuparse sustratos individuales, los cuales están compuestos por un único componente, ó sustratos formados por dos o más materiales (Ingram *et al.*, 1993; Urrestarazu, 2004;).

Los sustratos al ser una alternativa al cultivo tradicional en suelo, deben proveer las funciones básicas que provee el suelo a las plantas que son abastecer agua a la planta, intercambio gaseoso entre las raíces y el ambiente, soporte físico a las plantas y la facilidad para suministrar nutrimentos (Abad *et al.*, 2004).

Las propiedades físicas que componen a los sustratos son la densidad aparente, tamaño de partícula, espacio poroso total (EPT), tamaño de poros, capacidad de aireación (CA), capacidad de retención de humedad (CRH), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (ADR), agua total disponible (ATD) y agua difícilmente disponible (ADD) (De Boodt *et al.*, 1974; Abad *et al.*, 2004; Wallch, 2008;).

Estas propiedades físicas se dan en secuencia, iniciando con el tamaño de partícula que proporciona el espacio poroso interparticular, que es el espacio vacío entre partículas de sustrato se hallen juntas. Si las partículas son grandes este espacio será mayor, al igual que si las partículas son irregulares; si son pequeñas será menor este espacio, provocando de manera general que exista menos espacio poroso total en el sustrato (Ingram *et al.*, 1993; Baixauli y Aguilar, 2002; Prasad y Chualáin, 2004; Blok *et al.*, 2008; Wallch, 2008; Resh, 2013).

La densidad aparente es un factor muy importante en los sustratos, ya que por definición los sustratos son casi en todos los casos más ligeros que el suelo con una densidad $< 0.4 \text{ gcm}^{-3}$ (Abad *et al.*, 2004). A menor densidad es más fácil el

uso y transportación de este, así como que también facilita que la raíz penetre en el sustrato (Blok *et al.*, 2008).

La porosidad es un factor muy importante en los sustratos y está dividida en dos: porosidad intraparticular, que es la correspondiente a los poros de los gránulos del sustrato que tienen conexión con el exterior, y la porosidad interparticular, que son espacios vacíos que se encuentran dentro del gránulo pero que no tienen comunicación con la exterior; la primera al aumentar hace que aumente el espacio poroso total y disminuya la densidad aparente del sustrato; para el segundo caso, la porosidad interparticular solo hace que la densidad aparente sea menor y no contribuya con el espacio poroso total (Lemaire, 1995 y Baixauli y Aguilar, 2002).

Existen dos tipos de poros correspondientes a los poros intergranulares, respecto a su tamaño: macroporos ($> 30 \mu\text{m}$) conocidos como no capilares, que son los que juegan un papel principal sobre la aireación del sustrato y los microporos ($< 30 \mu\text{m}$) conocidos como capilares, los cuales son los encargados de la capacidad de retención de humedad, principalmente (Ingram *et al.*, 1993; Baixauli y Aguilar, 2002; Abad *et al.*, 2004; Wallch, 2008; Resh, 2013;).

La capacidad de aireación (CA) y la capacidad de retención de humedad (CRH) son propiedades derivadas del espacio poroso total. Entre estos hay una relación inversamente proporcionales, si existe mayor cantidad de macroporos en un sustrato, mayor CA existirá; sin embargo, si hubiera mayor cantidad de

microporos la CRH será mayor (Ingram *et al.*, 1993; Abad *et al.*, 2004; Wallch, 2008).

La CA permite el flujo del O₂ del ambiente en la raíz, regularmente casi todos los sustratos orgánicos e inorgánicos son altamente porosos; sin embargo, regularmente los de origen inorgánico natural son los que presentan mayor CA y baja CRH, y los orgánicos naturales poseen una CA de media a adecuada y alta CRH (Asady *et al.*, 1985; Ingram *et al.*, 1993; Michel, 2007; Blok *et al.*, 2008; Wallch, 2008).

El uso eficaz de sustratos con unas características dadas, dependerá del cultivo, del material del contenedor, la forma y dimensiones del contenedor y las condiciones ambientales (Ingram *et al.*, 1993 y Urrestarazu y Salas, 2004) a las cuales estén sometidas. Los sustratos con el paso del tiempo se degradan mecánica, química o biológicamente (Verhagen, 2009), teniendo como resultado directo una pérdida de la estructura física del sustrato causando una alteración en las propiedades físicas de sustrato (Blok *et al.*, 2008).

4.- MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Localización

La investigación se llevó a cabo en un invernadero del Instituto de Horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo, ubicado geográficamente en las coordenadas 19° 20' latitud norte y 98° 53' longitud oeste a 2240 msnm.

4.2 Material vegetal utilizado

Se utilizaron plantas de fresa de los cultivares Camino Real (fotoperiodo corto), Monterey (fotoperiodo neutro) y Festival (fotoperiodo corto), todas estas procedentes de un vivero certificado de Zamora, Michoacán, México.

Antes del establecimiento de los tratamientos, las plantas fueron conservadas en refrigeración (5 °C) durante un mes aproximadamente, para ello se realizó una poda de raíz y hojas. Al finalizar el proceso anterior, se realizó un lavado con Interbusan $1\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ para evitar la aparición de enfermedades fungosas durante su almacenamiento. Las plantas se colocaron en bolsas de plástico conteniendo aserrín, como medio para preservar la humedad; mientras tanto se preparaban los tubos para el establecimiento de los tratamientos.

Al finalizar el mes de almacenamiento (21 de septiembre del 2013), las plantas se trasplantaron en bolsas negras de polietileno de 1 L con tezontle como sustrato, donde brotaron y se mantuvieron por 19 días (hasta el 9 de octubre del 2013), el riego de las plántulas fue con agua de la llave. Con esto se aseguró que las plantas establecidas en los tubos verticales fueran viables.

Los tratamientos se establecieron con los sustratos siguientes: 1) tezontle al 100% (Tez 100), 2) tezontle + turba en proporción 3:1 v/v (Tez 75) y 3) tezontle + turba proporción 1:1 v/v (Tez 50), en todos los casos el tamaño de partícula del tezontle fue de 2 a 3 mm de diámetro.

Los tubos verticales consistieron en bolsas de plástico negro de un calibre de 800 μ m, con una altura de 220 cm y 15 cm de diámetro. Para el sostén vertical de los tubos, internamente se colocaron dos tablas de madera en lados opuestos y paralelas, éstas tuvieron dimensiones de 2.5 cm de grosor x 4.0 cm de ancho x 180 cm de largo. Los tubos se llenaron con sustrato hasta 180 cm de altura, por arriba de éstos se realizó un amarre para cerrar el tubo y se sujetaron a una guía metálica que corría por arriba de ellos, los cuales estaban soportados sobre la estructura del invernadero.

En los tubos se realizaron perforaciones circulares de 5 cm de diámetro y 10 cm de profundidad. Estas se realizaron de forma dextrógira comenzando en la parte inferior del tubo a partir de los 30 cm del fondo y continuando cada 10 cm de altura hasta llegar a los 60 cm, teniendo en este estrato un total de cuatro perforaciones ubicadas en cuatro puntos equidistantes del tubo, ocupando los 0°, 90°, 180°, 270°, en una vista superior del tubo; se dejaron 10 cm de espacio libre para continuar a partir de los 80 cm con el mismo procedimiento de perforado hasta los 110 cm; se dejaron nuevamente otros 10 cm de espacio para finalmente empezar a perforar a los 130 cm y finalizar a los 160 cm. En consecuencia, el tubo vertical contenía tres niveles establecidos previamente,

nivel alto (130 cm a 160 cm), nivel medio (80 cm a 110 cm), nivel bajo (30 cm a 60 cm), con cuatro plantas por nivel y 12 por tubo (Figura 1).

El número de tubos establecidos fueron en total 27, correspondiendo 9 para cada tipo de sustrato, de los cuales se ocuparon tres tubos para cada cultivar. Estos se colocaron en tres filas paralelas en el invernadero, con 9 tubos por fila, con una distancia entre filas de 1 m y 40 cm entre tubos, lo que dio una superficie de 11.5 m² con una densidad de plantación de 28.2 plantas·m⁻².

El trasplante a los tubos se realizó del 9 al 13 de octubre del 2013, teniendo 18 días después del trasplante en las bolsas negras de 1 L; el riego se hizo con agua del grifo hasta que el sistema de riego automático fue instalado (el 31 de octubre), fecha en la cual comenzó el riego con solución nutritiva.

El sistema de riego fue localizado, la línea principal de riego pasó por la parte superior de los tubos verticales, se instaló una estaca por planta con un volumen de riego diferente en relación a su nivel de ubicación, el cual fue inherente al sistema de riego y por su ubicación en la parte superior del cultivo vertical, 75 mL·min⁻¹ en promedio para el nivel alto 130 cm a 160 cm, 74 mL·min⁻¹ en promedio en el nivel medio y 100 mL·min⁻¹ en promedio para el nivel bajo, con una duración de 1 min en cada riego y una frecuencia de cuatro riegos al día. Los cuales se realizaron a las 07:00, 10:00, 13:00 y 16:00 h, con un volumen de riego total al día por nivel de 75 mL, 87 mL y 115 mL. El riego fue controlado mediante un temporizador de la marca Orión ®. Se utilizó la solución nutritiva universal de Steiner (1984), el pH se ajustó a 5.5 con H₂SO₄.

Durante la fase experimental se verificó el pH y CE de la solución nutritiva en el tanque de almacenamiento dos veces por semana con un medidor portátil (Hanna Instruments® HI 98130). La preparación de la solución nutritiva se llevó a cabo con los fertilizantes y las concentraciones específicas mostradas en el Cuadro 1.

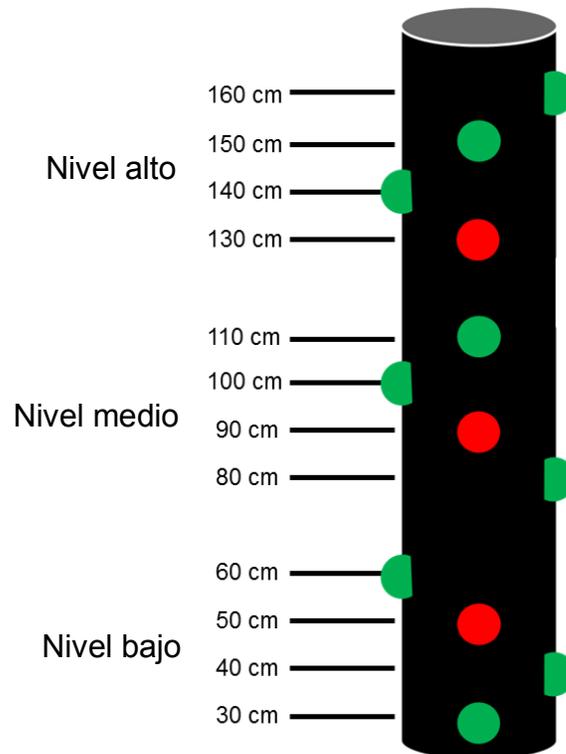


Figura 1. Posición y distribución de las plantas de fresa en los tres niveles en los tubos de plástico negro verticales.

● Plantas vistas posterior al plano. ● Plantas vistas anterior al plano.

A partir del mes de diciembre y hasta la finalización del ciclo de cultivo, se aplicó Abamectina $1.5 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$, mediante una aspersion foliar por el envés de la

hoja cada 15 días, con un total de cuatro aplicaciones, para el control de ácaros que se presentaron durante este periodo de cultivo.

Las plantas se mantuvieron bajo un régimen de eliminación de flores hasta el día 14 de marzo del 2014, con el fin de asegurar un desarrollo vegetativo más vigoroso para el periodo de fructificación.

Cuadro 1. Concentración y fertilizantes utilizados para la preparación de la solución de Steiner, aplicada en cultivo vertical de fresa.

Elementos (mg L ⁻¹)												
pH	C.E. (ds m ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
5.5	1.8	168	31	215	130	31	56	3	0.5	0.1	0.1	0.1

Orden de ajuste de los elementos	Aniones mMol L ⁻¹				Cationes mMol L ⁻¹				pH	CE dS m ⁻¹		
	8	1	5	2	7	6	3	4				
	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺		
Agua de riego	-----	-----	1.02	2.00	0.50	-----	0.20	0.69	0.61	1.58	7.10	0.42
Solución ideal	11.50	1.00	1.75	0.00	-----	-----	5.50	3.25	1.27	-----		
Aportes previstos	11.50	1.00	0.73	-2.00	-----	0.51	5.30	2.56	0.66	-----		

Fertilizantes	mMol L ⁻¹	Gramos teóricos	Gramos experimentales	Gramos 250 L
KNO ₃	3.84	3.84		99.00
5[Ca(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O]NH ₄ NO ₃	0.51	5.36		140.50
[Mg(H ₂ O) ₆](NO ₃) ₂	0.66	1.32		43.00
HNO ₃	1.21	1.21		34.50
H ₃ PO ₄	1.00		1.00	28.75
K ₂ SO ₄	0.73		0.73	32.25
Aportes reales		11.73	1.00	0.73
Solución nutritiva final mMol L ⁻¹		11.73	1.00	1.75
Solución nutritiva final meq L ⁻¹		11.73	1.00	3.50
Aniones	16.73			
Cationes	16.63			
ppm	1478			
CE (dS m ⁻¹) prevista	1.67			

4.3 Diseño experimental

El diseño experimental fue factorial 3x3x3 en bloques al azar, tomando como primer factor los sustratos tezontle 100% (Tez 100), tezontle 3:1 turba (Tez 75) y tezontle 1:1 turba (Tez 50); el segundo factor fue el nivel de las plantas en los tubos, nivel alto (130 – 160 cm), nivel medio (80 – 110 cm) y nivel bajo (30 – 60 cm), el tercer factor fue el cultivar: Camino Real, Monterey y Festival; el número de tratamientos fue de 27 con 3 repeticiones cada uno. La unidad experimental consistió en 4 plantas por nivel con 3 repeticiones.

El invernadero se acondicionó el día 14 de marzo con dos ventiladores colocados sobre las ventanas verticales del invernadero con acceso al exterior para disminuir la temperatura, durante el periodo de cosecha. La duración del experimento abarcó del 1 de noviembre del 2013 al 21 de mayo del 2014, con seis fechas de corte entre el 15 de abril y 21 de mayo.

4.4 Temperatura y Humedad relativa

Se realizó la medición de la temperatura y humedad relativa cada dos horas durante todo el ciclo del cultivo (de noviembre de 2013 a mayo de 2014), con dos datalogger RHT10 Extech Instruments®. Con los datos registrados se calculó la temperatura y humedad relativa mínima, máxima y promedio durante el transcurso del día y la temperatura día/noche (Cuadros 2 y 3).

Cuadro 2. Temperatura (T) y humedad relativa (HR) media, máxima y mínima registrada en los meses de duración del cultivo vertical de fresa.

Meses	T.media (°C)	T.máxima (°C)	T.mínima (°C)	HR(%) media	HR(%) máxima	HR(%) mínima
Noviembre	17.5±0.7	29.6±0.6	9.0±0.7	63.0±1.7	83.9±1.0	31.5±1.8
Diciembre	16.8±0.2	29.9±0.5	7.4±0.4	58.0±0.9	81.9±0.7	27.6±1.4
Enero	15.4±0.3	30.5±0.6	5.0±0.4	54.0±0.9	80.6±0.9	22.3±1.3
Febrero	19.7±0.2	36.9±0.2	7.4±0.3	43.8±1.1	78.1±1.6	15.0±0.9
Marzo	21.8±0.3	40.0±0.6	9.9±0.2	49.1±1.4	80.1±1.2	17.8±1.2
Abril	21.7±0.2	36.5±0.4	11.7±0.3	51.9±1.8	80.1±1.6	21.8±1.1
Mayo	21.3±0.4	33.9±0.7	13.6±0.5	61.7±2.2	85.3±0.9	29.8±2.4

T.: Temperatura, HR%: Humedad Relativa

Cuadro 3. Temperatura y humedad relativa promedio Día/Noche.

Mes	Temperatura (°C) promedio		Humedad relativa (%) promedio	
	Día	Noche	Día	Noche
Noviembre	23.4±0.5	11.2±0.3	47.8±1.3	78.7±0.5
Diciembre	23.4±0.3	10.2±0.1	42.0±0.8	74.1±0.3
Enero	22.6±0.3	8.3±0.2	37.4±0.8	70.4±0.4
Febrero	28.1±0.4	11.4±0.2	27.1±0.7	60.4±0.6
Marzo	30.4±0.4	13.3±0.2	31.6±0.8	66.7±0.6
Abril	29.1±0.3	14.3±0.1	34.9±0.8	68.9±0.7
Mayo	27.5±0.4	14.0±0.2	41.3±1.1	76.0±0.8

4.5 Temperatura del sustrato

Se midió en las tres repeticiones por sustrato, cada dos días; los tubos en donde se midió esta variable fueron el tubo segundo, quinto y séptimo de cada fila de bloques en que el experimento fue ordenado, este registro se hizo por nivel del tubo (alto, medio y bajo) y en cuatro horas del día: 7:00, 10:00, 13:00 y 16:00 horas. La medición se hizo con un termómetro con vástago modelo 39240

de Extech Instruments®, introduciendo 8 cm de la sonda dentro del sustrato, hasta obtener una temperatura estable, la cual era registrada.

4.6 Características físicas y químicas de los sustratos

4.6.1 Características físicas de sustratos

Se realizó la caracterización de los sustratos antes del trasplante de las plantas (inicial) y al final del ciclo del experimento, en este caso particular, se hizo por nivel del tubo. Para cada caso se utilizaron tres repeticiones por tratamiento. Se evaluaron la densidad aparente (DAP), espacio poroso total (EPT), capacidad de aireación (CA), capacidad de retención de humedad (CRH), agua fácilmente disponible (AFD), agua de reserva (AR), agua difícilmente disponible (ADD), agua total disponible (ATD), pH y conductividad eléctrica (CE).

Las características físicas de los sustratos se calcularon utilizando los datos tomados después de someterlos a diferentes tensiones de columna de agua; es decir, se hicieron a la par con la obtención de las curvas de liberación de humedad.

4.6.1.1 Curvas de liberación de humedad

La caracterización de los sustratos se llevó a cabo colocando muestras de los sustratos utilizados previamente llevados a punto de saturación de humedad en embudos con placas de cerámica; con el objetivo de aplicar cuatro diferentes

tensiones equivalentes en columnas de agua (cm), las cuales fueron: 0 cm (punto de saturación), 10 cm (capacidad de contenedor), 50 cm (agua fácilmente disponible) y 100 cm (agua de reserva). Estas diferentes tensiones de columna de agua son el intervalo de condiciones de humedad de un sustrato en el que normalmente se cultivan las plantas. A las 24 horas a partir del sometimiento a cada una de las tensiones de columna de agua, los sustratos se secaron en una estufa a 105 °C durante un periodo de 48 horas, para obtener el peso seco de los mismos.

Los cálculos utilizados para obtener las características físicas de los sustratos se obtuvieron de acuerdo con los principios propuestos por De Boodt *et al.* (1974).

4.6.1.2 Densidad aparente

La densidad aparente se obtuvo de los embudos utilizados en las curvas de liberación de humedad; para lo cual se dividió el peso del sustrato seco entre el volumen y la ecuación es:

$$Dap (gcm^{-3}) = \frac{P}{V}$$

Dónde:

Dap: Densidad aparente.

P: Peso del sustrato seco.

V: Volumen aparente del embudo.

4.6.1.3 Espacio poroso total.

Para la cuantificación de la porosidad con base en peso y volumen, se emplearon los datos obtenidos en los embudos utilizados para las curvas de liberación de humedad y simplemente se dividió el volumen del agua a punto de saturación, entre el volumen del embudo y se multiplicó por 100. A continuación se muestra la ecuación mediante la cual se hizo el cálculo:

$$EPT\% = \frac{VAS}{VE} 100$$

Dónde:

EPT%: Espacio poroso total en porcentaje.

VAS: Volumen de agua a saturación.

VE: Volumen del embudo

4.6.1.4 Capacidad de retención de humedad

Para el cálculo de esta propiedad pueden ocuparse las siguientes ecuaciones:

$$CRH\% = EPT\% - CA\%$$

$$CRH\% = \frac{VA10cm}{V} 100$$

$$CRH\% = \frac{P3 - P1}{V} 100$$

$$CRH\% = \frac{V1 - V2}{V} 100$$

Dónde

CRH%: Capacidad de retención de humedad.

EPT%: Espacio poroso total.

CA%: Capacidad de aireación.

VA (10 cm): Volumen de agua a 10 cm.

V: Volumen del embudo.

P1: Peso del sustrato seco.

P3: Peso del sustrato después del drenaje.

V1: Volumen de saturación.

V2: Volumen drenado.

4.6.1.5 Capacidad de aireación

Una vez que se tienen los datos de espacio poroso total y capacidad de retención de humedad, el cálculo de la capacidad de aireación se realizó con la fórmula siguiente:

$$CA\% = EPT\% - CRH\%$$

Dónde:

CA%: Capacidad de aireación.

EPT%: Espacio poroso total o porosidad total.

CRH%: Capacidad de retención de humedad.

4.6.1.6 Agua fácilmente disponible (%)

Esta característica se evaluó mediante la ecuación:

$$AFD\% = \frac{VA10cm - VA50cm}{V} 100$$

Dónde:

AFD: agua fácilmente disponible.

VA10cm: volumen de agua a 10 cm.

VA50cm: volumen de agua a 50 cm.

V: volumen del embudo.

4.6.1.7 Agua de reserva

Se calculó con la ecuación siguiente:

$$ADR\% = \frac{VA50cm - VA100cm}{V} 100$$

Dónde:

ADR: agua de reserva.

VA50cm: Volumen de agua a 50 cm.

VA100 cm: Volumen a 100 cm.

V: Volumen del embudo.

4.6.1.8 Agua difícilmente disponible

$$ADF\% = \frac{VA100cm}{V} 100$$

Dónde:

ADF: Agua difícilmente disponible.

VA100cm: Volumen de agua a 100 cm.

V: Volumen del embudo.

4.6.1.9 Agua total disponible

Para el cálculo de esta variable se utilizó la ecuación siguiente:

$$ATD\% = AFD\% + ADR\%$$

Dónde:

ATD%: Agua total disponible

AFD%: Agua fácilmente disponible.

ADR%: Agua de reserva.

4.6.2 Características químicas de los sustratos

Para la determinación del pH y la conductividad eléctrica (CE) de los sustratos al inicio y al final del ciclo de cultivo se realizó el siguiente proceso. El sustrato se puso a punto de saturación durante 24 horas, después se decantó una cantidad apreciable del agua de saturación, las evaluaciones se hicieron con un potenciómetro portátil HI 9146 Hanna Instruments ®.

4.7 Intensidad luminosa

La intensidad luminosa se determinó con un medidor de intensidad luminosa Electronics Texas® (en pies candela), por encima del dosel de las cuatro plantas de cada uno de los tres niveles ubicados en el tubo vertical. El muestreo se realizó en los tubos segundo, quinto y séptimo de cada una de las tres filas de bloques en que el experimento fue ordenado, haciendo la medición cada tercer día a cuatro diferentes horas (07:00, 10:00, 13:00 y 16:00 hrs), los datos obtenidos fueron convertidos a $\text{watts}\cdot\text{m}^{-2}$, utilizando el factor de conversión de 0.102 (Runkle, E, 2006).

4.8 Temperatura de hoja

La temperatura de la hoja se midió con un termómetro infrarrojo 42500 Mini IR Extech Instruments ®, sobre una hoja madura del dosel de las mismas plantas donde se midió la intensidad luminosa y la temperatura de sustrato y a las mismas horas (07:00, 10:00m 13:00 y 16:00).

4.9 Concentración de CO₂ ambiental

El CO₂ ambiental se determinó utilizando un medidor de CO₂ modelo CO250 Extech Instruments ®, con precisión de ± 50 ppm, realizando la medición por arriba del dosel de las plantas utilizadas en la temperatura de sustrato, intensidad luminosa y temperatura de hoja y también a las mismas horas (07:00, 10:00, 13:00 y 16:00)

4.10 Oxígeno disuelto y temperatura de la solución nutritiva

La concentración de oxígeno disuelto en la solución nutritiva y la temperatura de ésta dentro del tinaco de almacenamiento, se midió utilizando un oxímetro portátil con compensación de temperatura, salinidad y altitud HI9146 Hanna Instruments ®, realizando las mediciones los mismos días en que se realizaban las mediciones de temperatura de sustrato, intensidad luminosa, temperatura de hoja y concentración de CO₂ ambiental y a las cuatro diferentes horas (07:00, 10:00, 13:00 y 16:00).

4.11 Variables de planta

Al finalizar el ciclo de cultivo, se extrajeron las plantas completas (con todo y raíz) de todos los tubos verticales; sin embargo, solo se evaluaron las variables en una muestra de cuatro plantas de cada nivel del tubo, por tratamiento.

4.11.1 Longitud de peciolo

Se midió con una regla graduada en centímetros a todos los peciolos de las hojas de las cuatro plantas por nivel del tubo por tratamiento.

4.11.2 Diámetro de peciolo

Se midió en los mismos peciolos mencionados en la variable anterior, con un vernier digital Truper® y en la parte media del órgano.

4.11.3 Peso seco de planta, de la parte aérea y de la raíz

Para esto la planta se dividió en dos, parte aérea (corona, peciolos, folíolos) y la raíz, ambas partes se lavaron tres veces, el primer lavado fue con agua corriente y los otros dos con agua destilada. Se introdujeron a un horno con aire circulante a temperatura de 65 °C por 48 horas o hasta obtener peso constante. Una vez secas las muestras, se pesaron en una balanza digital Ohaus®. Esto se hizo en todas las plantas de cada tratamiento (12 plantas por tratamiento y por nivel del tubo).

4.11.4 Relación parte aérea/ raíz

Esta relación se determinó dividiendo el peso seco aéreo por planta entre peso seco raíz por planta.

4.11.5 Área foliar

El área foliar se registró en todas las hojas (sin pecíolos) del total de plantas de cada tratamiento, con un integrador de área foliar LICOR-3100, para después obtener un promedio del área foliar por planta.

4.12 Análisis nutrimental

Se realizó en la parte aérea de las plantas (hojas con pecíolos y corona), para lo cual se hizo una muestra compuesta, formada por las cuatro plantas por tratamiento y por nivel del tubo. De aquí se hizo la determinación nutrimental por triplicado. Se determinó la concentración de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na).

La parte aérea seca, obtenida después de haber pasado por el proceso de secado en horno, fue molida en un molino de acero inoxidable marca Arthur H. Thomas, con malla del número 20. Los nutrimentos se determinaron pesando 0.5 g de muestra seca molida, se hizo una digestión húmeda con 4 mL de una mezcla di-ácida de ácido sulfúrico - ácido perclórico en proporción 2:1(v/v), más 2mL de peróxido de hidrógeno al 30 %. Hecho esto, las muestras se colocaron en una plancha de digestión a una temperatura de 350 °C; el aforo fue a 50 mL

con agua desionizada. La determinación de N se realizó por el método de microkjeldahl, la de los demás elementos se hizo con un espectrofotómetro de emisión atómica de plasma por inducción acoplada ICP modelo 725-ES de VARIAN® (Australia) (Alcántar y Sandoval, 1999).

4.13 Variables del fruto

Se realizó un muestreo de cuatro frutos por planta de cada tratamiento y nivel del tubo en estado de madurez de consumo. Se determinaron el pH, acidez titulable, firmeza y sólidos solubles totales (°Brix), y se calculó la relación sólidos solubles totales/acidez titulable.

4.13.1 pH del fruto

La acidez del fruto se evaluó con un potenciómetro de la marca Conductronic® pH120, previo al análisis de la acidez titulable (%), justo después de cortar, mezclar físicamente y de forma homogénea los 4 frutos de cada repetición, se tomaron de esta mezcla 10 g de muestra para ser molidos junto con 10 mL de agua destilada en la que se midió el pH.

4.13.2. Acidez titulable

Para la acidez titulable se usaron los mismos frutos utilizados para la variable anterior. Para la determinación se procedió conforme a la técnica descrita

por la AOAC (1990), y se expresó en relación al ácido cítrico, que es el que se encuentra en mayor proporción en estos frutos.

4.13.3. Sólidos solubles totales

Se registraron con un refractómetro digital ATAGO modelo PAL-451, este análisis se registró utilizando una gota de jugo interno de cada uno de cuatro frutos por repetición (es decir, por tubo).

4.13.4. Relación Sólidos Solubles Totales/Acidez Titulable

La relación se calculó dividiendo los sólidos solubles totales (°Brix) entre el porcentaje de acidez titulable.

4.13.5. Firmeza

Se realizó con un penetrómetro de la marca QaSUPPLIES modelo FT O2, con un puntal de 1.9 mm, el que se colocó directamente sobre la superficie del fruto, (en estado de madurez de consumo), esto se hizo en los mismos frutos en los que se evaluó la acidez titulable y los sólidos solubles totales.

4.14 Peso por fruto total

La totalidad de los frutos obtenidos de cada repetición por tratamiento, antes de realizar cualquier otro análisis, se cosecharon en el punto de madurez de

consumo según la NOM-FF-062-SCFI-2002 y se pesaron individualmente en una báscula digital de la marca Ohaus®.

4.15 Rendimiento por corte, Número de frutos por corte, Rendimiento total y Número de frutos total

Se hicieron tres cortes de fruto en el mes de abril (15, 21 y 25) y tres en el mes de mayo (2, 8, 21). Se obtuvo peso del total de frutos cosechados durante cada periodo de cosecha.

4.16 Análisis de datos

Para el análisis estadístico se utilizó el paquete Statistical Analysis System Versión 9.0 (SAS Institute, 1998), se realizó análisis de varianza, prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$), correlación de Pearson y regresión lineal múltiple.

5.- RESULTADOS

5.1 Comportamiento de la temperatura a través de los meses de evaluación

5.1.1 Temperatura del sustrato

En relación a los sustratos, el que presentó la mayor temperatura por mes fue el Tez 100, con diferencia estadística con respecto a los otros dos sustratos, con una diferencia máxima de 1 °C entre ellos. La temperatura de los sustratos en general, presentaron un aumento gradual a partir del mes de noviembre hasta abril; en donde de marzo a abril se presentó el pico máximo de temperatura, con disminución del mes de mayo de aproximadamente 2.0 °C (Figura 2).

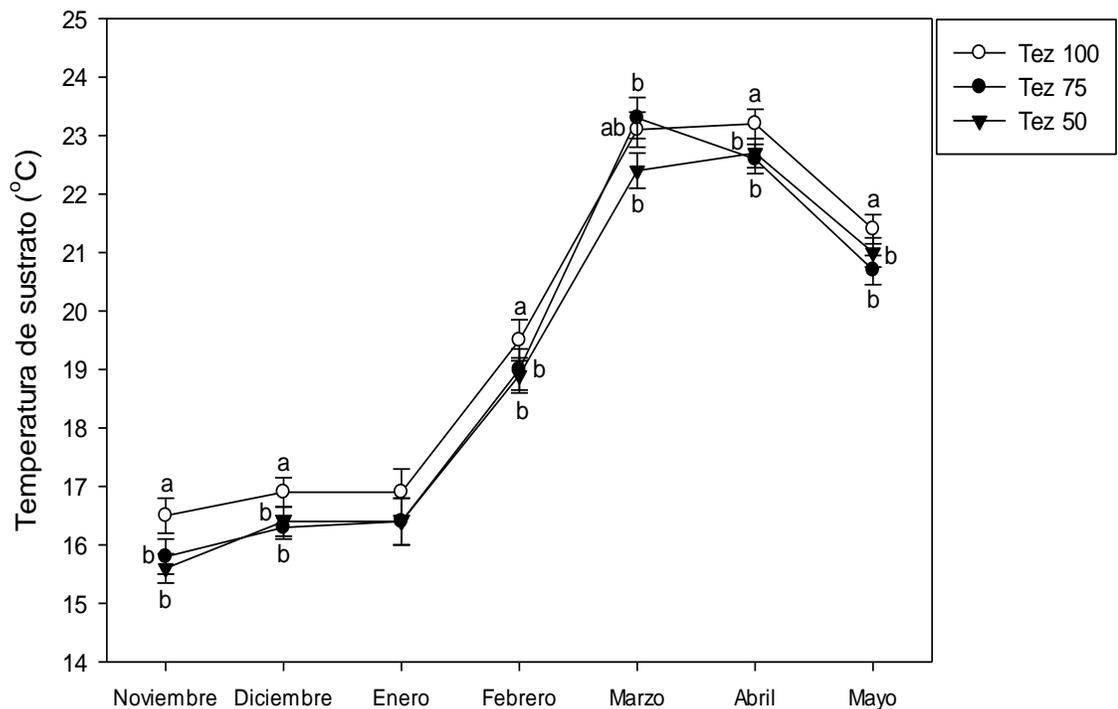


Figura 2. Comportamiento de la temperatura de los sustratos utilizados en cultivo hidropónico vertical de fresa.

Tez 100: tezontle 100 %, Tez 75: tezontle 3:1 turba y Tez 50: tezontle 1:1 turba. Cada valor es el promedio de los tres niveles del tubo y cuatro horas del día).

En relación al nivel del tubo se observó que el nivel alto presentó la más alta temperatura en todos los meses de evaluación, con excepción del mes de enero en el cual la temperatura de los tres niveles fue similar. El mes en el que la temperatura del sustrato fue más alta fue el de abril y esta se presentó en el nivel más alto dentro del tubo. En el mes de mayo, la temperatura de los tres niveles del tubo descendió aproximadamente 2 °C (Figura 3).

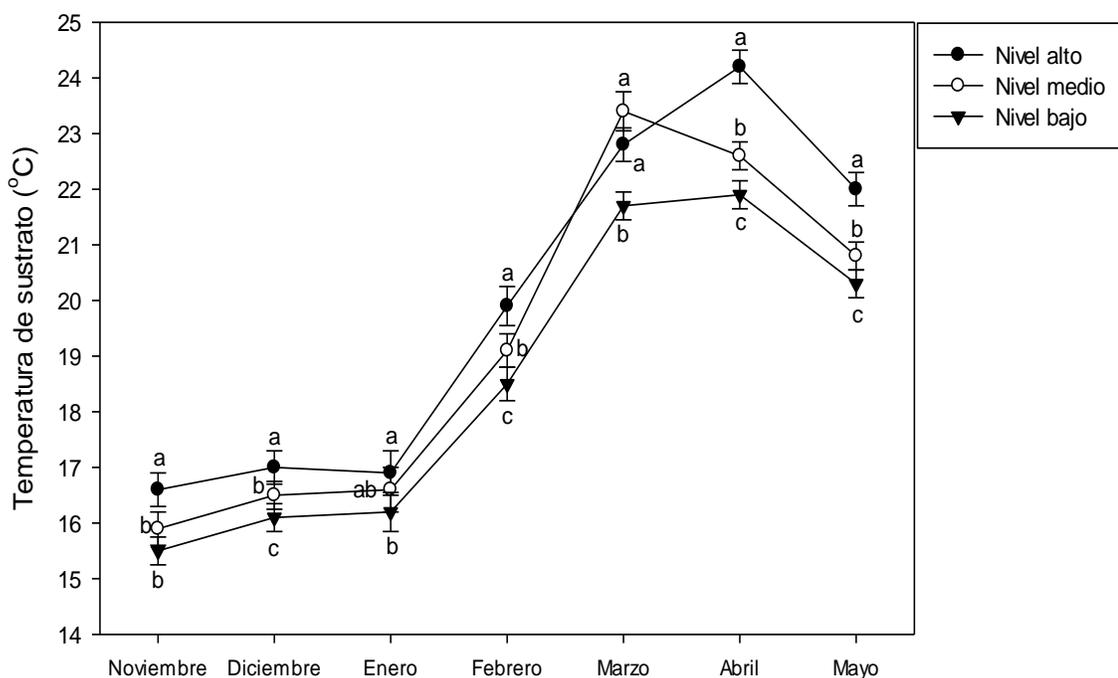


Figura 3. Comportamiento de la temperatura de los sustratos utilizados en los diferentes niveles del tubo en el cultivo hidropónico vertical de fresa.

Nivel alto: 160 – 130 cm, Nivel medio: 110 – 80 cm, Nivel bajo: 60 – 30 cm. Cada valor es el promedio de los tres sustratos y cuatro horas del día).

La temperatura mínima siempre se registró a las 07:00 h y la máxima a las 16:00 h. La diferencia encontrada entre las cuatro diferentes horas fue de 5.0 °C aproximadamente, para todos los meses que duró el ciclo de cultivo (Figura 4).

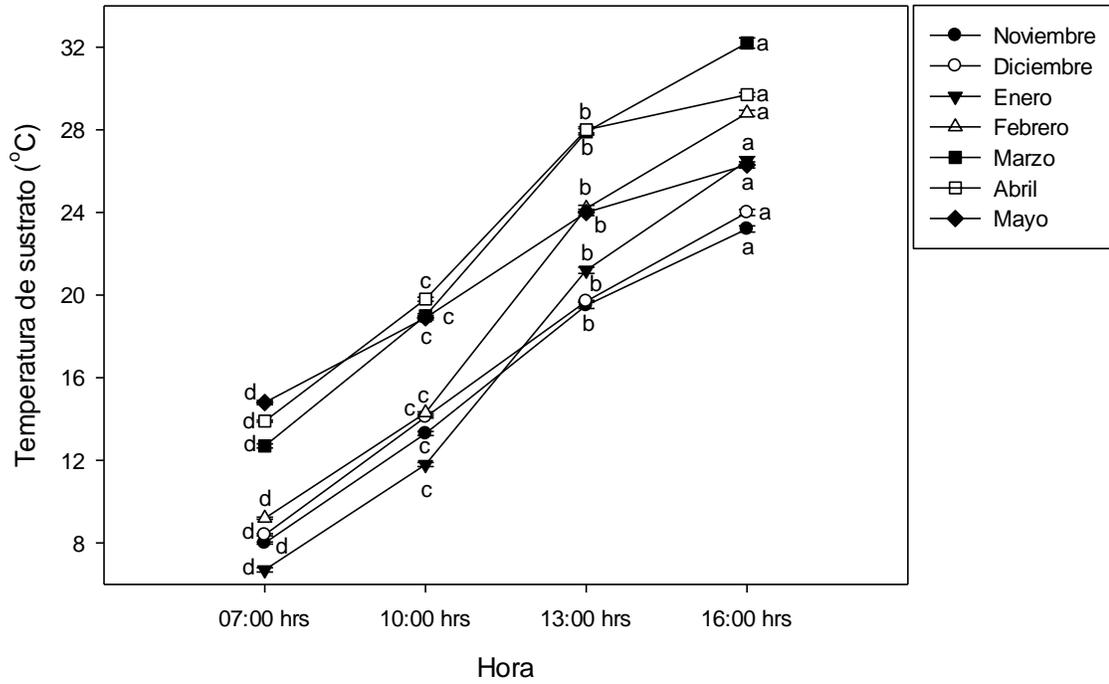


Figura 4. Comportamiento de la temperatura de los sustratos utilizados en el cultivo hidropónico vertical de fresa en cuatro horas del día.
Cada valor es el promedio de los tres sustratos y tres niveles del tubo).

Temperatura del sustrato por nivel del tubo y hora del día

El sustrato Tez 100 presentó la mayor temperatura, con diferencia estadística con los otros dos sustratos, los cuales fueron estadísticamente iguales entre sí (Figura 5).

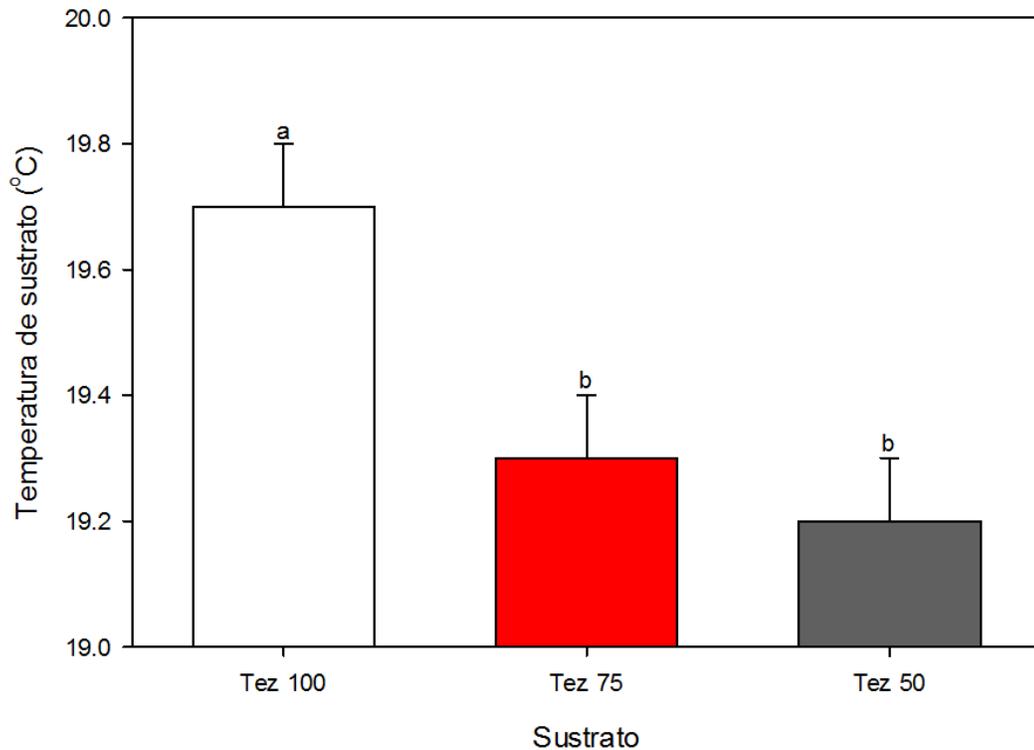


Figura 5. Temperatura en los diferentes sustratos utilizados en el cultivo

hidropónico vertical de fresa.

Tez 100: tezontle 100 %, Tez 75: tezontle 3:1 turba y Tez 50: tezontle 1:1 turba. Cada valor es el promedio de tres niveles del tubo y cuatro horas del día de los siete meses de evaluación).

En cuanto al nivel del tubo se observó una mayor temperatura a mayor altura, los tres niveles presentaron temperaturas estadísticamente diferentes con una diferencia de 0.7 °C entre niveles y 1.4 °C entre el valor máximo y mínimo (Figura 6).

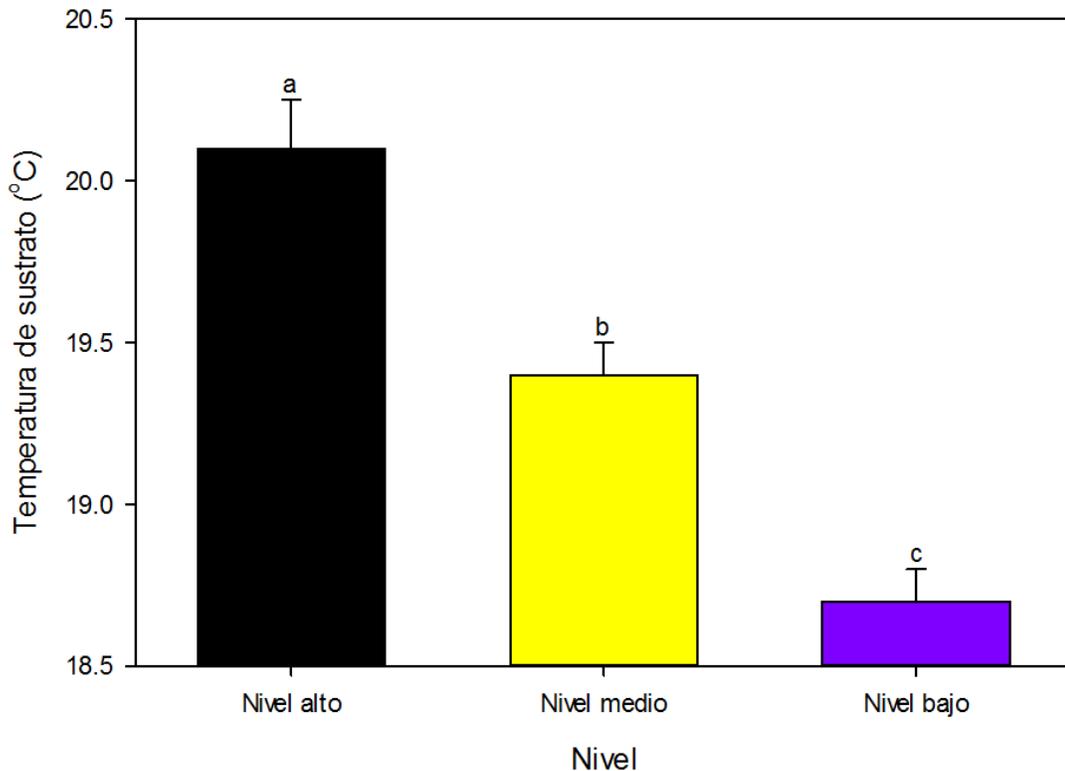


Figura 6. Temperatura de sustrato en los diferentes niveles del tubo evaluados en el cultivo hidropónico vertical de fresa.

Nivel alto: 160 – 130 cm, Nivel medio: 110 – 80 cm, Nivel bajo: 60 – 30 cm. Cada valor es el promedio de los tres sustratos y cuatro horas del día de los siete meses de evaluación.

En cuanto a la hora del día existió una tendencia clara ya que a las 07:00 h fue en donde se registró la temperatura más baja y a las 16:00 h la mayor; estadísticamente la temperatura de cada hora fue distinta (Figura 7).

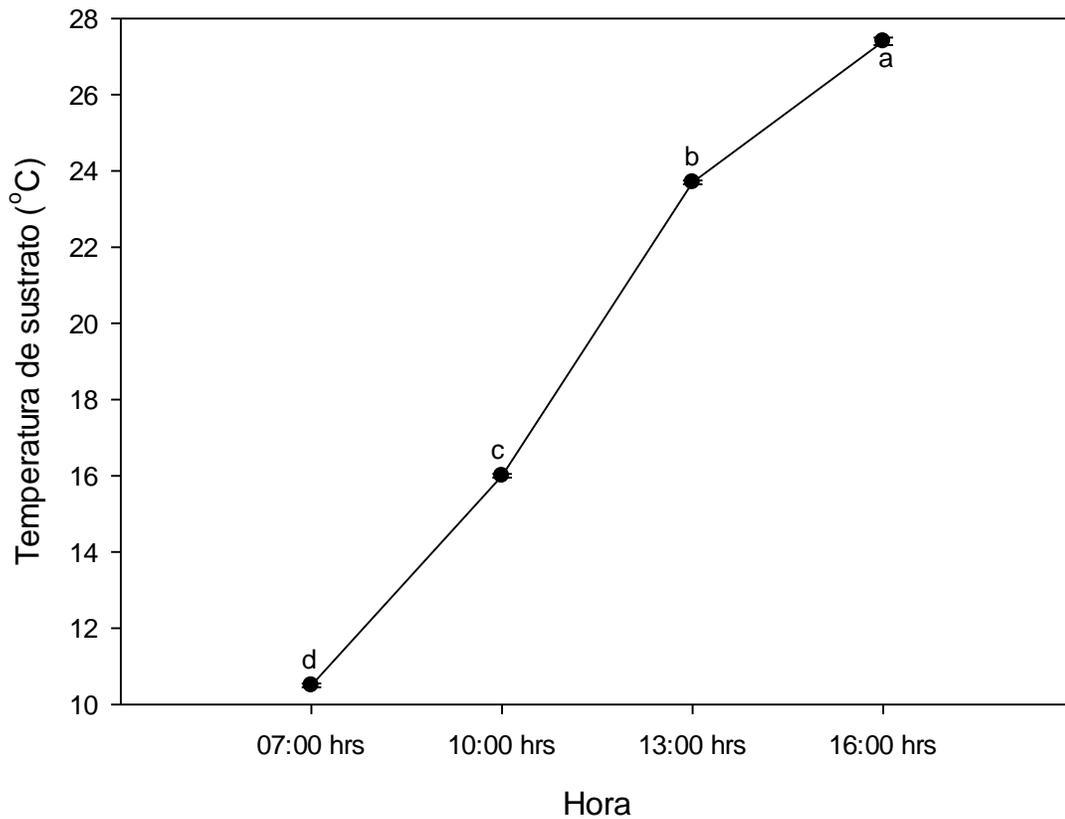


Figura 7. Temperatura de sustrato en las diferentes horas del día en el cultivo hidropónico vertical de fresa.

Cada valor es el promedio de tres sustratos y tres niveles del tubo de los siete meses de evaluación.

Temperatura del sustrato por las diferentes horas del día.

La mayor temperatura de sustrato, a las 07:00 horas se registró en Tez 50 seguido por Tez 75 y Tez 100 siendo todos estadísticamente diferentes y teniendo una diferencia de temperaturas entre la temperatura máxima y mínima de 0.4 °C; para el caso de las 10:00 horas, se realizó el mismo análisis y se obtuvo una mayor temperatura en Tez 100, seguido por Tez 50 y Tez 75 bajo con una diferencia de temperatura de 0.7 °C, en la siguiente hora 13:00, se encontró la mayor temperatura registrada en Tez 100, seguido de Tez 75 y Tez 50 con una diferencia de 1.3 °C entre la temperatura máxima y mínima. Finalmente, a las 16:00 horas Tez 100 y Tez 75 fueron estadísticamente iguales seguido de Tez 50 habiendo una diferencia de 1.1 °C entre el valor máximo y mínimo.

Las mayores temperaturas registradas aumentaron respecto a la hora del día, siendo menores a una hora más temprano y más altas a horas más tardes (Figura 8).

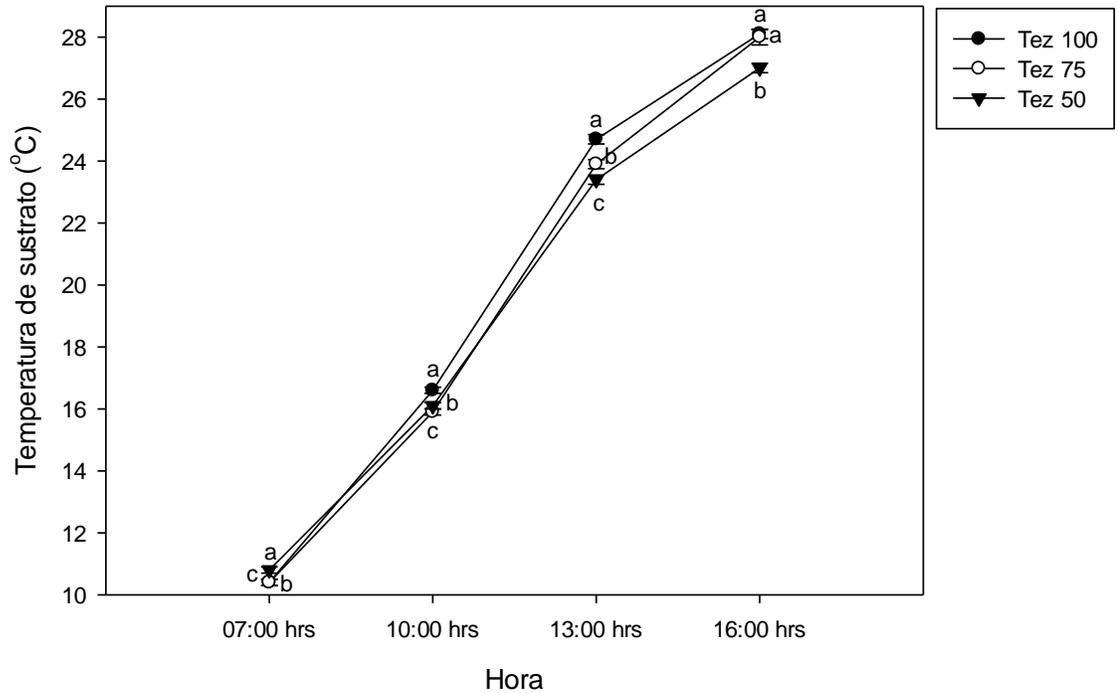


Figura 8. Temperatura del sustrato en cuatro horas del día en el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

Tez 100: tezontle 100 %, Tez 75: tezontle 3:1 turba y Tez 50: tezontle 1:1 turba. Cada valor es el promedio de los siete meses de evaluación.

Temperatura del sustrato por nivel del tubo en las diferentes horas del día

La temperatura de sustrato, se encontró que a las 07:00 horas la mayor temperatura se registró en el nivel bajo seguido del nivel medio y alto siendo todos estadísticamente diferentes y teniendo una diferencia de temperaturas entre la temperatura máxima y mínima de 0.5 °C; para el caso de las 10:00 horas, se realizó el mismo análisis y se obtuvo una mayor temperatura en el nivel alto, seguido del nivel medio y bajo con una diferencia de temperatura de 1.2 °C. A las 13:00 horas, se encontró la misma tendencia que en la hora anterior y con una diferencia de 2.8 °C; finalmente a las 16:00 horas se

encontró la misma tendencia en el registro de la temperatura máxima que en la hora anterior y con una diferencia de temperatura de 2.4 °C.

Las mayores temperaturas registradas aumentaron respecto a la hora del día, siendo menores a una hora más temprano y más altas a horas más tardes (Figura 9).

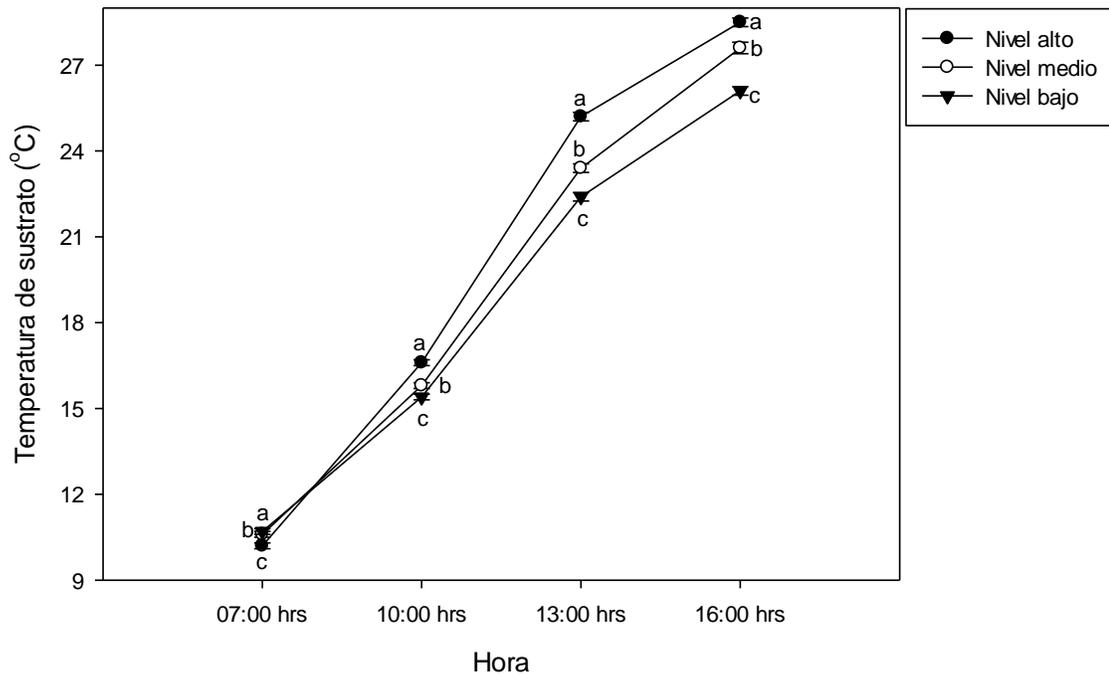


Figura 9. Temperatura de sustrato en cuatro diferentes horas del día por nivel del tubo en el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

Nivel alto: 160 – 130 cm, Nivel medio: 110 – 80 cm, Nivel bajo: 60 – 30 cm. Cada valor es el promedio de los siete meses de evaluación.

5.1.2 Intensidad luminosa

En relación a la interacción nivel del tubo y hora del día, se observó que a partir de las 7:00 de la mañana en los tres niveles del tubo se fue incrementando la intensidad luminosa sobre las hojas, hasta las 13:00 h en donde se alcanzó el mayor valor; a partir de esta hora la intensidad disminuyó. Las plantas del nivel alto del tubo fueron las que estuvieron bajo la mayor intensidad luminosa con tendencia a disminuir hacia las partes bajas del tubo (Figura 10).

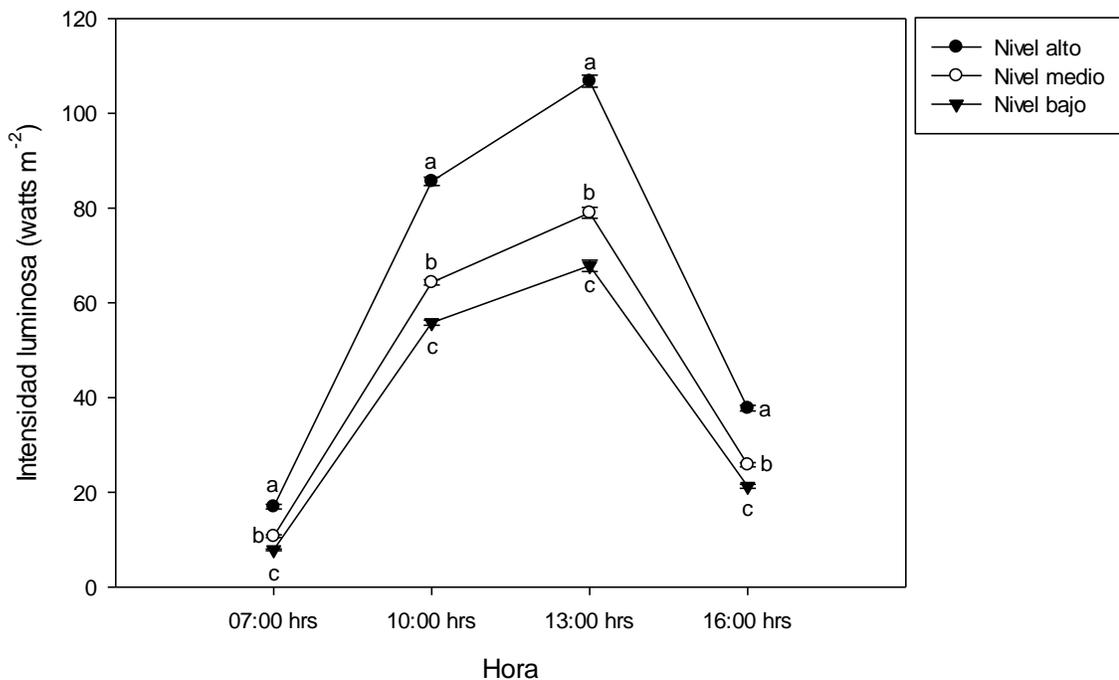


Figura 10. Variación de la intensidad luminosa en diferentes horas del día por nivel del tubo en el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

Nivel alto: 160 – 130 cm, Nivel medio: 110 – 80 cm, Nivel bajo: 60 – 30 cm. Cada valor es el promedio de los siete meses de evaluación.

5.1.3 Temperatura de hoja por nivel del tubo y hora del día

A las 07:00 h la temperatura de las hojas en los tres niveles fue similar, al avanzar la hora del día la temperatura de las hojas se fue incrementado de manera diferencial en los tres niveles del tubo, de tal forma que a las 10:00 h la temperatura de las hojas alcanzó la temperatura más alta en el nivel superior seguido del nivel medio y bajo. A las 13:00 h la mayor temperatura en las hojas se mantuvo en la parte alta del tubo, con un aumento de 5 °C con respecto a la registrada a las 10:00 h, en los niveles medio y bajo el aumento en temperatura foliar fue de 4.6 °C; en esta hora del día fue donde las hojas de los tres niveles del tubo registraron la mayor temperatura. A las 16:00 h se presentó un descenso en la temperatura de 2 °C en las hojas de las plantas del nivel alto y de 1 °C en las de los dos niveles inferiores (Figura 11).

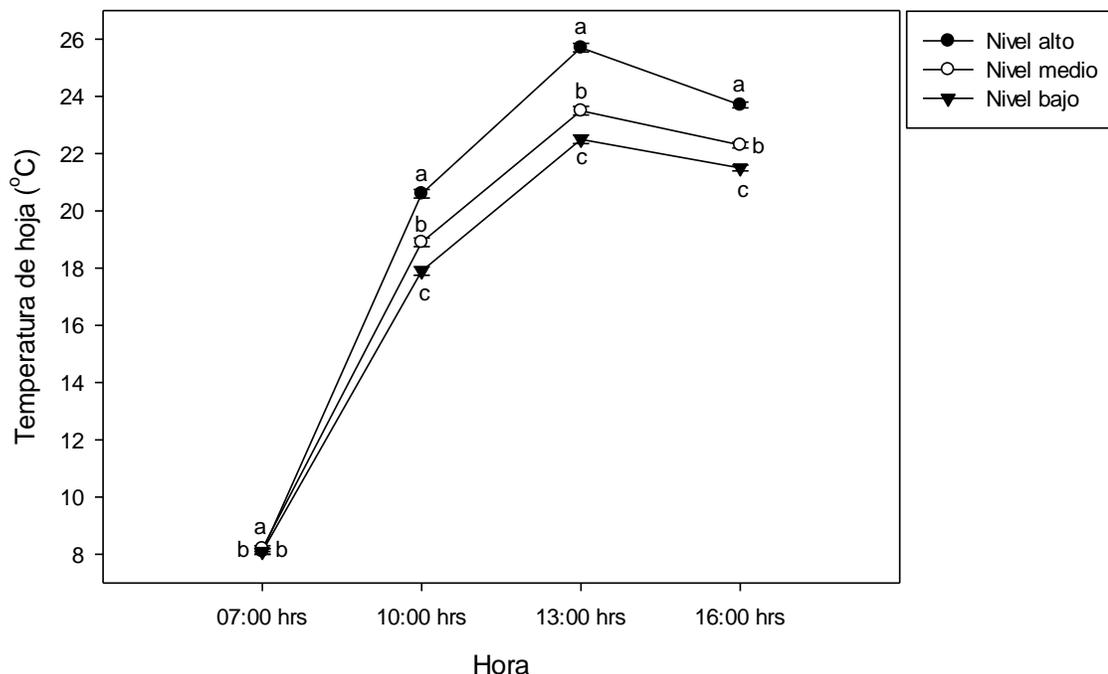


Figura 11. Variación de la temperatura de la hoja en diferentes horas del día y por nivel del tubo en el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

Nivel alto: 160 – 130 cm, Nivel medio: 110 – 80 cm, Nivel bajo: 60 – 30 cm. Cada valor es el promedio de siete meses de evaluación. 49

5.1.4 Concentración de CO₂ ambiental

Concentración de CO₂ ambiental en los diferentes niveles del tubo en las diferentes horas del día

Se observó interacción significativa entre la hora del día y nivel del tubo en la concentración de CO₂ ambiental; a las 07:00 h en el nivel bajo se presentó la mayor concentración de CO₂, seguido del nivel medio y el alto. A las 10:00 horas la mayor concentración se registró en el nivel alto, y fue disminuyendo conforme baja el nivel del tubo; a las 13:00 h la mayor concentración se registró en el nivel bajo del tubo. A las 16:00 h en el nivel alto se registró la concentración de CO₂ más alta. En general se observó que la mayor concentración de CO₂ en todos los niveles fue a las 7:00 h, con disminución hasta las 13:00 h y una ligera recuperación a partir de las 16:00 h (Cuadro 4).

Cuadro 4. Resultados de la concentración de CO₂ (ppm) ambiental en cuatro diferentes horas del día por nivel del tubo en el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

	07:00	10:00	13:00	16:00
Nivel alto	448.5±51.3 c ^z	437.3±51.3 a	421.1±50.8 b	430.0±51.9 a
Nivel medio	448.8±51.3 b	431.4±51.0 b	420.3±50.7 c	428.7±51.9 b
Nivel bajo	449.1±51.3 a	426.6±50.9 c	421.7±50.8 a	428.0±51.9 c
DMS	0.2	1.1	0.5	0.4
CV	0.09	1.80	0.34	0.23

^zValores con la misma letra dentro en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación. Cada valor es el promedio de siete meses de evaluación.

5.1.5 Oxígeno disuelto y temperatura de la solución nutritiva

La mayor concentración de oxígeno se presentó a las 07:00 h la cual comenzó a decrecer llegando a presentar la concentración más baja a las 13:00 h, posteriormente esta se incrementó para las 16:00 h (Figura 12).

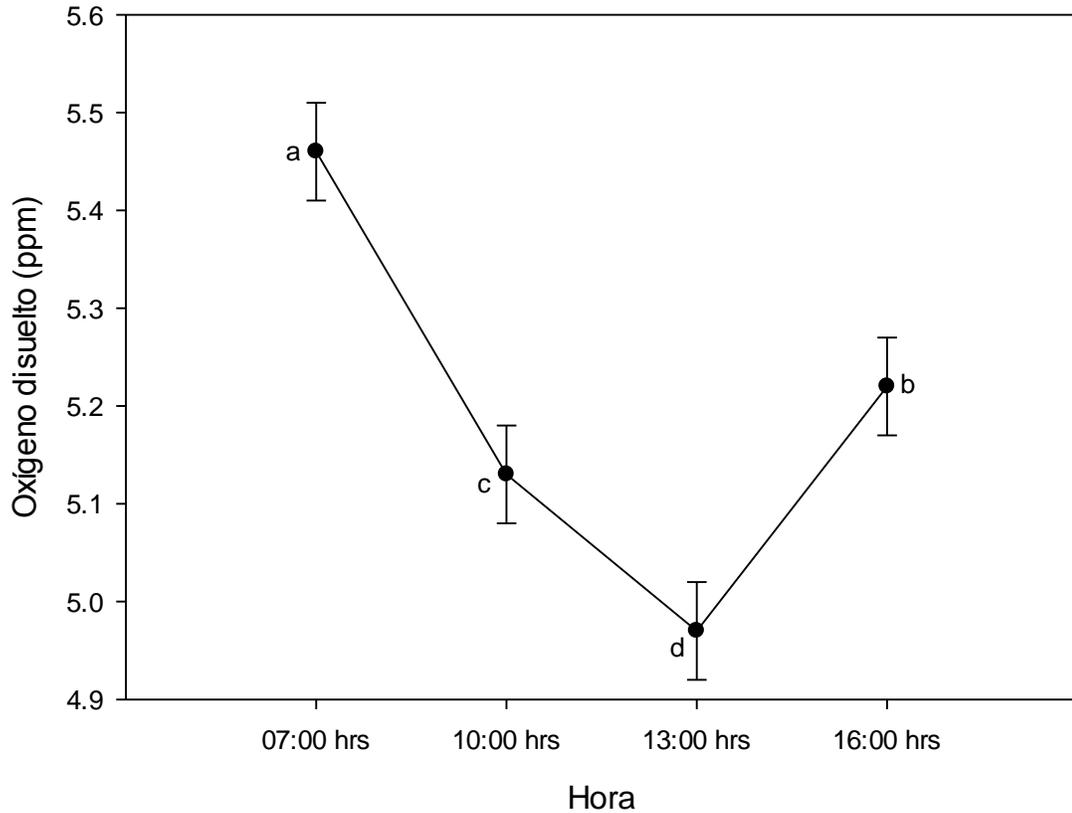


Figura 12. Concentración de oxígeno disuelto en la solución nutritiva en el tanque de almacenamiento a diferentes horas del día utilizada en el cultivo hidropónico de fresa.

Cada valor es el promedio de siete meses de evaluación.

Se observó una tendencia inversa a la de la variable anterior; la menor temperatura se registró a las 07:00 h con una tendencia a aumentar hasta las 13:00 h, en donde se registró la temperatura más elevada seguida de un ligero descenso a las 16:00 h. (Figura 13).

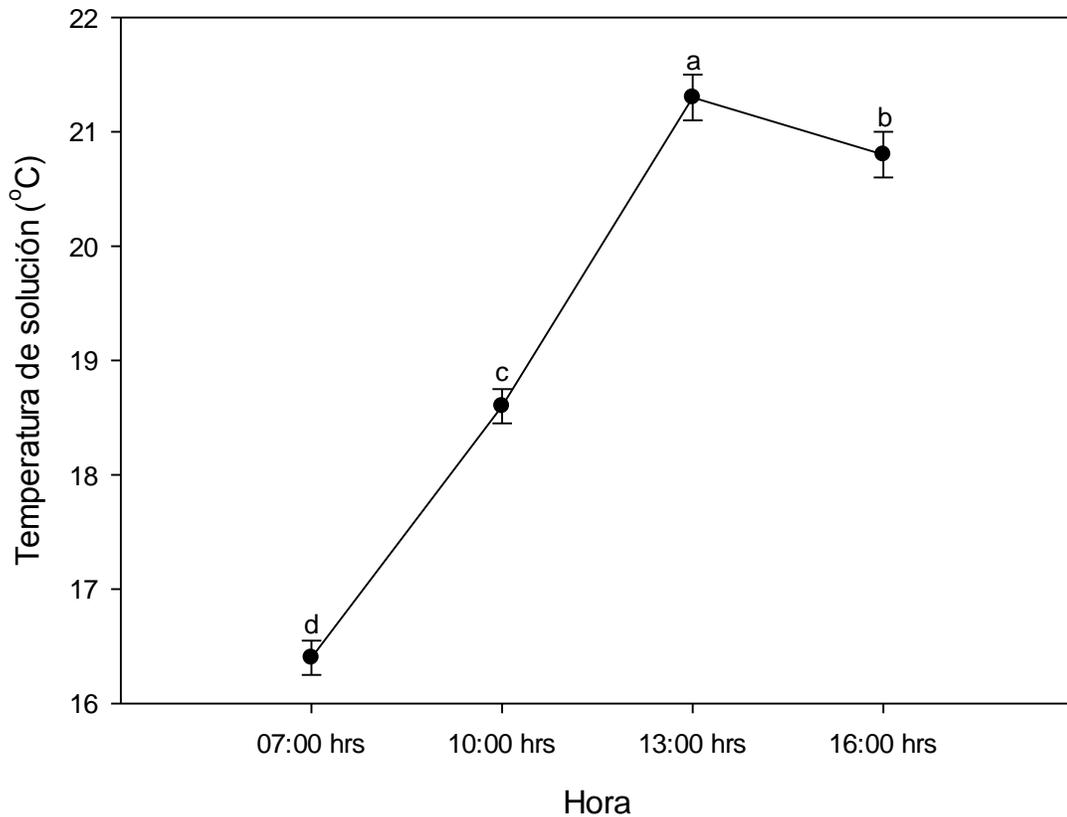


Figura 13. Temperatura de solución nutritiva en el tanque de almacenamiento en diferentes horas del día en el cultivo hidropónico de fresa.

Cada valor es el promedio de siete meses de evaluación.

5.2 Características físicas y químicas de sustratos

5.2.1 Características físicas iniciales de los sustratos

Los tres sustratos presentaron valores de densidad aparente similares, el EPT y CA fueron más altos cuando el sustrato fue Tez 100 en contraste el CRH, AFD, ADR, ADD y ATD fue menor en dicho sustrato, tendiendo a elevarse al disminuir el porcentaje de tezontle en la mezcla del sustrato (Cuadro 5).

Los sustratos Tez 75 y Tez 50 fueron estadísticamente idénticos en todas las características físicas excepto para el ATD, ADR y ADD (Cuadro 5).

En las Figuras 14 a 16 se pueden observar las curvas de liberación de humedad presentadas para los tres sustratos utilizados.

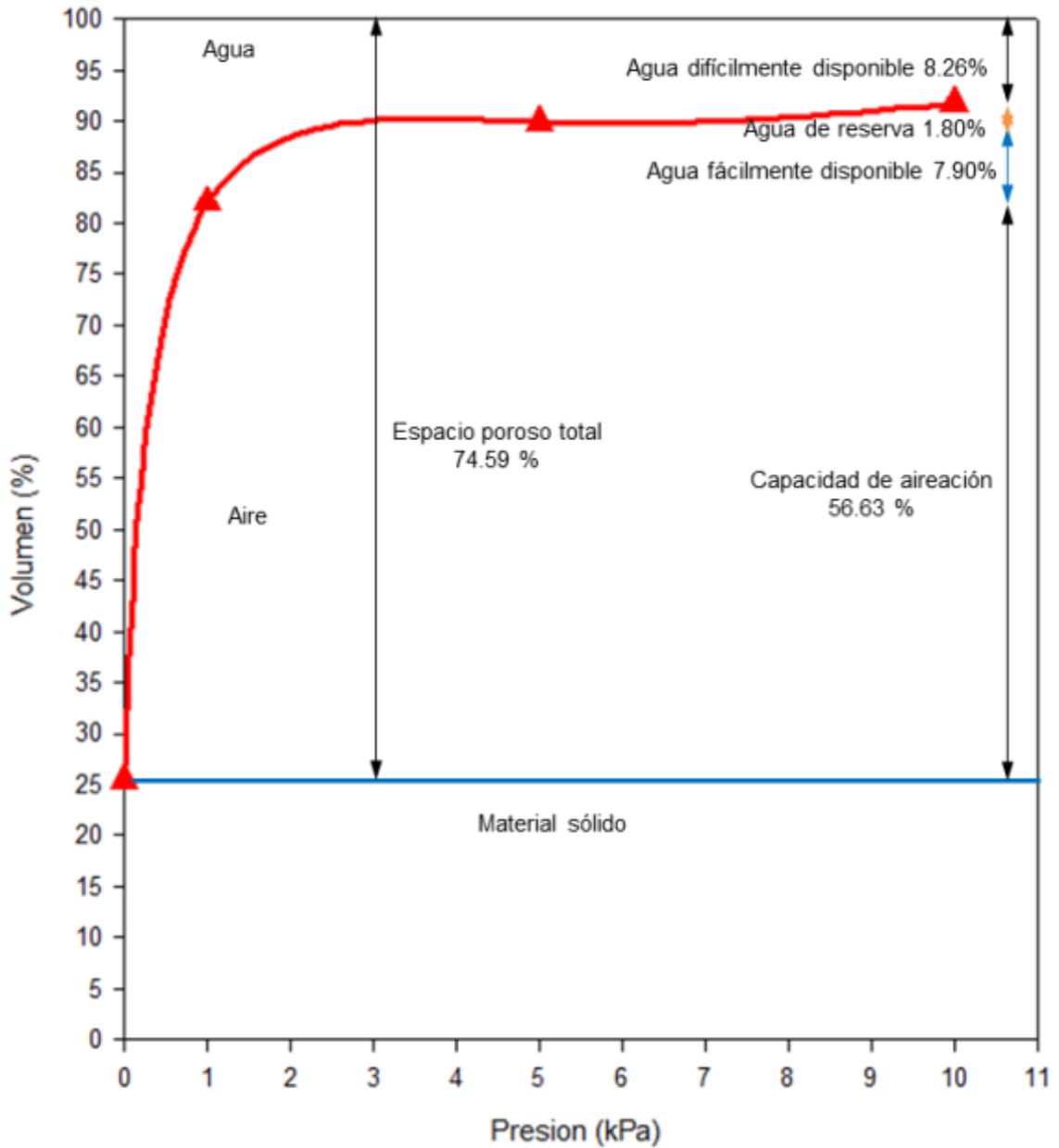


Figura 14. Curva de liberación de humedad para el sustrato Tez 100 al momento del establecimiento del cultivo hidropónico vertical de fresa.

Tez 100: tezontle 100 %

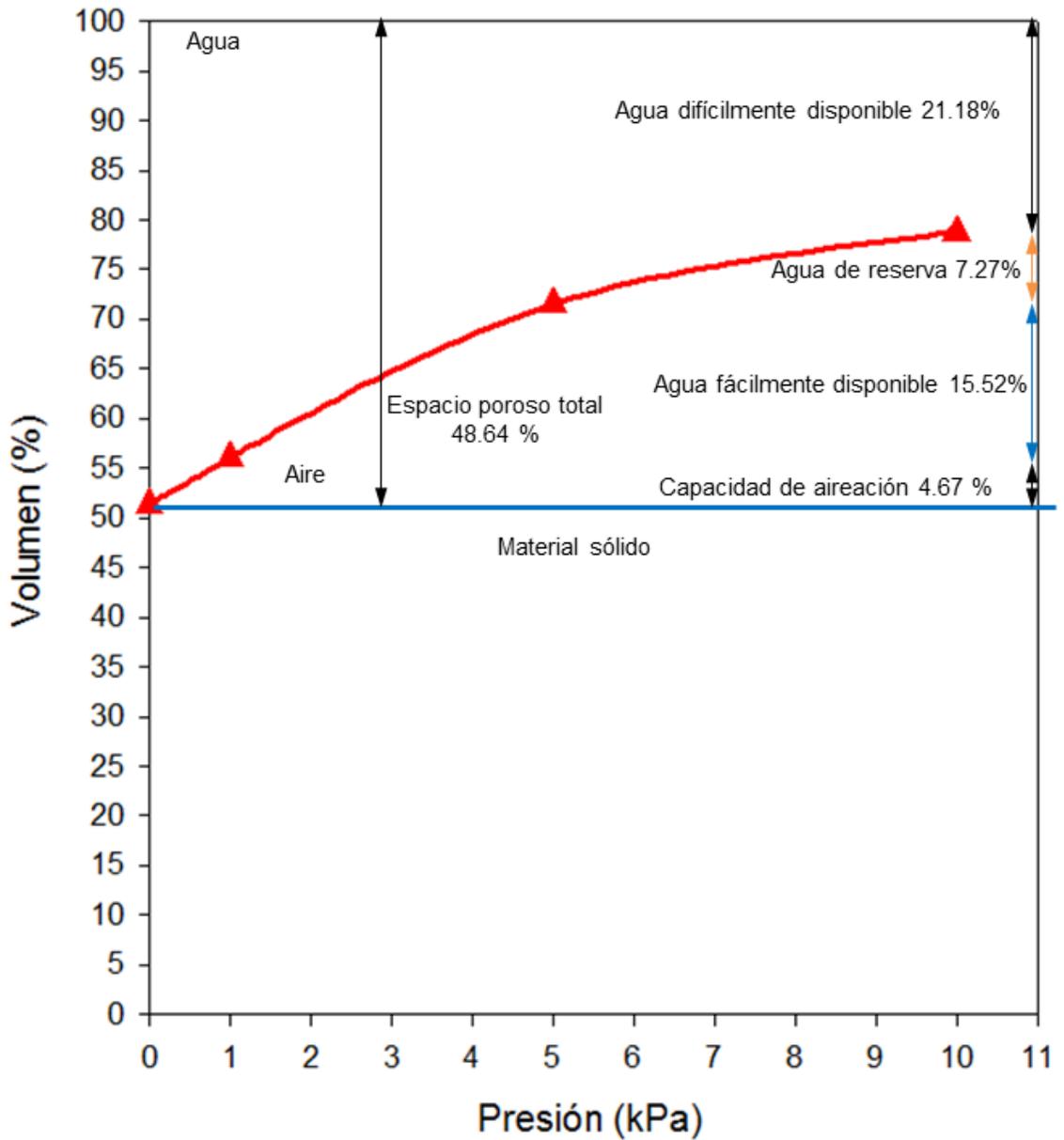


Figura 15. Curva de liberación de humedad para el sustrato Tez 75 al momento del cultivo hidropónico vertical de fresa.

Tez 75: tezontle 3:1 turba

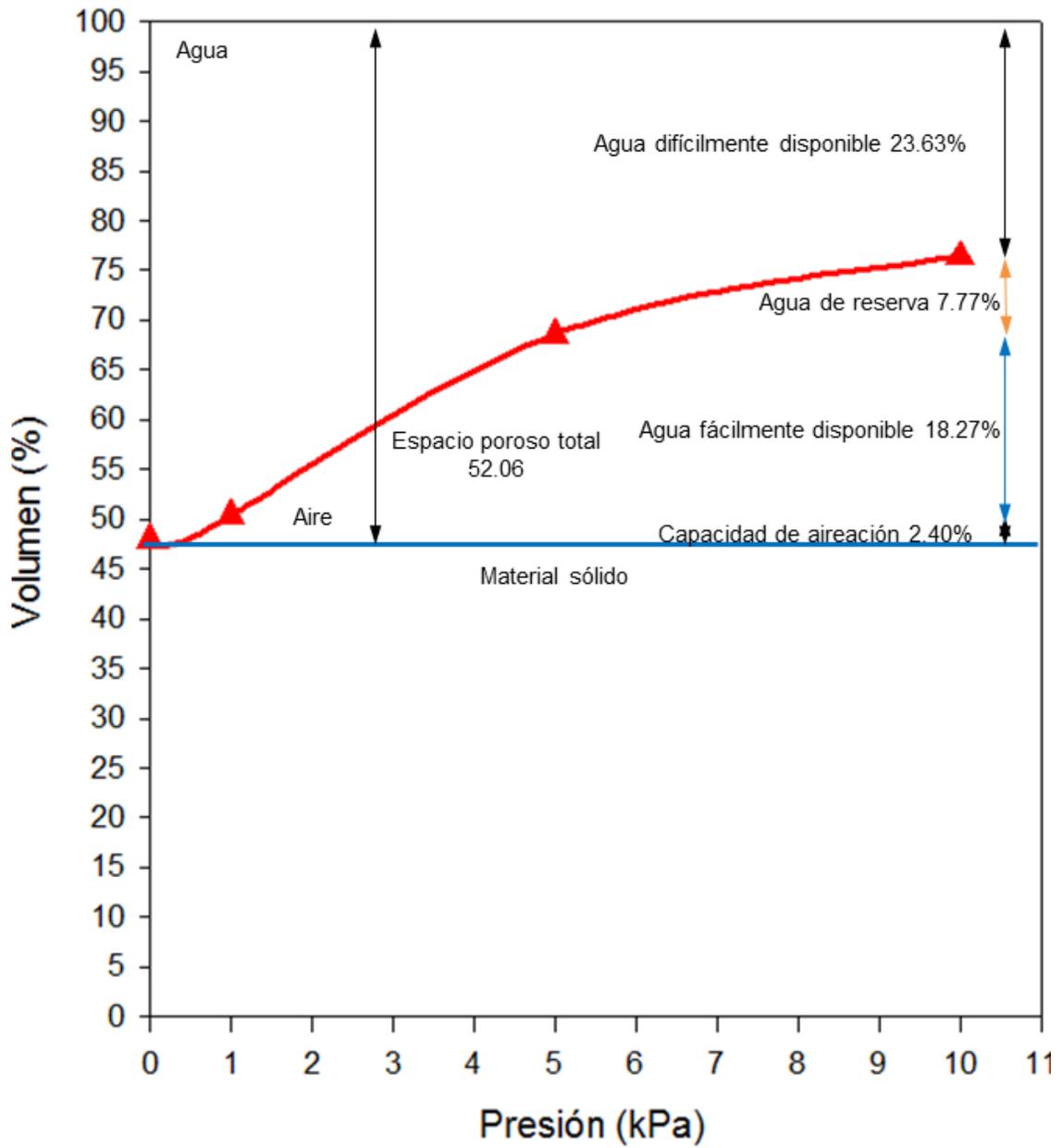


Figura 16. Curva de liberación de humedad para el sustrato Tez 50 al momento del establecimiento del cultivo hidropónico vertical de fresa.

Tez 50: tezontle 1:1 turba.

Compresibilidad de sustratos presente en el cultivo vertical de fresa.

Se realizó el análisis de la fuerza de compresión presente en el tubo vertical a diferentes alturas y con los tres sustratos; si se toma como referencia la altura mayor (160 cm) tendrá casi una nula compresión, pero conforme se disminuye cada 10 cm, que corresponde al distanciamiento vertical de la planta descendente de las plantas en el contenedor, habrá un aumento de compresión de 1.77 L, que en valores de masa corresponderá a una relación con la densidad del sustrato ocupado. Para Tez 100 será 1.55 kg, 1.52 kg para Tez 75 y 1.40 kg para Tez 50, lo que al final se traduce que existiría en la zona alta del contenedor de aproximadamente de 0 a 4.65 kg (160 cm a 130 cm) para Tez 100 aproximadamente de 0 a 4.56 kg para Tez 75 y de 0 a 4.2 kg para Tez 50, para el nivel medio (110 a 80 cm), 7.75 a 12.4 kg Tez 100, 7.6 a 12.2 kg Tez 75 y 7.0 a 11.2 kg para Tez 50; finalmente para la zona baja (60 cm a 30 cm) existió una fuerza de compresión de 15.5 a 20.13 kg para Tez 100, 15.2 a 19.8 kg para Tez 75 y 14.0 a 18.2 kg para Tez 50. Para Tez 100 existe una diferencia entre niveles de 8 kg aproximadamente, para Tez 75 hay una diferencia de 7.6 kg y para Tez 50 existió de 7.0 kg. Estos resultados muestran que respecto a una altura más cercana al fondo del contenedor mayor fuerza de compresión existe, situación que no ocurre tan marcada en cultivos tradicionales sin suelo.

Cuadro 5. Características físicas iniciales de los sustratos utilizados en el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

Sustrato	DAP (g·cm ⁻³)	EPT	CA	CRH	AFD	ADR	ADD	ATD
					%			
T100	0.88±0.00	74.59±0.00 a ^z	56.63±0.00 a	17.96±0.00 b	7.90±0.00 c	1.80±0.00 c	8.26±0.00 b	9.70±0.00 c
T75	0.86± 0.05	48.64±3.20 b	4.67±1.29 b	43.97±1.91 a	15.52±0.08 b	7.27±0.27 b	21.18±1.70 a	22.80±0.28 b
T50	0.79± 0.04	52.06±2.45 b	2.40±0.93 b	49.67±1.52 a	18.27±0.55 a	7.77±0.21 a	23.63±1.18 a	26.03±0.38 a
DMS	0.21	13.7	5.4	8.4	1.4	0.2	7.0	1.7
CV	8.40	8.06	8.70	7.73	3.57	1.29	13.67	2.90

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación, DAP: Densidad aparente, EPT: Espacio poroso total, CA: Capacidad de aireación, CRH: Capacidad de retención de humedad, AFD: Agua fácilmente disponible, ADR: Agua de reserva, ADD: Agua difícilmente disponible, ATD: Agua total disponible, Tez 100: Tezontle 100%, Tez 75: Tezontle 3:1 Turba v/v, Tez 50: Tezontle 1:1 Turba v/v.

5.2.2 Características físicas finales de los sustratos

Al finalizar el ciclo de cultivo, se tomaron muestras de los sustratos por nivel del tubo para llevar a cabo el mismo análisis realizado previo al establecimiento del cultivo. Los resultados del análisis de varianza no registraron efecto de la interacción sustrato y nivel del tubo.

La densidad aparente y la CA tendió a elevarse conforme se incrementó el porcentaje de tezontle en la mezcla del sustrato, el EPT, CRH, AFD, ADR, ADD y ATD se comportó de manera inversa, encontrándose mayores valores conforme el porcentaje de tezontle disminuyó en la mezcla del sustrato. (Cuadro 6).

A mayor altura respecto al tubo se disminuyó la densidad aparente, CRH, ADR, y la ADD; comportándose de manera inversa el EPT y CA mostraron que a menor altura estas se vieron disminuidas. Solo para AFD y ATD los valores más altos se presentaron en el nivel medio (Cuadro 6).

En las Figuras 17 a 19 se pueden observar las curvas de liberación de humedad presentadas para los tres sustratos utilizados.

Cuadro 6. Resultados de las características físicas de sustratos finales utilizados en cultivo vertical hidropónico de tres cultivares de fresa.

Sustrato	DAP (g·cm ⁻³)	EPT	CA	CRH	AFD %	ADR	ADD	ATD
Tez 100	1.26±0.01 a ^z	38.50±0.73 c	10.61±1.02 a	27.89±0.49 c	8.48±0.25 c	3.59±0.17 c	15.82±0.37 b	12.07±0.33 c
Tez 75	1.18±0.01 b	42.01±0.72 b	6.59±0.90 b	35.42±0.38 b	14.02±0.51 b	5.54±0.27 b	15.85±0.49 b	19.56±0.34 b
Tez 50	1.08±0.00 c	53.14±0.84 a	9.87±1.12 a	43.27±0.49 a	16.39±0.47 a	6.57±0.20 a	20.32±0.71 a	22.95±0.39 a
DMS	0.02	2.12	2.31	1.35	1.19	0.55	1.28	0.97
CV	1.55	3.91	21.03	3.12	7.56	8.67	6.07	4.40
Nivel								
Nivel alto	1.16±0.03 b	46.35±2.18 a	11.94±0.78 a	34.41±2.26 b	13.00±1.27 ab	4.65±0.47 c	16.77±0.83 b	17.64±1.64 b
Nivel medio	1.17±0.02 b	44.56±2.28 ab	9.06±0.93 b	35.49±2.20 ab	13.96±1.31 a	5.22±0.42 b	16.31±0.69 b	19.18±1.72 a
Nivel bajo	1.19±0.03 a	42.75±2.37 b	6.08±0.78 c	36.67±2.27 a	11.94±1.04 b	5.82±0.49 a	18.91±0.96 a	17.76±1.52 b
DMS	0.02	2.12	2.31	1.35	1.19	0.55	1.28	1.0
CV	1.55	3.91	21.03	3.12	7.55	8.67	6.07	4.40

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación, DAP: Densidad aparente, EPT: Espacio poroso total, CA: Capacidad de aireación, CRH: Capacidad de retención de humedad, AFD: Agua fácilmente disponible, ADR: Agua de reserva, ADD: Agua difícilmente disponible, ATD: Agua total disponible, Tez 100: Tezontle 100%, Tez 75: Tezontle 3:1 Turba v/v, Tez 50: Tezontle 1:1 Turba v/v.

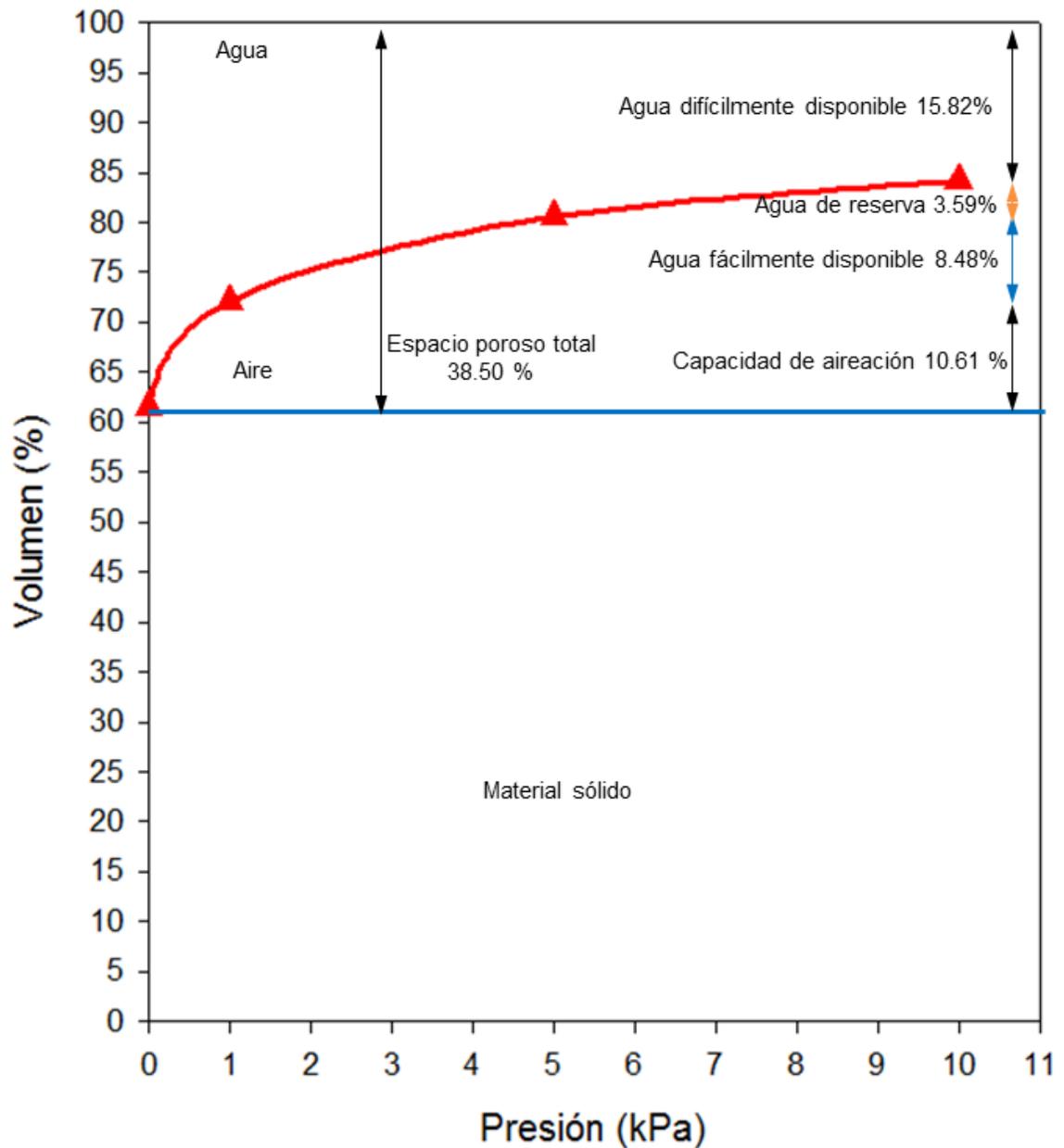


Figura 17. Curva de liberación de humedad para el sustrato Tez 100 al final del ciclo de cultivo hidropónico vertical de fresa.

Tez 100: tezontle 100 %

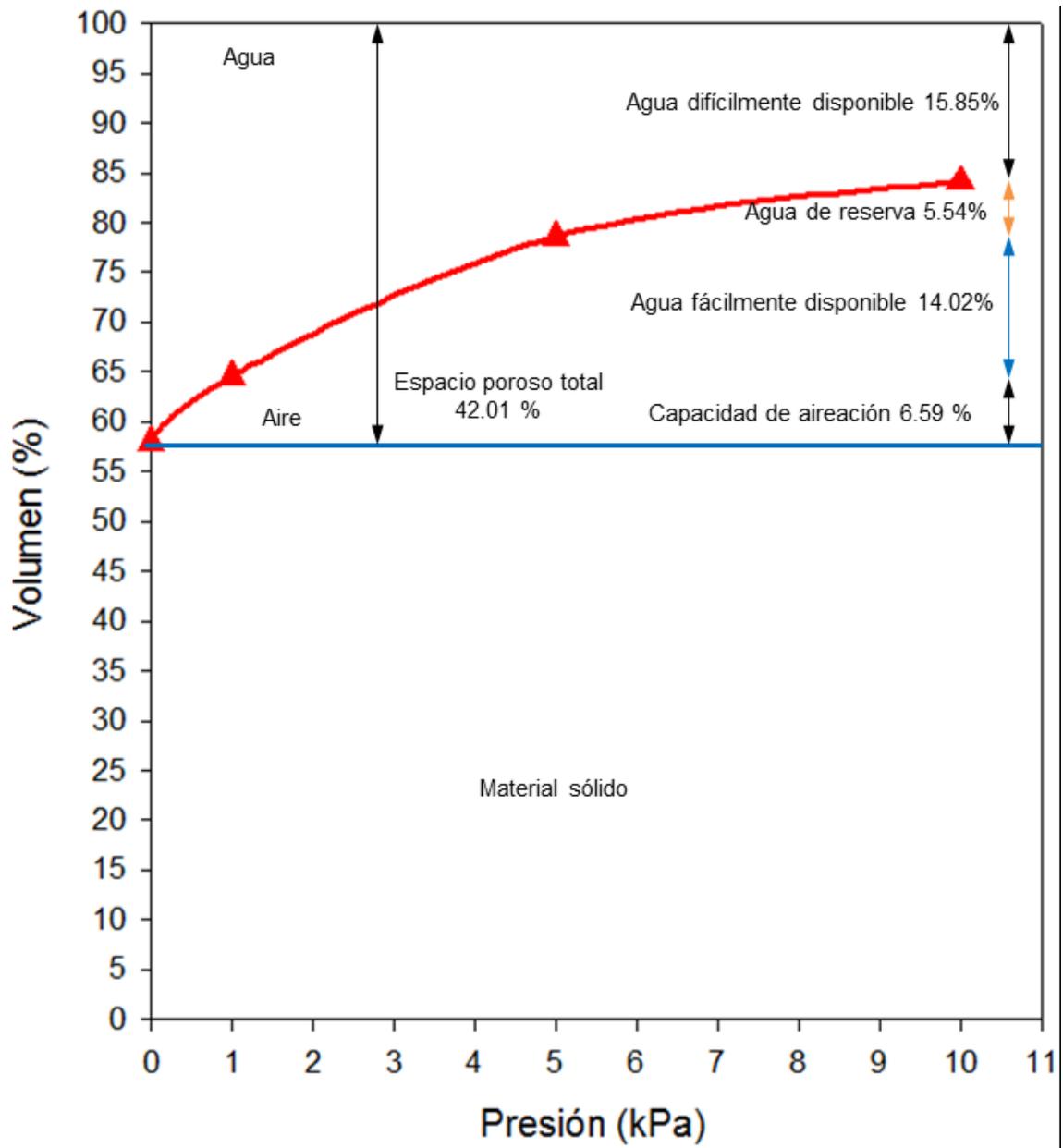


Figura 18. Curva de liberación de humedad para el sustrato Tez 75 al final del ciclo de cultivo hidropónico vertical de fresa.

Tez 75: tezontle 3:1 turba

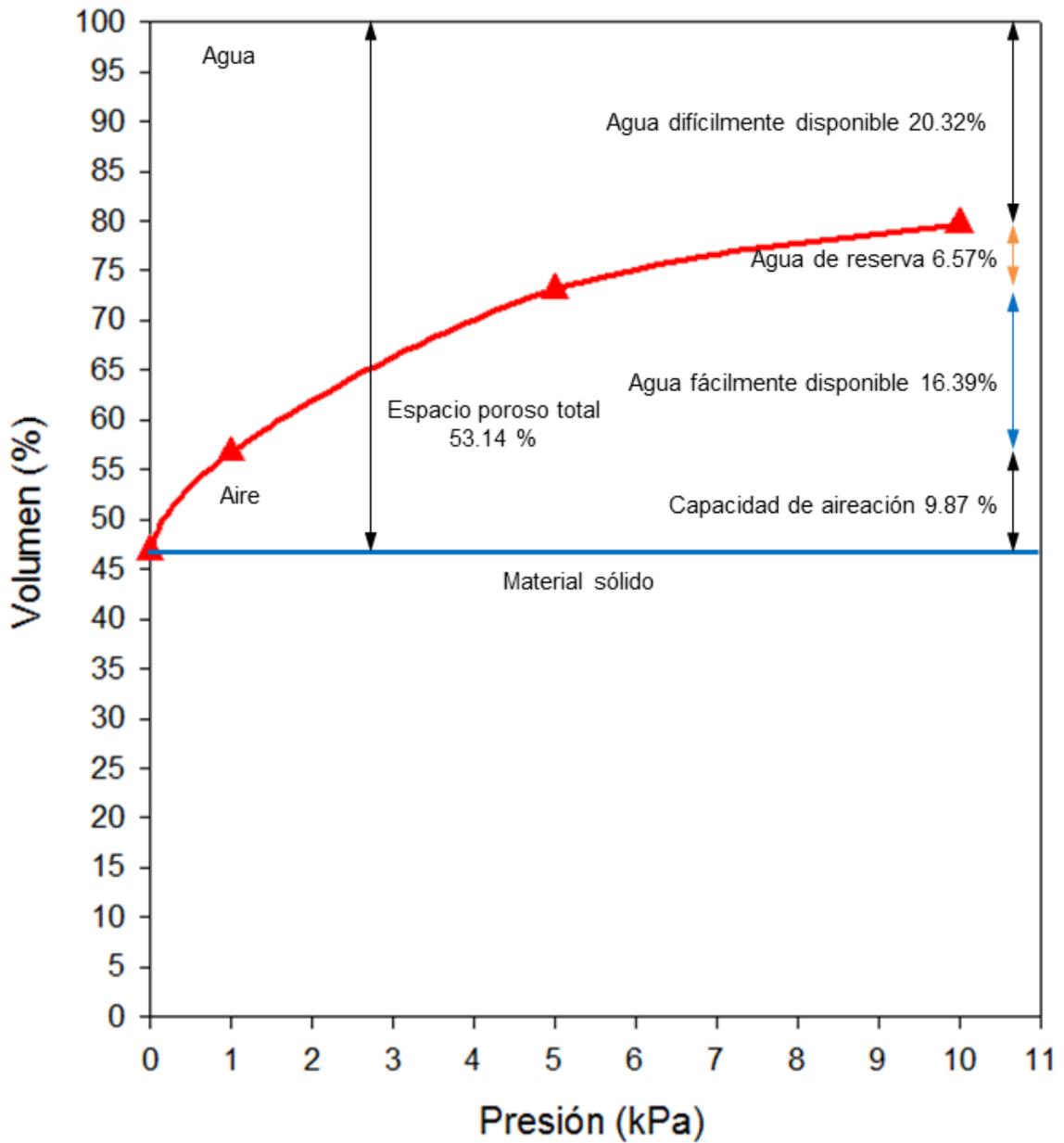


Figura 19. Curva de liberación de humedad para el sustrato Tez 50 al final del ciclo de cultivo hidropónico vertical de fresa.

Tez 50: tezontle 1:1 turba.

Correlaciones.

Las correlaciones de Pearson entre las propiedades físicas de los sustratos, se presentan en el Cuadro 7. La correlación entre la densidad aparente con todos los demás parámetros físicos de los sustratos fue negativa. Todas las correlaciones obtenidas se centran en la relación existente entre el efecto de la densidad aparente y el agua contenida en los sustratos así como su relación con el espacio poroso total. Las variables que presentaron correlación positiva fueron: espacio poroso total con agua fácilmente disponible y agua total disponible, capacidad de retención de humedad con agua de reserva, y agua fácilmente disponible, espacio poroso total con capacidad de retención de humedad, agua total disponible con agua fácilmente disponible y agua de reserva.

Cuadro 7. Correlaciones de las características de sustratos finales utilizados en el cultivo vertical hidropónico de tres cultivares de fresa.

	DAP	EPT	CRH	AFD	ADR	ADD	ATD
DAP		-0.94 **	-0.93 **	-0.91 **	-0.82 **		-0.92 **
EPT			0.88 **	0.82 **			0.82 **
CRH				0.89 **	0.94 **	0.80 **	0.94 **
AFD					0.80 **		0.98 **
ADR							0.89 **

ns,*,**; No significativo y significativo a una (Tukey $P \leq 0.05$ y $P \leq 0.01$), respectivamente.

DAP: Densidad aparente, EPT: Espacio poroso total, CA: Capacidad de aireación, CRH: Capacidad de retención de humedad, AFD: Agua fácilmente disponible, ADR: Agua de reserva, ADD: Agua difícilmente disponible, ATD: Agua total disponible.

5.2.3 Características químicas iniciales de los sustratos

El valor de pH más alto encontrado correspondió a Tez 100, seguido por el Tez 75 y finalmente Tez 50. Para el caso de la conductividad eléctrica el comportamiento fue inverso (Cuadro 8).

Cuadro 8. Valores iniciales de pH y conductividad eléctrica de sustratos usados en el cultivo hidropónico vertical de fresa.

Sustrato	pH	CE (dS·m ⁻¹)
Tez 100	7.05±0.02 a ^z	0.15±0.02 c
Tez 75	6.55±0.02 b	0.40±0.01 b
Tez 50	6.10±0.01 c	0.81±0.02 a
DMS	0.11	0.08
CV	0.58	6.58

ns,*, No significativo y significativo a una (Tukey P≤0.05), respetivamente.

^zValores con la misma letra dentro de cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación, Tez 100: Tezontle 100%, Tez 75: Tezontle 3:1 Turba v/v, Tez 50: Tezontle 1:1 Turba v/v.

5.2.4 Características químicas finales de sustratos

Los resultados obtenidos de los análisis de las muestras por nivel y por sustrato al final del cultivo, no presentaron diferencias estadísticas (Cuadro 9).

Cuadro 9. Valores de pH y conductividad eléctrica por sustrato y por nivel del tubo al final del ciclo de cultivo hidropónico vertical de fresa.

Sustrato	Nivel				
	pH	CE (dS·m ⁻¹)		pH	CE (dS·m ⁻¹)
Tez 100	6.19±0.08	2.33±0.12	Nivel alto	6.34±0.09	2.70±0.23
Tez 75	6.13±0.08	2.87±0.28	Nivel medio	6.18±0.09	2.85±0.25
Tez 50	6.25±0.10	2.54±0.22	Nivel bajo	6.05±0.06	2.18±0.11
DMS	-	-	DMS	-	0.75
CV	3.88	23.84	CV	3.88	23.84

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación, Tez 100: Tezontle 100%, Tez 75: Tezontle 3:1 Turba v/v, Tez 50: Tezontle 1:1 Turba v/v.

5.3. Variables de planta

La longitud de peciolo, grosor de peciolo, peso seco total por planta, peso seco aéreo por planta y relación peso seco aéreo/peso seco raíz por planta fueron afectados significativamente por el cultivar, en tanto que el peso seco total por planta, peso seco aéreo por planta, peso seco de raíz por planta, relación peso seco aéreo/peso seco raíz por planta y área foliar por el nivel del sustrato. La longitud de peciolo fue afectado por el sustrato y la relación peso seco aéreo /peso seco raíz por planta por la interacción sustrato*nivel (Cuadro 15A).

En las Figuras 20 a 22 se pueden apreciar visualmente la morfología de la planta completa después de haber sido cosechadas y extraídas con todo y raíz del sustrato del tubo del cultivo vertical.

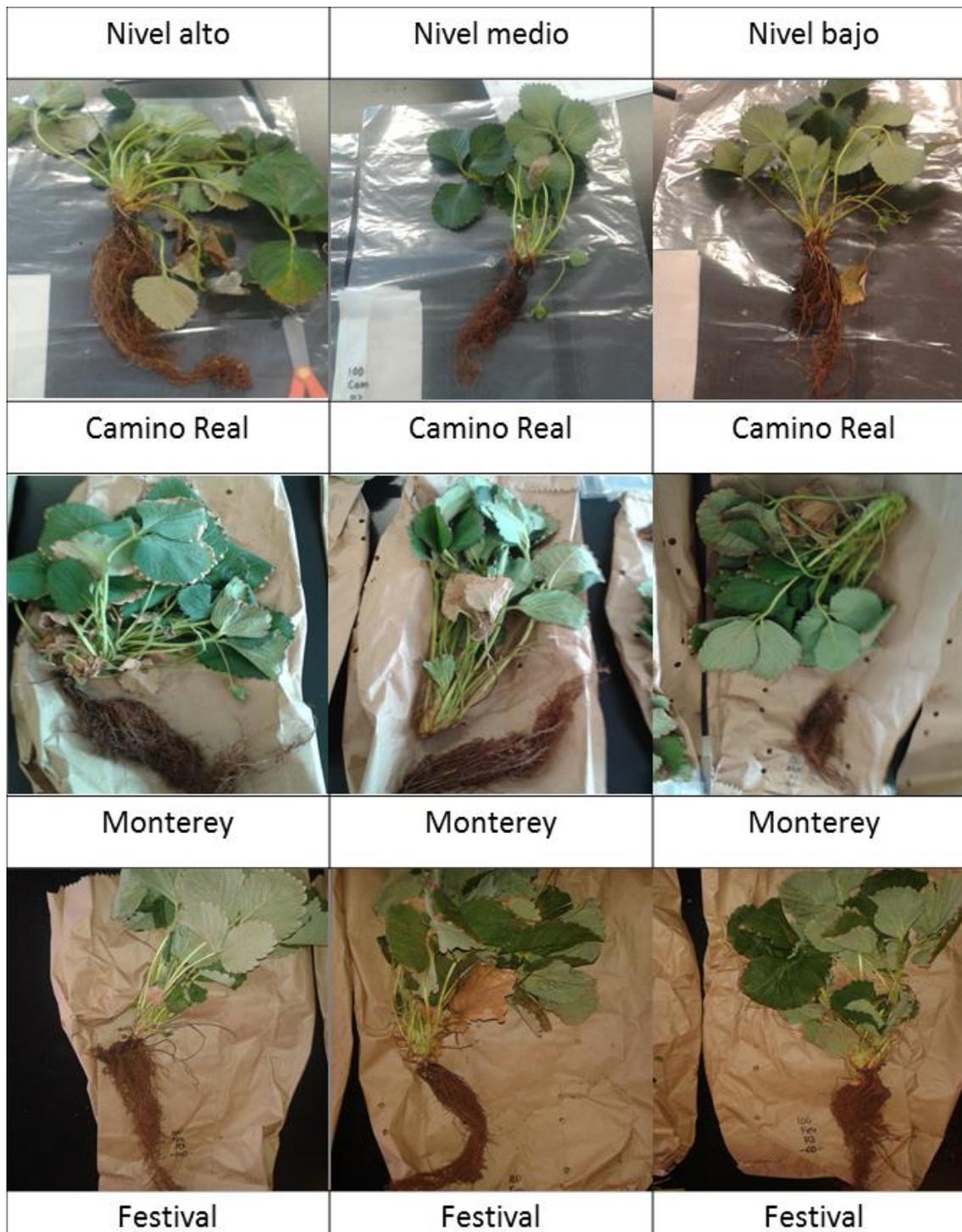


Figura 20. Morfología de las plantas completas cosechadas obtenidas del sustrato Tez 100 al finalizar el cultivo hidropónico vertical de tres.

Tez 100: tezontle 100 %.



Figura 21. Morfología de las plantas completas cosechadas obtenidas del sustrato Tez 75 al finalizar el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares Tez 75: tezontle 3:1



Figura 22. Morfología de las plantas completas cosechadas obtenidas del sustrato Tez 50 al finalizar el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

Tez 50: tezontle 1:1 turba.

Longitud de peciolo. La mayor longitud se encontró en las hojas de las plantas que se cultivaron en Tez 50, continuando así con las de Tez 75 y finalmente con las de Tez 100 (Figura 23).

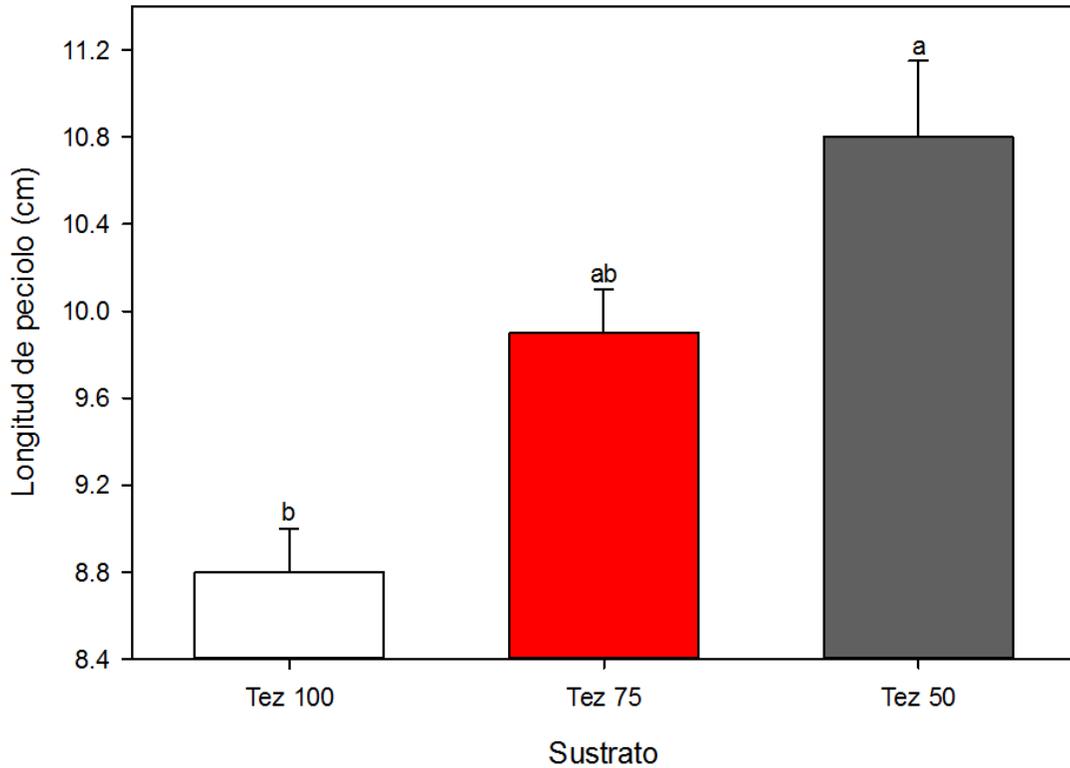


Figura 23. Longitud de peciolo de hoja en los diferentes sustratos utilizados en el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

Tez 100: tezontle 100 %, Tez 75: tezontle 3:1 turba y Tez 50: tezontle 1:1 turba. Cada valor es el promedio de tres niveles en el tubo y tres cultivares.

Las hojas del cultivar Monterey fueron las que tuvieron la mayor longitud del pecíolo, seguido por las de Festival y Camino Real (Figura 24).

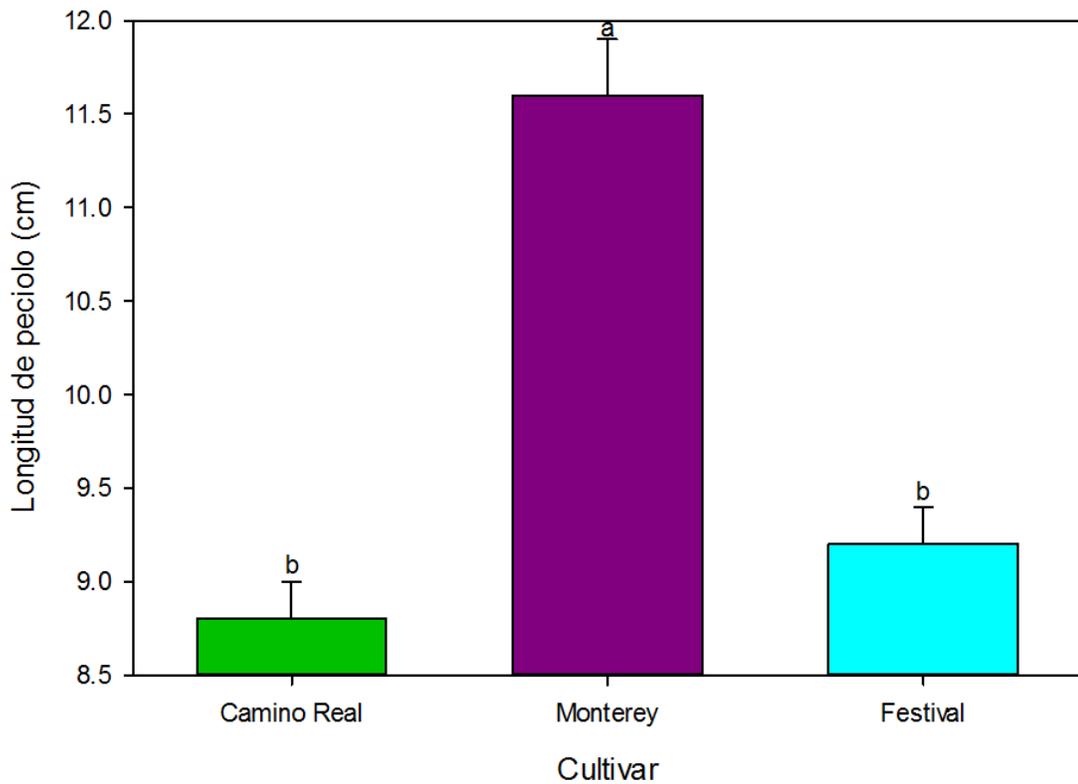


Figura 24. Longitud de peciolo de planta de los diferentes cultivares utilizados en el cultivo hidropónico vertical de fresa.

Cada valor es el promedio de tres sustratos y tres niveles del tubo.

Grosor del peciolo. Las diferencias estadísticas fueron entre cultivares; las plantas del cultivar Monterey presentaron el mayor grosor de peciolo, pero con valores similares a las del cultivar Festival, las que a su vez presentaron valores similares a las del cultivar Camino Real (Figura 25).

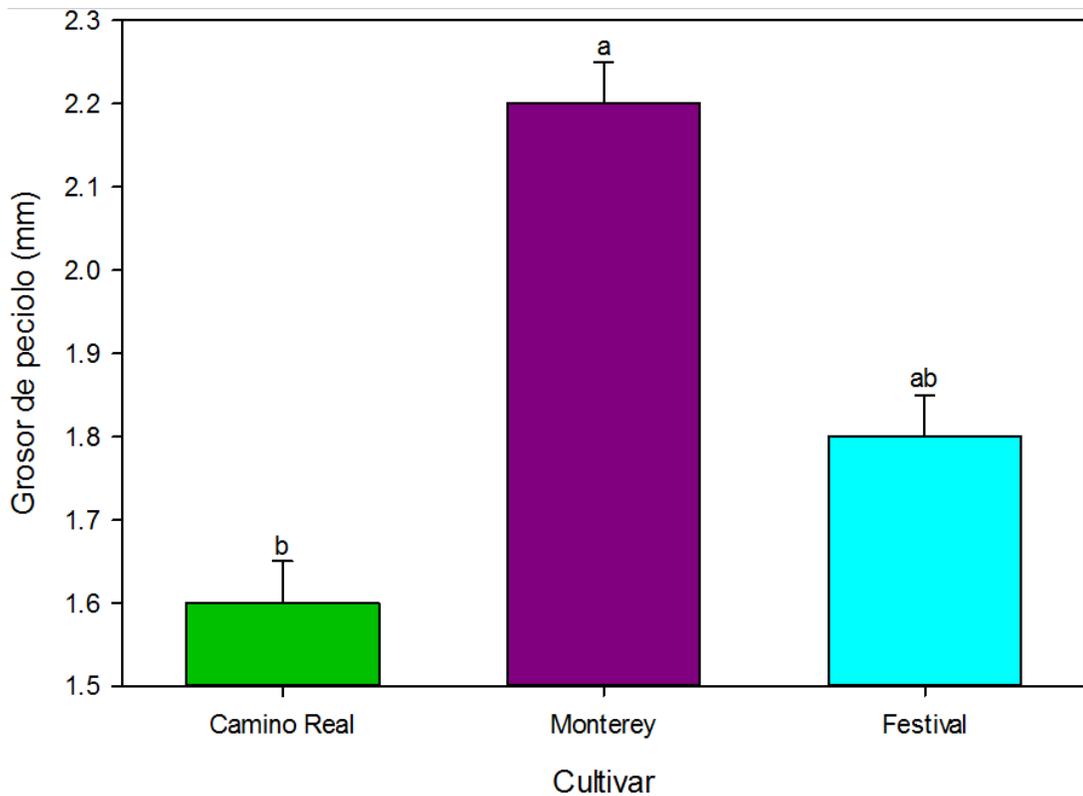


Figura 25. Grosor de peciolo de planta de los diferentes cultivares utilizados en el cultivo hidropónico vertical de fresa.

Cada valor es el promedio de tres sustratos y tres niveles del tubo.

Peso seco por planta. El tipo de sustrato no tuvo influencia en el peso seco de la planta; sin embargo el nivel del tubo si, de tal forma que las plantas en los niveles alto y medio presentaron mayor peso, en tanto que las del nivel bajo acumularon el menor peso (Figura 26).

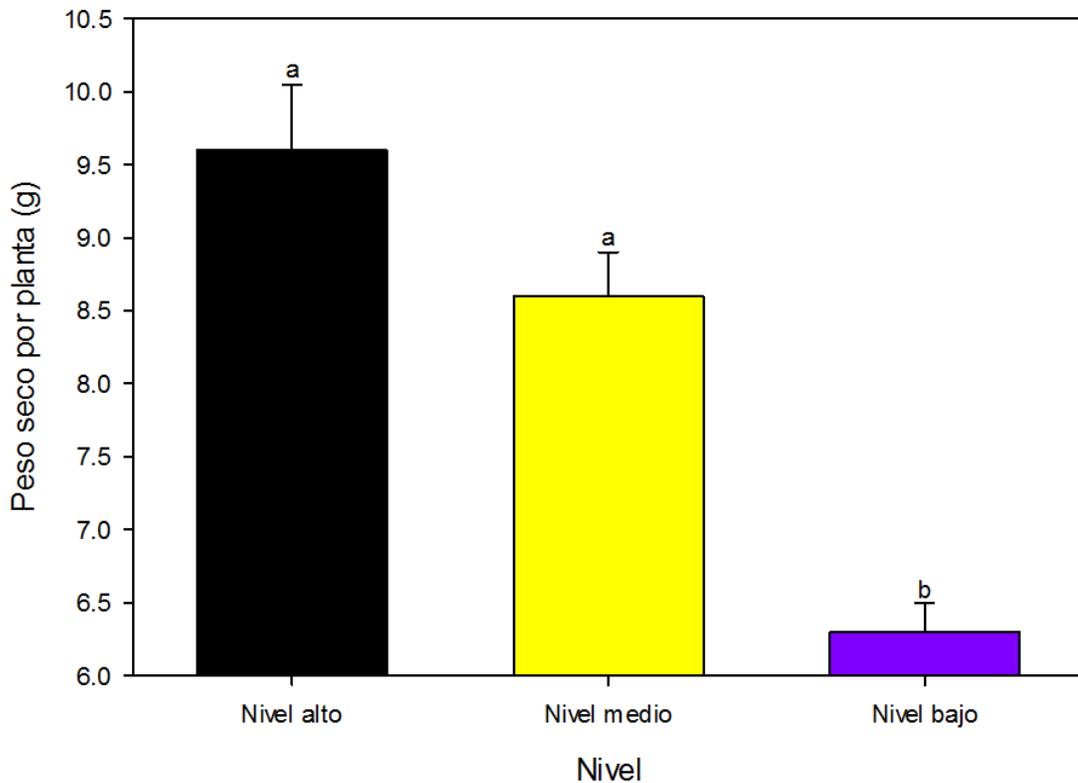


Figura 26. Peso seco por planta en los diferentes niveles del tubo del cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

Nivel alto: 160 – 130 cm, Nivel medio: 110 – 80 cm, Nivel bajo: 60 – 30 cm. Cada valor es el promedio de los tres sustratos y tres cultivares.

Las plantas de los cultivares Festival y Monterey presentaron pesos secos iguales, superando estadísticamente las plantas de Camino Real (Figura 27).

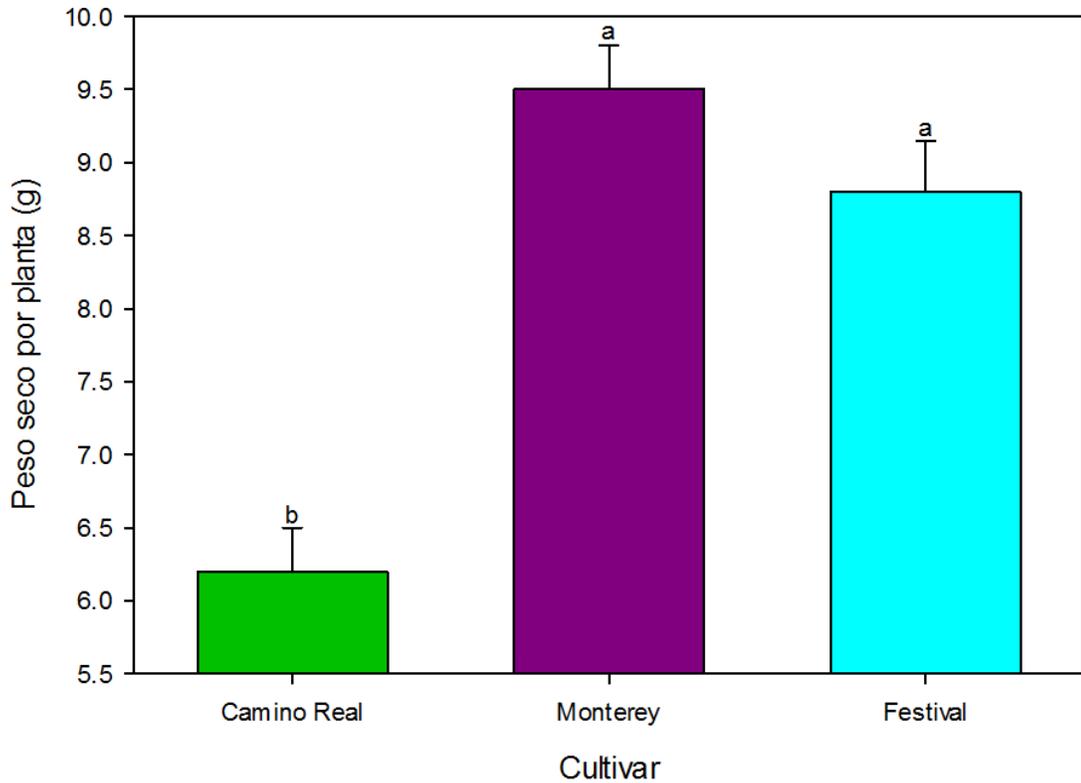


Figura 27. Peso seco por planta en los diferentes cultivares utilizados en el cultivo hidropónico vertical de fresa.

Cada valor es el promedio de los tres sustratos y tres niveles del tubo.

Peso seco aéreo. Las plantas ubicadas en el nivel alto y medio presentaron el mayor peso seco aéreo (Figura 28).

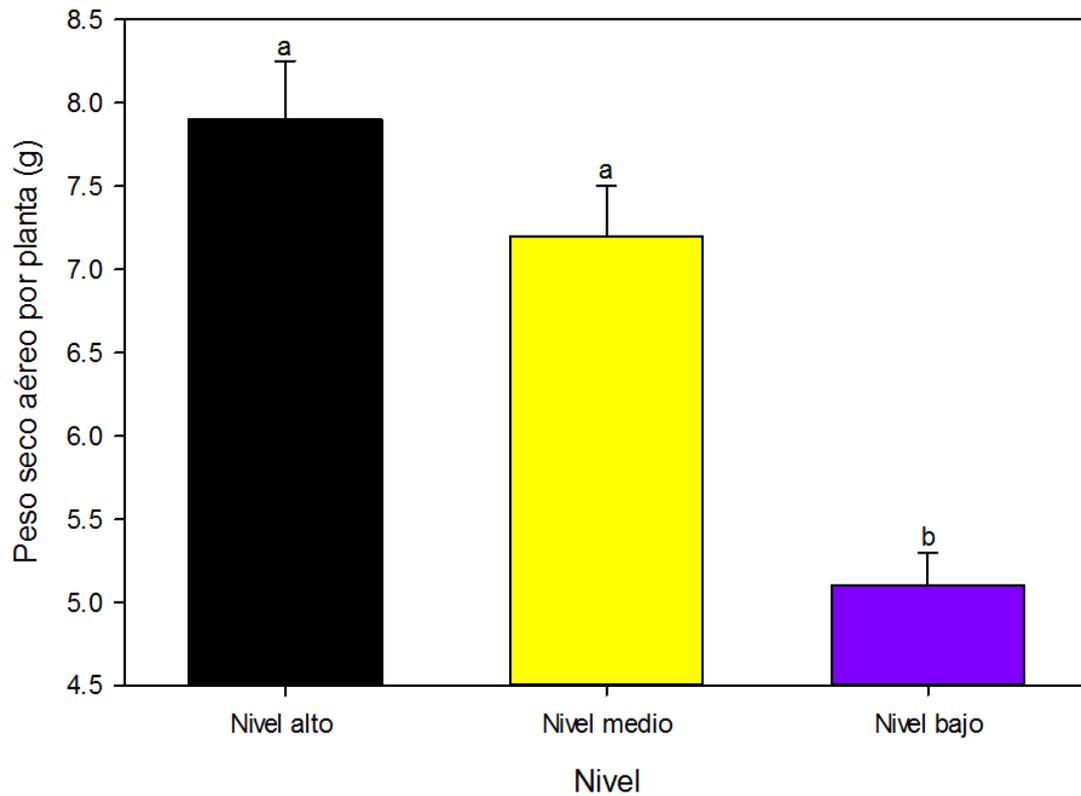


Figura 28. Peso seco aéreo por planta en los diferentes niveles del tubo del cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

Nivel alto: 160 – 130 cm, Nivel medio: 110 – 80 cm, Nivel bajo: 60 – 30 cm. Cada valor es el promedio de los tres sustratos y tres cultivares.

Las plantas de los cultivares Monterey y Festival presentaron el mayor peso seco aéreo (Figura 29).

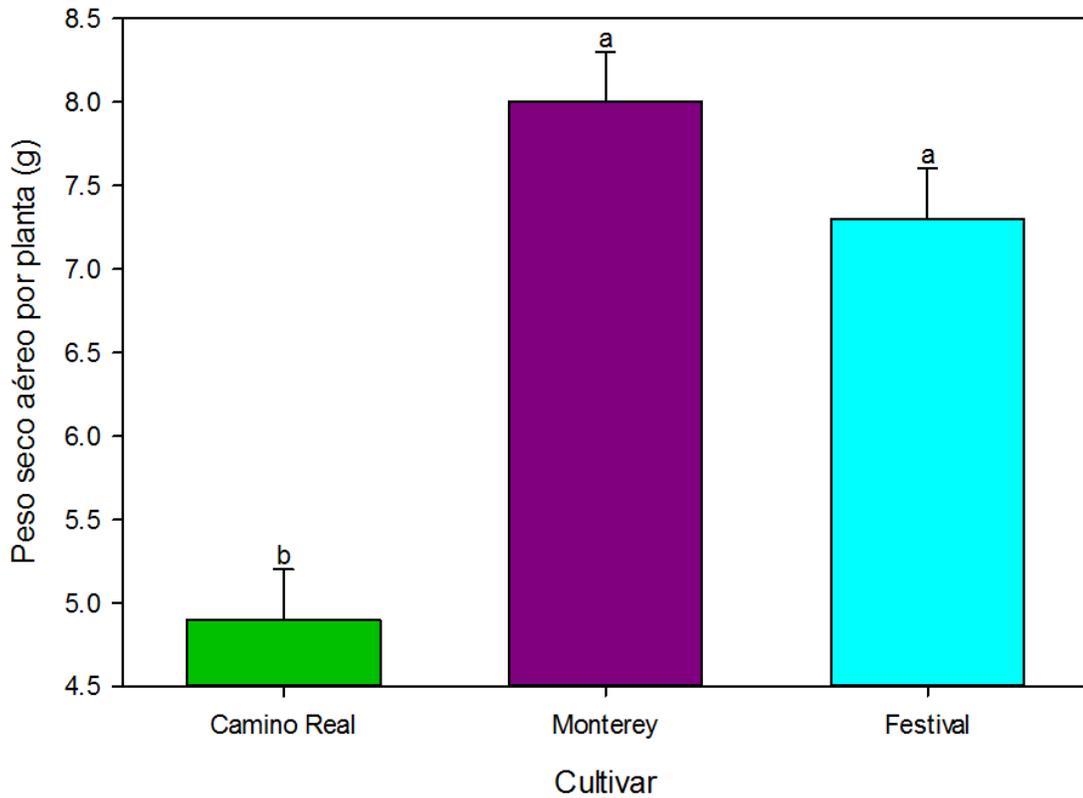


Figura 29. Peso seco aéreo por planta en los diferentes cultivares utilizados en el cultivo hidropónico vertical de fresa.

Cada valor es el promedio de los tres sustratos y tres niveles del tubo.

Peso seco de raíz. En esta variable no se presentaron diferencias estadísticamente significativas en las raíces de las plantas por efecto del tipo de sustrato ni por cultivar; pero sí por nivel del tubo, así las raíces de las plantas ubicadas en los niveles alto y medio presentaron los pesos más altos. Las plantas del nivel bajo presentaron las raíces con el menor peso (Figura 30).

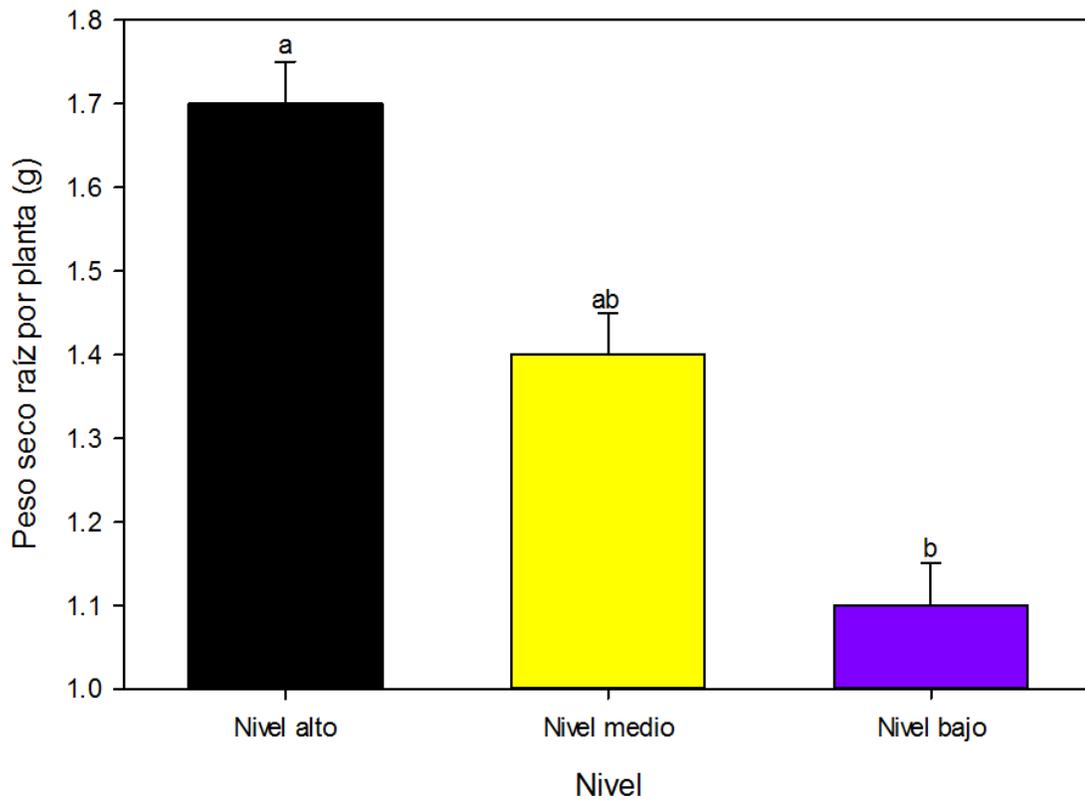


Figura 30. Peso seco de raíz por planta en los diferentes niveles del tubo del cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

Nivel alto: 160 – 130 cm, Nivel medio: 110 – 80 cm, Nivel bajo: 60 – 30 cm. Cada valor es el promedio de tres sustratos y tres cultivares.

Relación peso seco aéreo/peso seco raíz. La mayor relación se reportó en las plantas del nivel medio, seguido por las relaciones de las plantas de los niveles altos y bajo (Figura 31).

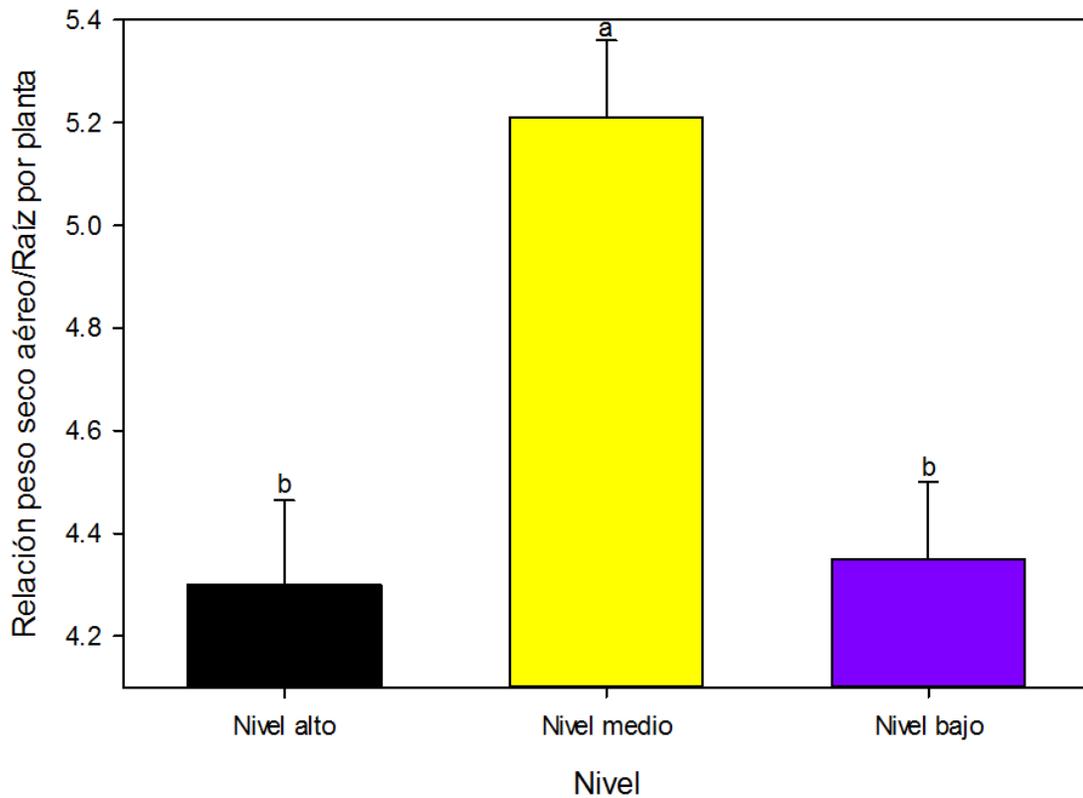


Figura 31. Relación peso seco aéreo por planta/peso seco de raíz por planta en los diferentes niveles del tubo del cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

Nivel alto: 160 – 130 cm, Nivel medio: 110 – 80 cm, Nivel bajo: 60 – 30 cm. Cada valor es el promedio de tres sustratos y tres cultivares.

Las relación en las plantas de los cultivares Monterey y Festival tuvieron los mayores valores, mientras que las plantas del cultivar Camino Real presentaron la menor relación (Figura 32).

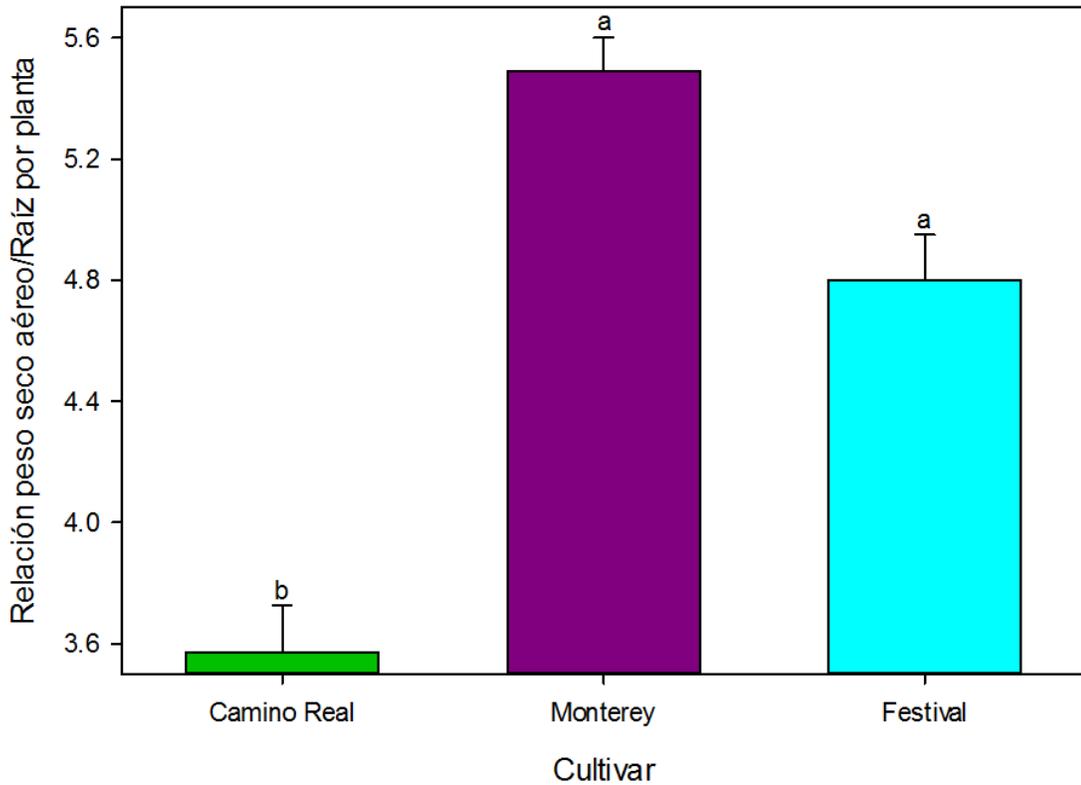


Figura 32. Relación peso seco aéreo/ peso seco de raíz por planta en los diferentes cultivares utilizados en el cultivo hidropónico vertical de fresa.

Cada valor es el promedio de tres sustratos y tres niveles del tubo.

Área foliar. Las plantas de los niveles alto y medio presentaron los mayores valores de área foliar en tanto que en las plantas del nivel bajo fue la menor (Figura 33).

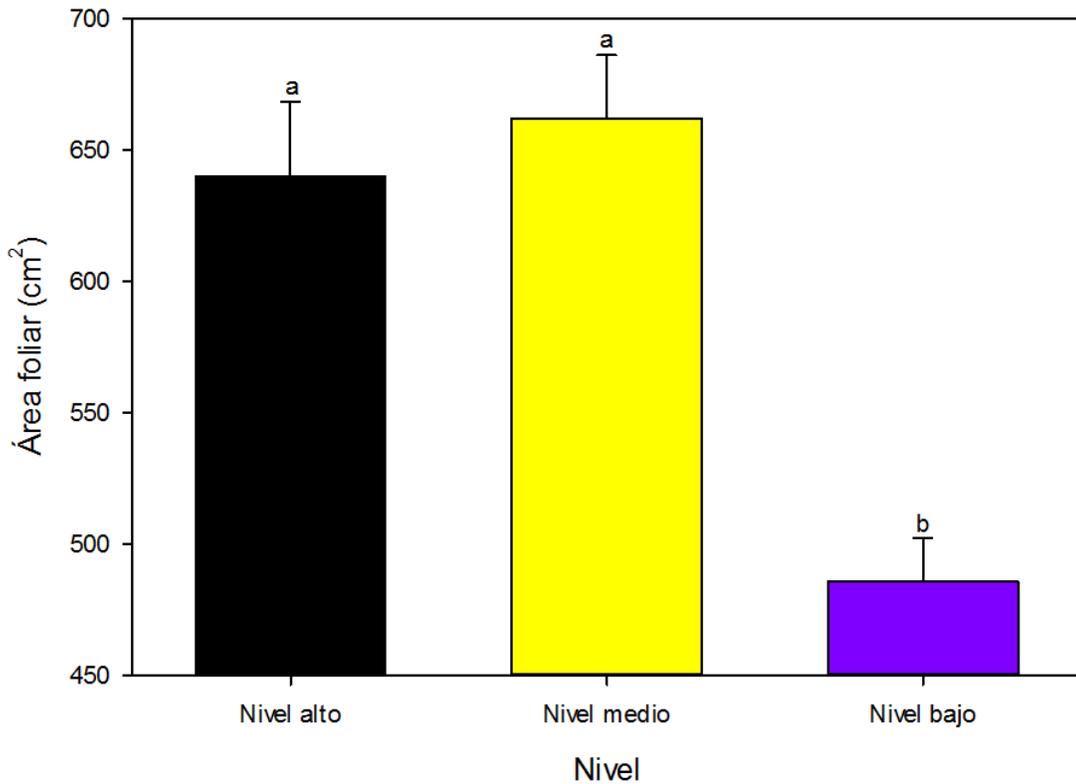


Figura 33. Área foliar en los diferentes niveles del tubo del cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

Nivel alto: 160 – 130 cm, Nivel medio: 110 – 80 cm, Nivel bajo: 60 – 30 cm. Cada valor es el promedio de tres sustratos y tres cultivares.

Las plantas de 'Monterey' y 'Festival' presentaron la mayor área foliar y las de 'Camino Real' tuvieron la menor área foliar (Figura 34).

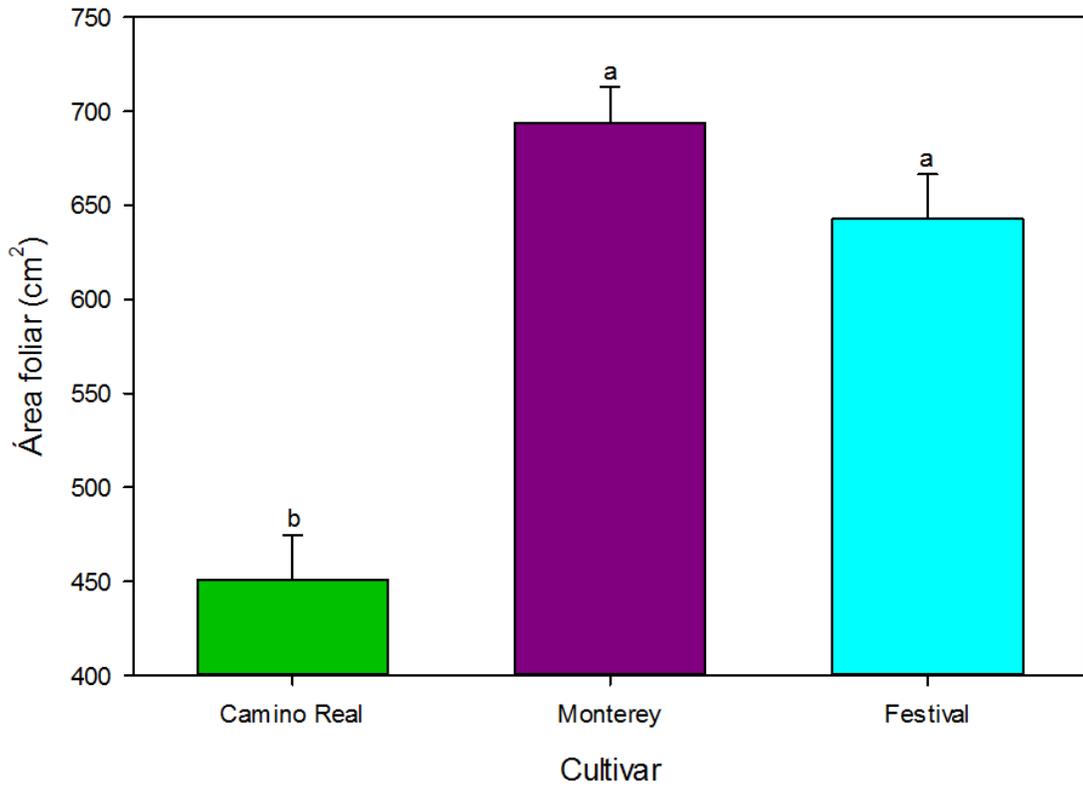


Figura 34. Área foliar por planta de los diferentes cultivares utilizados en el cultivo hidropónico vertical de fresa.

Cada valor es el promedio de los tres sustratos y tres niveles del tubo.

Correlaciones.

Se identificaron positivas entre las siguientes variables: peso seco total por planta con peso seco aéreo y peso seco de raíz, peso seco aéreo con peso seco de raíz y área foliar. Los resultados obtenidos indican que hay una alta relación entre casi todas las variables resultantes de este análisis, excepto para peso seco raíz por planta y área foliar (Cuadro 10).

Cuadro 10. Correlaciones de las características de las plantas obtenidas en el cultivo vertical hidropónico de tres cultivares de fresa.

	PSA	PSR	PS	AF
PSA		0.76 **	0.99 **	0.93 **
PSR			0.82 **	
PS				0.93 **

ns, *, **; No significativo y significativo a una (Tukey $P \leq 0.05$ y $P \leq 0.01$), respectivamente.

PS: Peso seco total de planta (g), PSA: Peso seco aéreo por planta (g), PSR: Peso seco raíz por planta (g), AF: Área foliar (mm²).

5.4 Concentración nutrimental en la planta

En el Cuadro 17A se presenta el análisis de varianza para la concentración nutrimental de la planta.

Nitrógeno. Los resultados mostraron que la concentración no tuvo efecto del tipo de sustrato ni de la altura de la planta en el tubo de cultivo, pero si del cultivar con diferencias estadísticas entre ellos, de tal forma que la concentración en las plantas de 'Camino Real' fue superior a la de las plantas de 'Festival', pero igual a la de las de 'Monterey' (Figura 35).

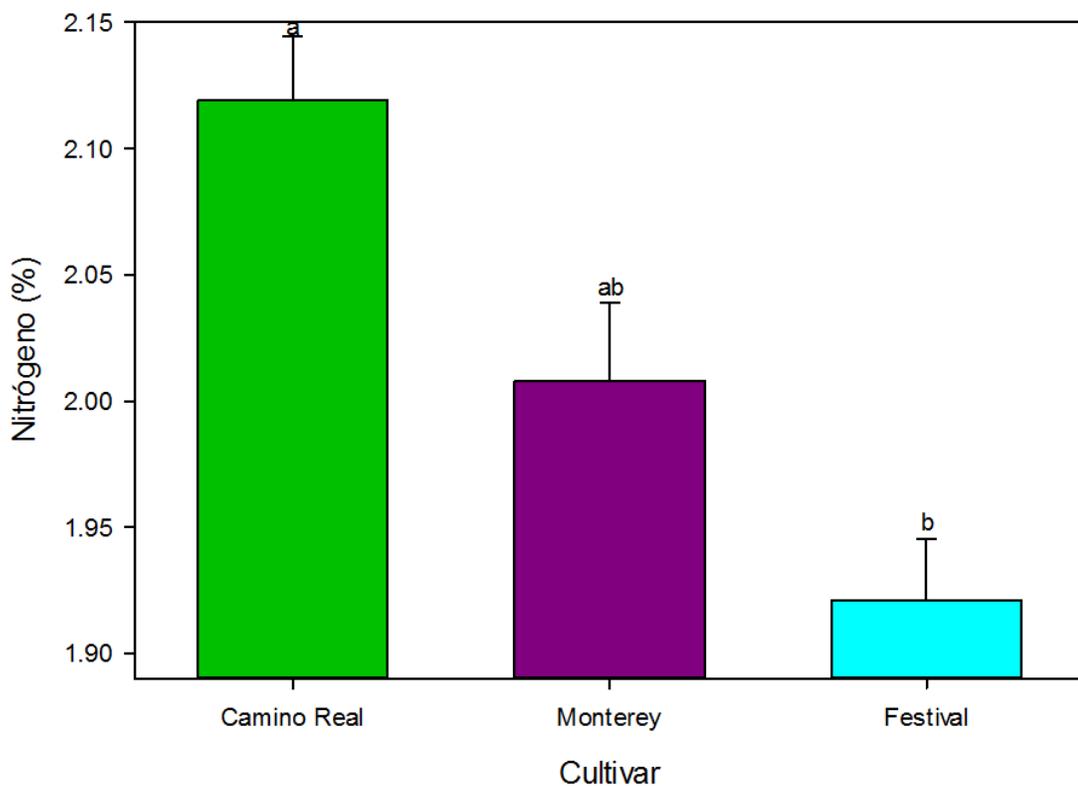


Figura 35. Concentración de nitrógeno en plantas de fresa de tres cultivares bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.

Cada valor es el promedio de los tres sustratos y tres niveles del tubo.

Fósforo. Las plantas del sustrato Tez 75 tuvieron una mayor concentración de fósforo y las de los restantes sustratos presentaron un valor idéntico (Cuadro 18A).

Las plantas de la zona media y baja fueron las que presentaron los mayores niveles de fósforo en comparación con las de la zona alta (Figura 36).

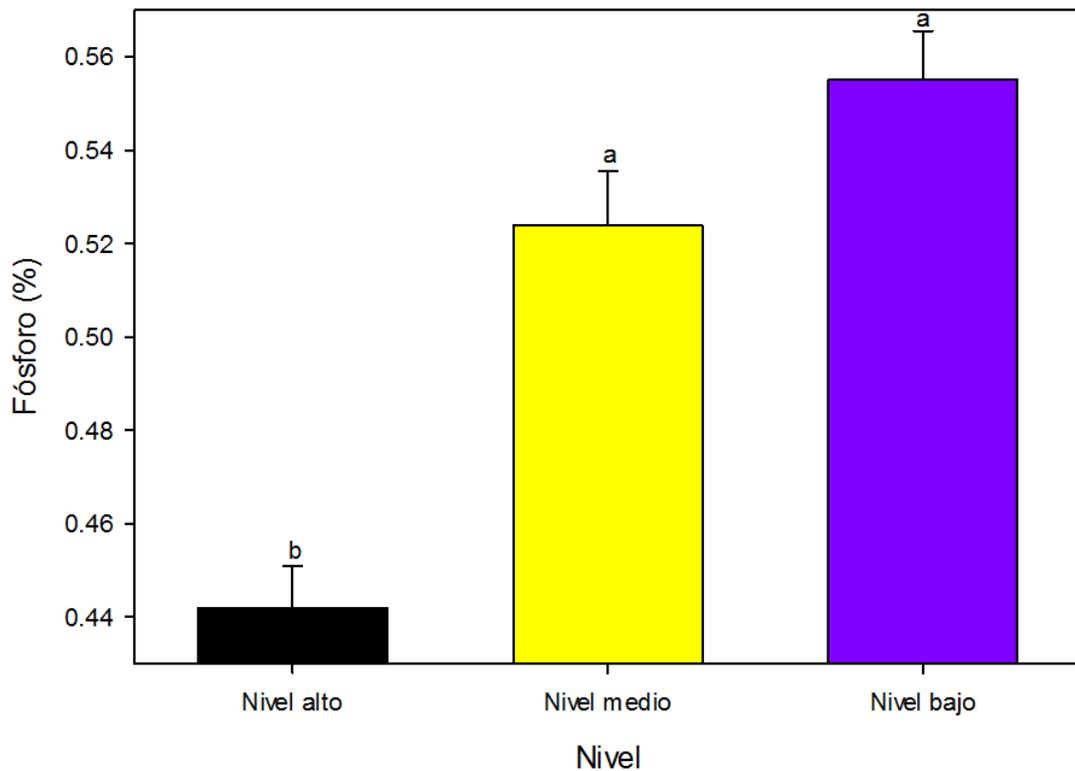


Figura 36. Concentración de fósforo en plantas de fresa en tres diferentes niveles del tubo bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.

Nivel alto: 160 – 130 cm, Nivel medio: 110 – 80 cm, Nivel bajo: 60 – 30 cm. Cada valor es el promedio de tres sustratos y tres cultivares.

Las plantas del cultivar Monterey presentaron la mayor concentración de fósforo seguido de las de 'Festival' y al final las de 'Camino Real' (Figura 37).

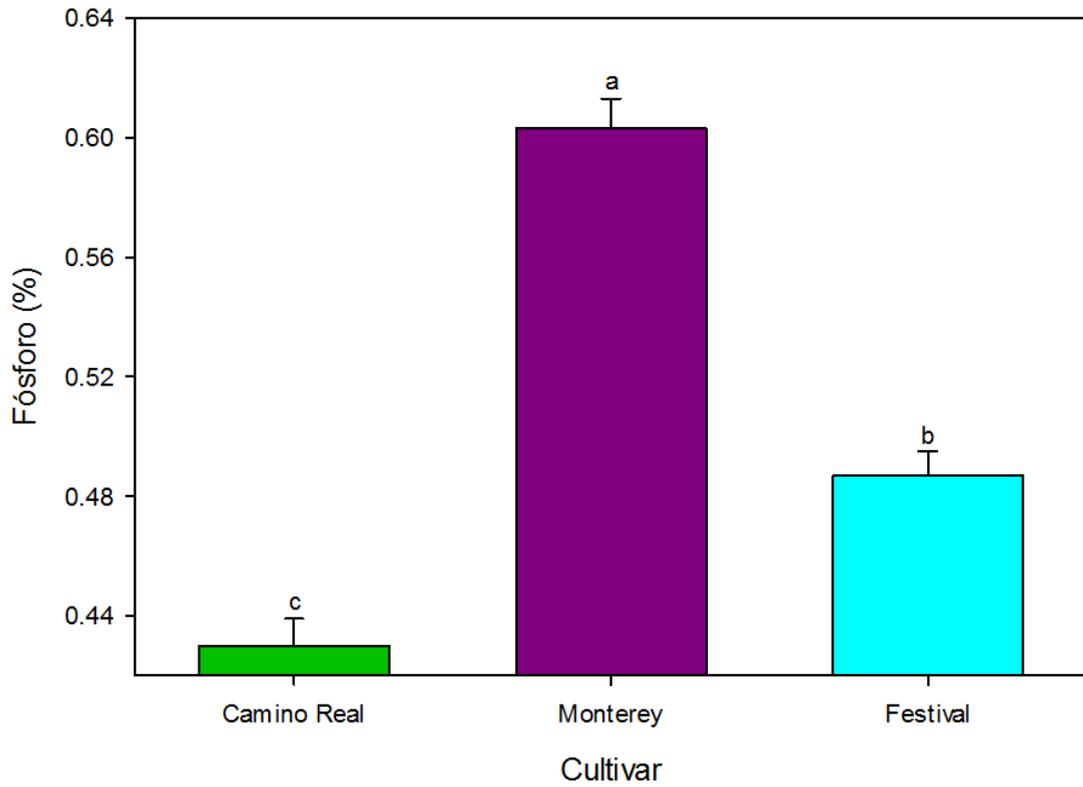


Figura 37. Concentración de fósforo en plantas de fresa de tres cultivares bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.

Cada valor es el promedio de los tres sustratos y tres niveles del tubo.

Potasio. Las plantas que crecieron en el Tez 50 presentaron la mayor concentración de potasio seguido de las que se desarrollaron en el Tez 75 y finalmente las de Tez 100 (Figura 38).

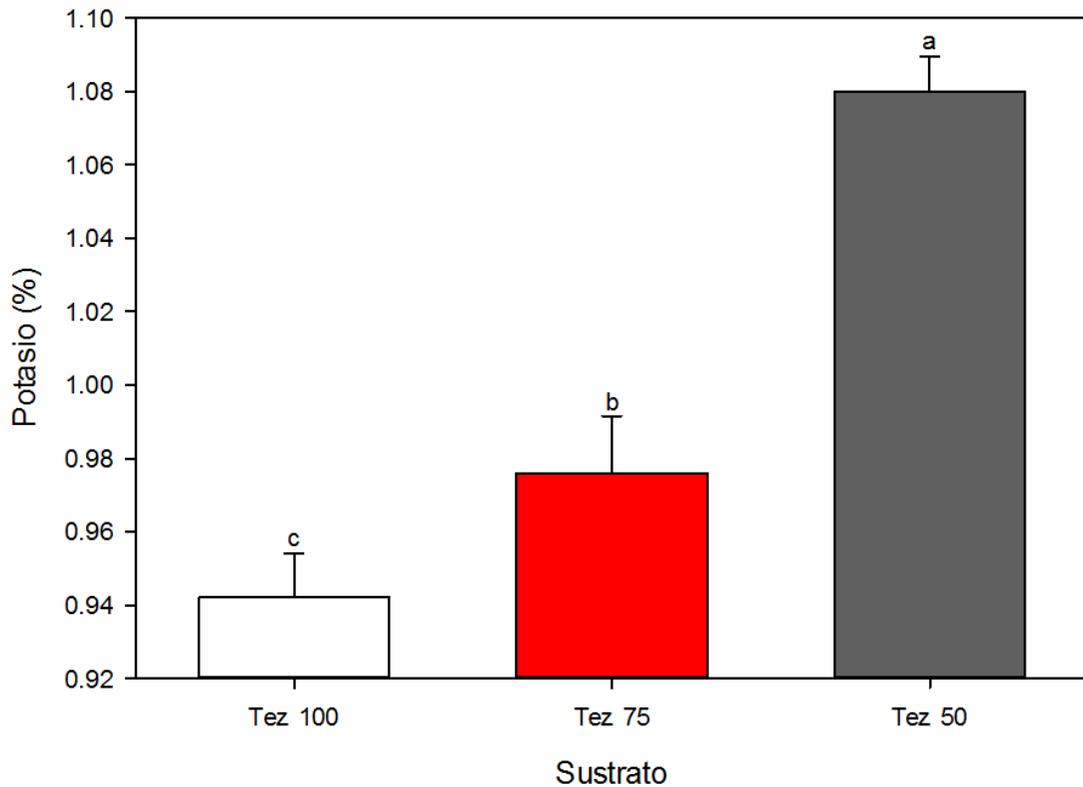


Figura 38. Concentración de potasio en plantas de fresa cultivadas en tres sustratos bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.

Tez 100: tezontle 100 %, Tez 75: tezontle 3:1 turba y Tez 50: tezontle 1:1 turba. Cada valor es el promedio de tres niveles del tubo y tres cultivares.

Una mayor concentración de potasio se obtuvo en las plantas de la zona baja después las del nivel medio presentaron y finalmente las plantas del nivel alto (Figura 39).

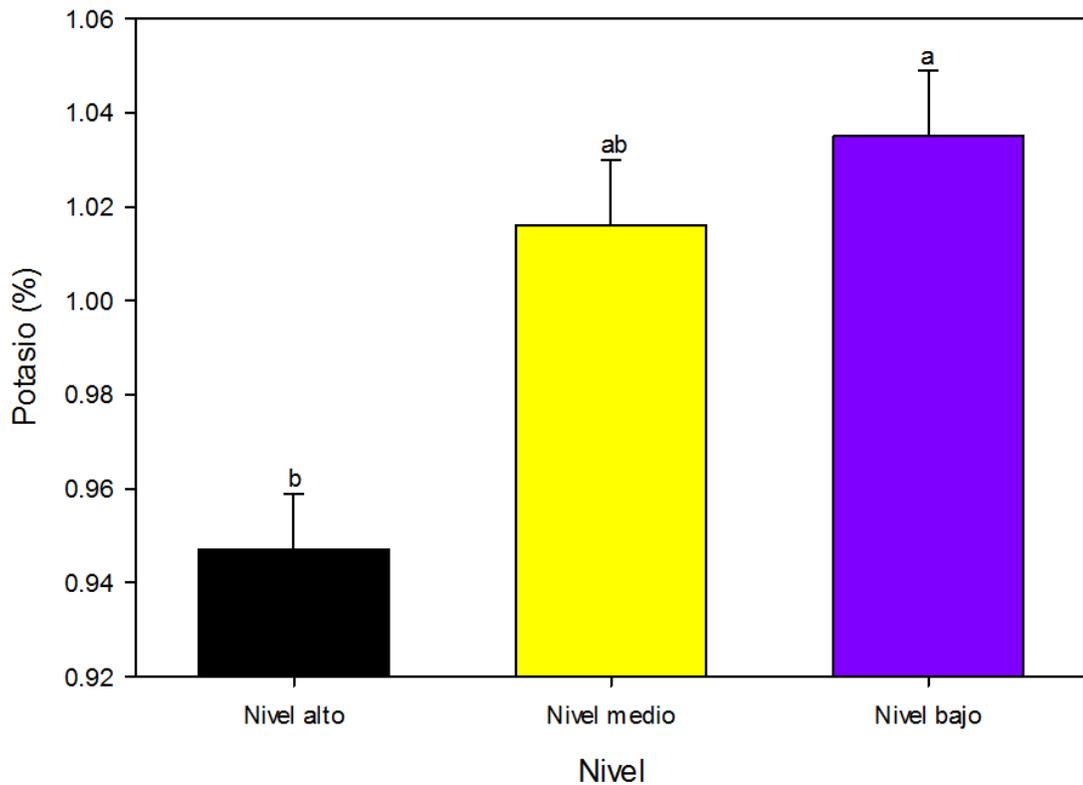


Figura 39. Concentración de potasio en plantas de fresa cultivadas en tres diferentes niveles del tubo bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.

Nivel alto: 160 – 130 cm, Nivel medio: 110 – 80 cm, Nivel bajo: 60 – 30 cm. Cada valor es el promedio de sustratos y tres cultivares.

Las plantas de 'Monterey' presentaron una mayor concentración de potasio seguida por la de 'Camino Real' y 'Festival' (Figura 40).

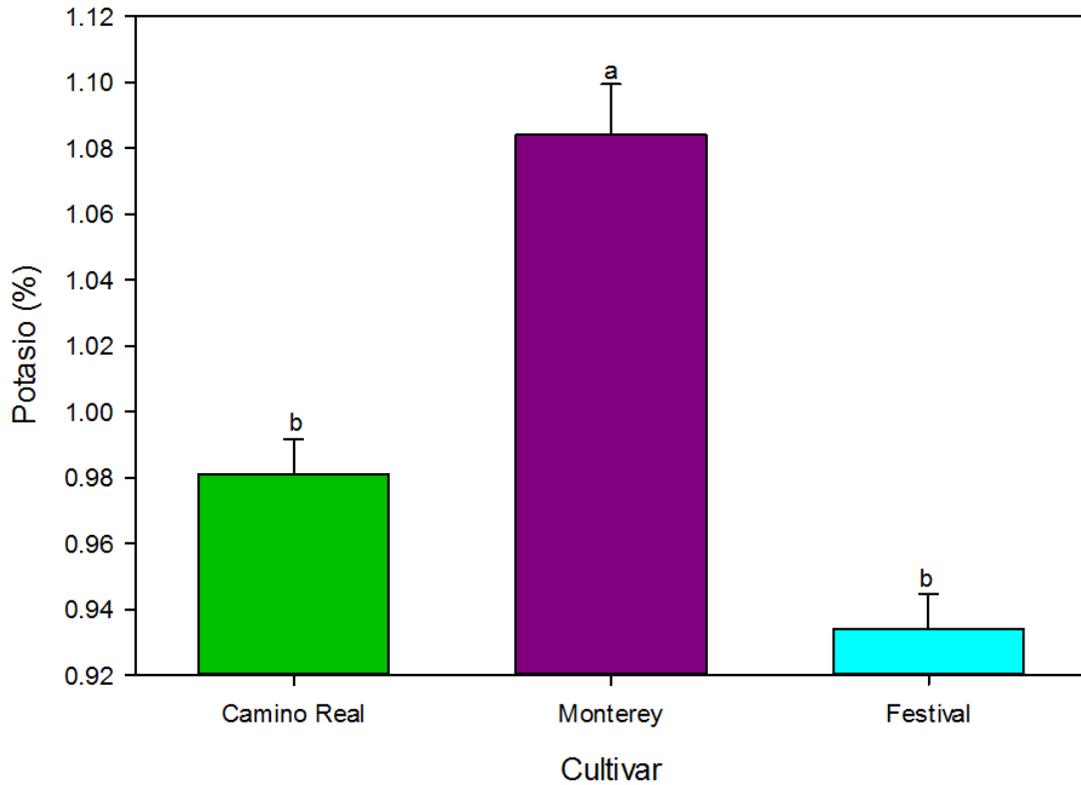


Figura 40. Concentración de potasio en plantas de fresa de tres cultivares bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.

Cada valor es el promedio de los tres sustratos y tres niveles del tubo.

Calcio. En el caso del calcio no existieron diferencias estadísticamente significativas para ninguno de los factores o interacciones. (Cuadro 18A).

Magnesio. La concentración de magnesio en las plantas que crecieron en el Tez 75 y Tez 50 fue estadísticamente igual mientras que las plantas del sustrato Tez 100 presentaron la menor concentración (Figura 41).

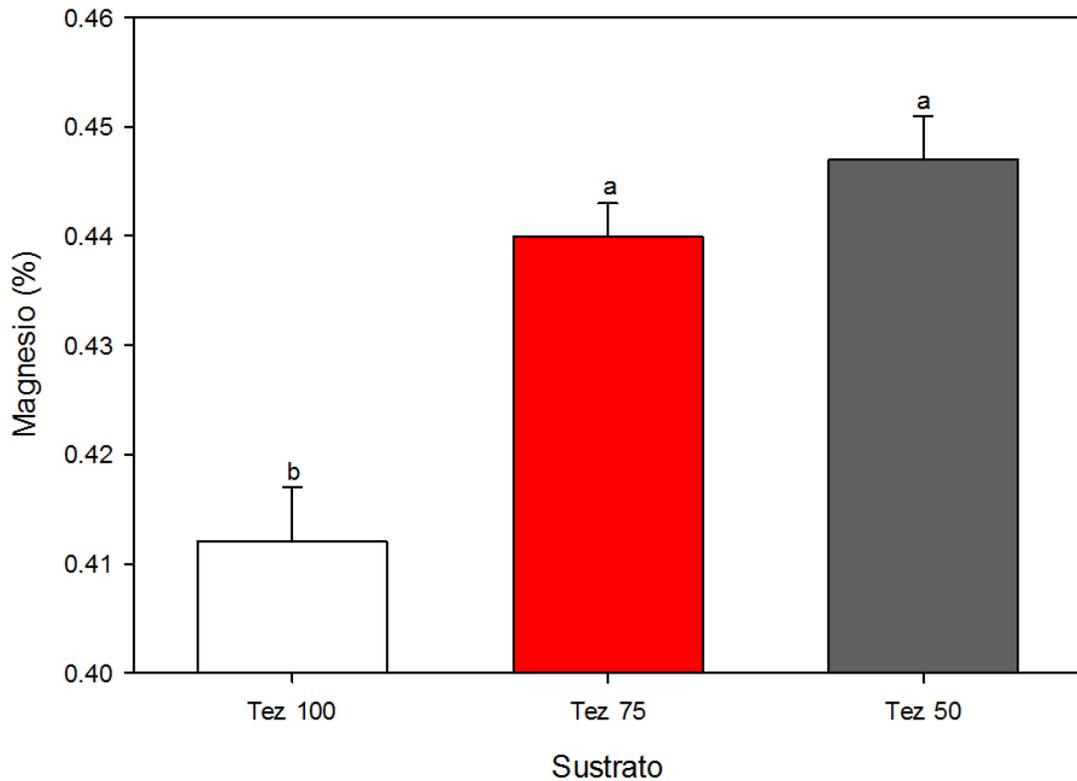


Figura 41. Concentración de magnesio en plantas de fresa cultivadas en tres sustratos bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.

Tez 100: tezontle 100 %, Tez 75: tezontle 3:1 turba y Tez 50: tezontle 1:1 turba. Cada valor es el promedio de tres niveles del tubo y tres cultivares.

La concentración de magnesio en las plantas de los cultivares Camino Real y Monterey fueron estadísticamente iguales, en tanto que el menor valor fue el de las del cultivar Festival (Figura 42).

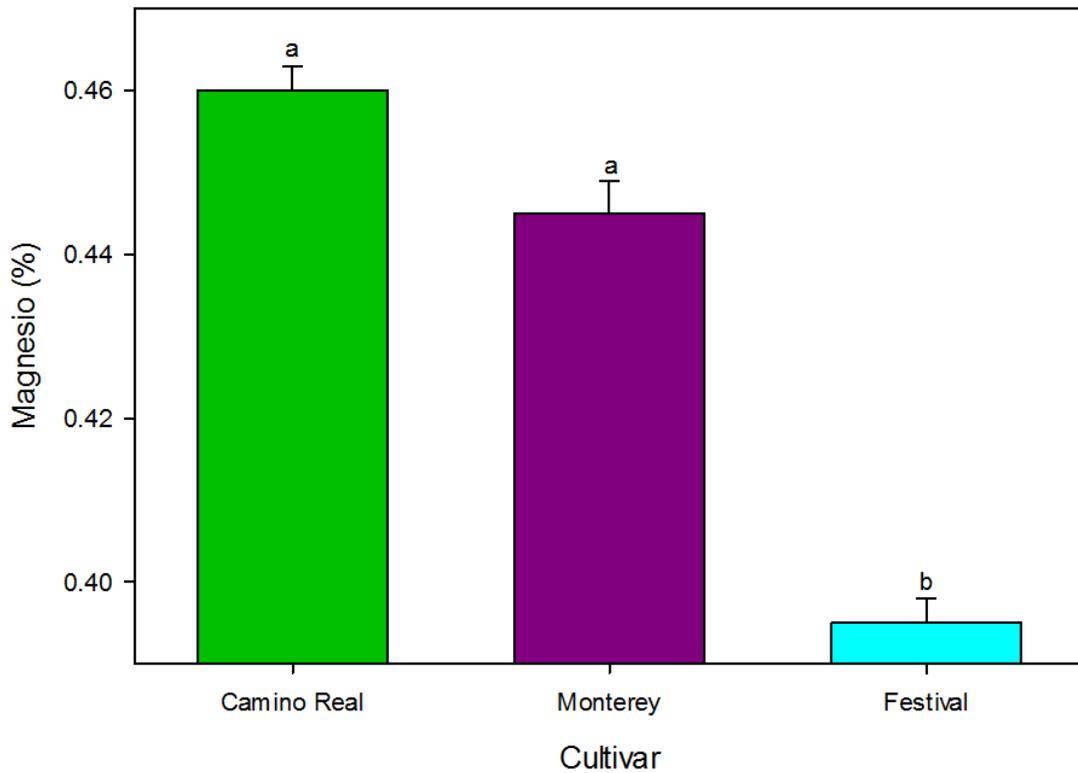


Figura 42. Concentración de magnesio en plantas de fresa de tres cultivares bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.

Cada valor es el promedio de tres sustratos y tres niveles del tubo.

Sodio. La concentración de este elemento no tuvo efecto significativo por el tipo de sustrato. En relación al factor nivel se observó una tendencia de aumento de la concentración en las plantas, conforme se baja de nivel en el tubo (Figura 43).

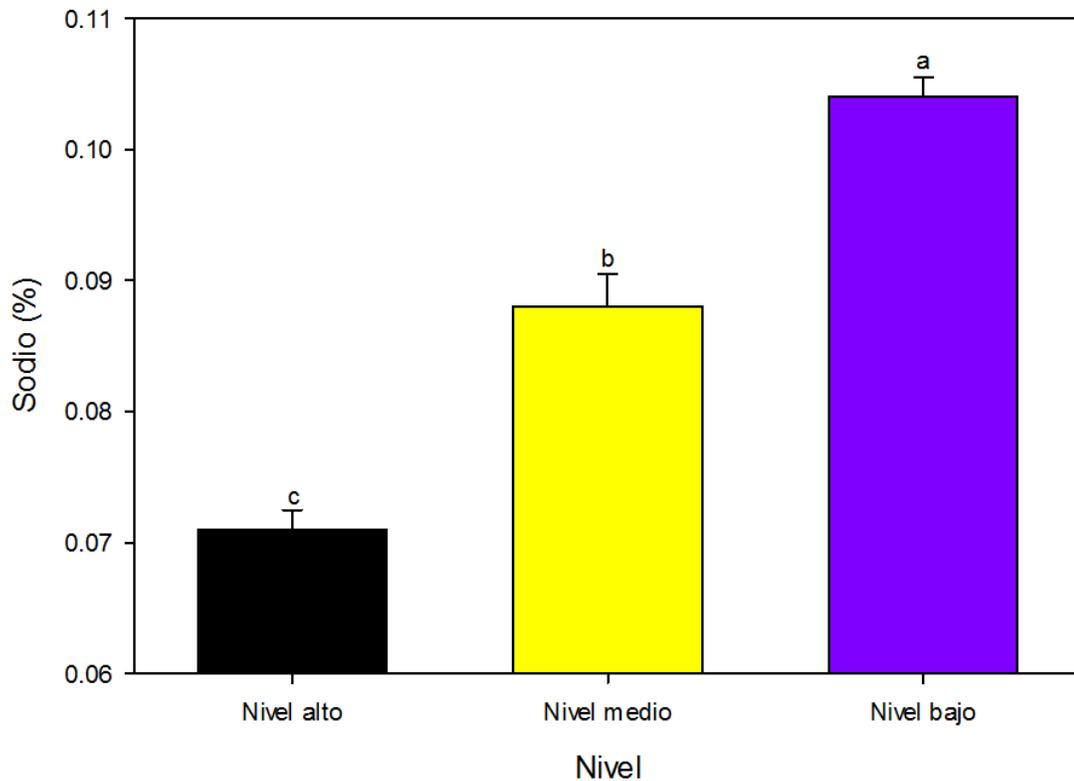


Figura 43. Concentración de sodio en plantas de fresa cultivadas en tres diferentes niveles del tubo bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.

Nivel alto: 160 – 130 cm, Nivel medio: 110 – 80 cm, Nivel bajo: 60 – 30 cm. Cada valor es el promedio de tres sustratos y tres cultivares.

La mayor concentración de sodio se registró en las plantas del cultivar Camino Real seguida de las concentraciones de las plantas de 'Monterey' y 'Festival' (Figura 44).

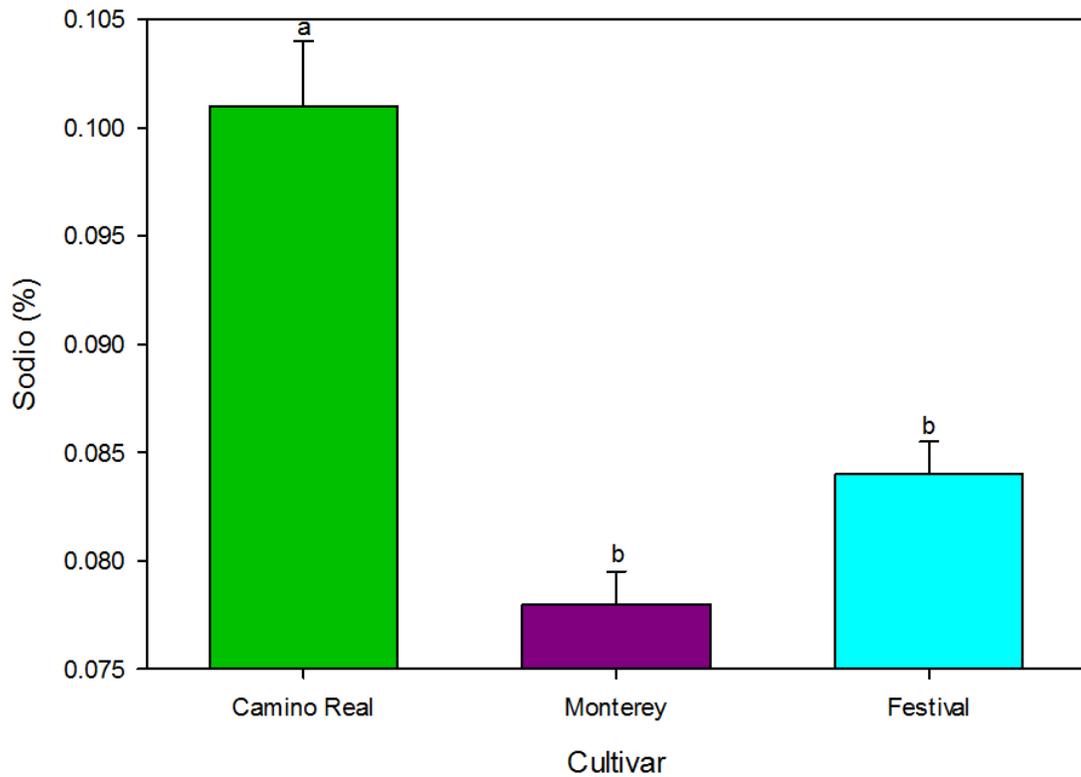


Figura 44. Concentración de sodio en plantas de fresa de tres cultivares bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.

Cada valor es el promedio de tres sustratos y tres niveles del tubo.

5.5 Características del fruto

5.5.1 Caracterización química del fruto

El análisis de varianza realizado para la caracterización química del fruto, mostró que hubo efecto de sustrato para el pH y acidez titulable y la relación sólidos solubles totales/acidez titulable (SST/AT), el cultivar sólo tuvo influencia en la firmeza del fruto; también se encontró interacción entre el sustrato y cultivar (Cuadro 19 A).

pH del fruto. Los frutos de las plantas que crecieron en el Tez 50 presentaron el mayor valor de pH, los frutos de Tez 100 y Tez 75 tuvieron valores menores (Cuadro 12).

Acidez titulable. Esta fue mayor en los frutos de las plantas que crecieron en Tez 100 con valor semejante a la de los frutos de Tez 75; los frutos de las plantas de Tez 50 presentaron el menor valor (Cuadro 12).

Firmeza. Los frutos de las plantas de 'Festival' presentaron la mayor firmeza, seguido por los de 'Monterey' y con el valor más bajo los frutos del cultivar Camino Real (Cuadro 12).

Se encontró significancia estadística para la interacción sustrato por cultivar, la firmeza de los frutos de los cultivares Camino Real y Festival no presentaron

diferencias entre los tres sustratos; en tanto que los frutos del cultivar Monterey presentaron más firmeza con el sustrato Tez 50, pero sin diferencia estadística con la obtenida en el Tez 75, la menor firmeza se registró con el Tez 100 (Cuadro 11).

Cuadro 11. Firmeza de fruto (lb) en los diferentes sustratos de tres cultivares de fresa en cultivo hidropónico vertical.

Sustrato	Camino Real	Cultivar	
		Monterey	Festival
Tez 100	224.80±6.74	202.32±11.24 b ^z	298.98±11.24
Tez 75	229.30±9.00	260.77±20.23 a	254.02±13.49
Tez 50	233.80±11.24	281.00±13.49 a	263.02±22.48
DMS	31.472	44.96	56.2
CV	13.06	17.85	20.07

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación, Tez 100: Tezontle 100%, Tez 75: Tezontle 3:1 Turba, Tez 50: Tezontle 1:1 Turba.

Contenido de sólidos solubles totales. El sustrato y el cultivar no afectaron significativamente el contenido de sólidos solubles totales en los frutos (Cuadro 12).

Relación sólidos solubles:acidez titulable. Esta relación mostró efecto del sustrato, de tal forma que los frutos obtenidos de las plantas en el Tez 50 presentaron la mayor relación, los de los otros dos sustratos no presentaron diferencias estadísticas entre ellos. Para el caso del factor cultivar, éste no tuvo efecto en la relación (Cuadro 12).

Cuadro 12. Resultados de pH de fruto, acidez titulable, firmeza, sólidos solubles totales, relación sólidos solubles totales /acidez titulable en frutos de tres cultivares de fresa.

pH de fruto					
Sustrato	Tez 100	2.25±0.02 b	Cultivar	Camino Real	2.28±0.03
	Tez 75	2.26±0.02 b		Monterey	2.34±0.02
	Tez 50	2.38±0.03 a ^z		Festival	2.27±0.03
	DMS	0.08			0.08
	CV	6.23			6.23
Acidez titulable (%)					
Sustrato	Tez 100	0.76±0.02 a	Cultivar	Camino Real	0.72±0.02
	Tez 75	0.74±0.02 a		Monterey	0.70±0.03
	Tez 50	0.67±0.02 b		Festival	0.73±0.02
	DMS	0.07			-
	CV	16.26			16.26
Firmeza (lbf)					
Sustrato	Tez 100	242.78±9.00	Cultivar	Camino Real	229.30±6.74 b
	Tez 75	247.28±9.00		Monterey	247.28±9.00 ab
	Tez 50	260.77±9.00		Festival	272.01±9.00 a
	DMS	-			24.73
	CV	17.85			17.85
Sólidos solubles totales (°Brix)					
Sustrato	Tez 100	7.46±0.12	Cultivar	Monterey	7.49±0.12
	Tez 50	7.28±0.12		Festival	7.32±0.12
	Tez 75	7.25±0.13		Camino Real	7.17±0.11
	DMS	-			-
	CV	10.21			10.21
Sólidos solubles totales /Acidez titulable					
Sustrato	Tez 100	10.04±0.33 b	Cultivar	Camino Real	10.01±0.29
	Tez 75	10.19±0.41 b		Monterey	11.27±0.50
	Tez 50	11.33±0.43 a		Festival	10.28±0.36
	DMS	1.29			-
	CV	21.90			21.90

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación, Tez 100: Tezontle 100 %, Tez 75: Tezontle 3:1 Turba, Tez 50: Tezontle 1:1 Turba.

5.6 Número de frutos y rendimiento por corte·planta⁻¹, número de frutos totales·planta⁻¹, rendimiento total·planta⁻¹ (g) y peso del fruto (g)

Número de frutos por corte·planta⁻¹. Se presentó un aumento generalizado gradual para todos los factores involucrados (sustrato, nivel y cultivar) el primer corte fue el 15 de abril y el último el 21 de mayo, en éste último fue en donde se presentó el mayor número de frutos. Se presentó el mayor número de frutos en todos los cortes en las plantas en el Tez 100, seguido por las del Tez 75, y finalmente las del Tez 50 (Figura 45).

Las plantas del nivel medio y alto del tubo produjeron casi el mismo número de frutos por corte; sin embargo, al final del ciclo se obtuvo una mínima diferencia de 0.2 frutos·planta⁻¹, siendo mayor el nivel medio (6.0 frutos·planta⁻¹) y el alto de 5.8 frutos·planta⁻¹, seguido al final del nivel bajo con 4.2 frutos·planta⁻¹, (Figura 46).

En cuanto al cultivar, las plantas de 'Festival' produjeron un mayor número de frutos en todos los cortes, las de 'Camino Real' y 'Monterey' produjeron un total de 4.8 y 4.7 frutos·planta⁻¹ respectivamente; sin embargo, al inicio de los cortes las plantas de 'Camino Real' produjeron un mayor número de frutos, pero en el último corte las de 'Monterey' y 'Festival' presentaron el mayor número (Figura 47).

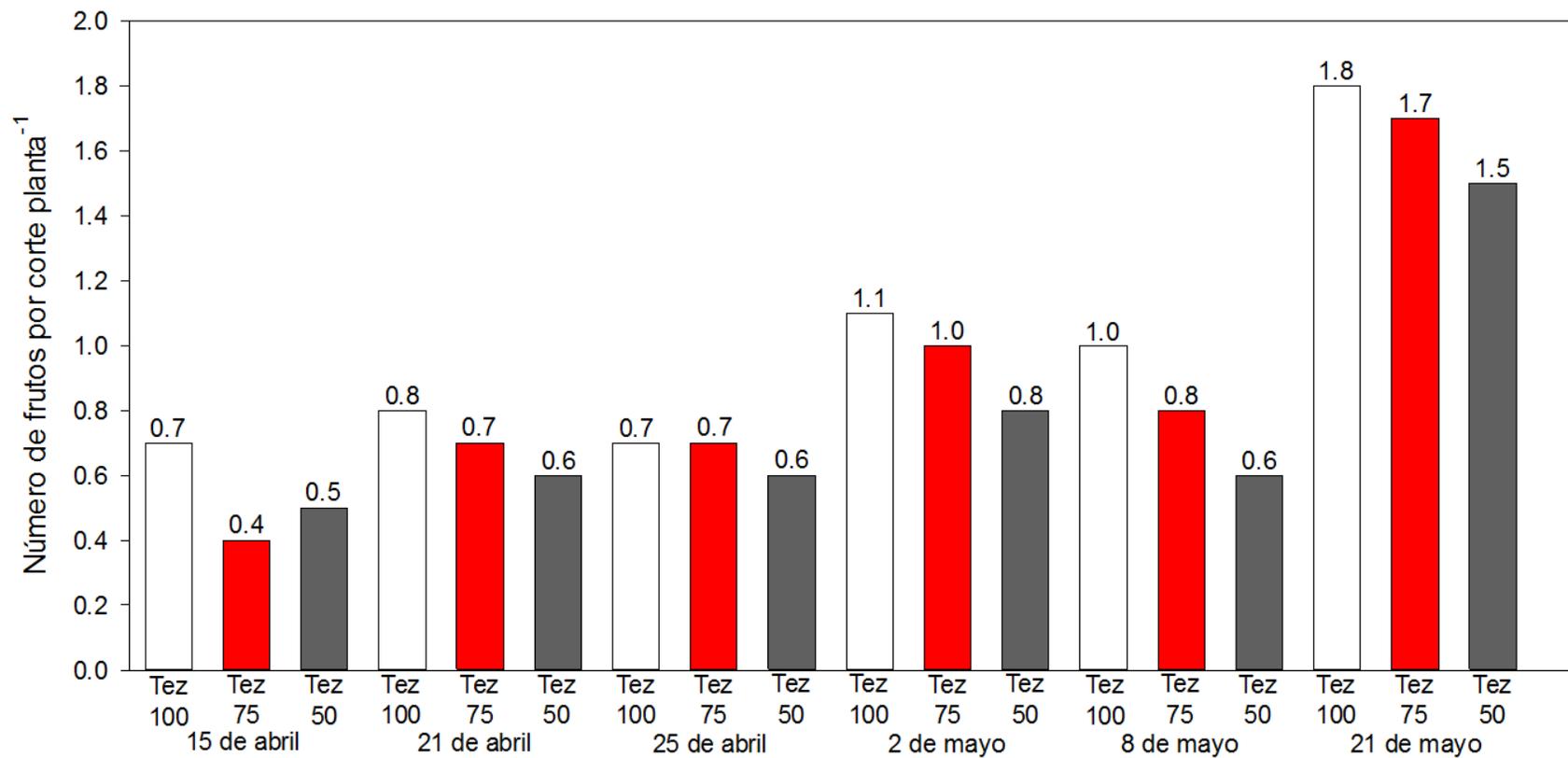


Figura 45. Número de frutos por corte-planta⁻¹ en los diferentes sustratos utilizados en el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

Tez 100: tezontle 100 %, Tez 75: tezontle 3:1 turba y Tez 50: tezontle 1:1 turba. Cada valor es el promedio de tres niveles del tubo y tres cultivares.

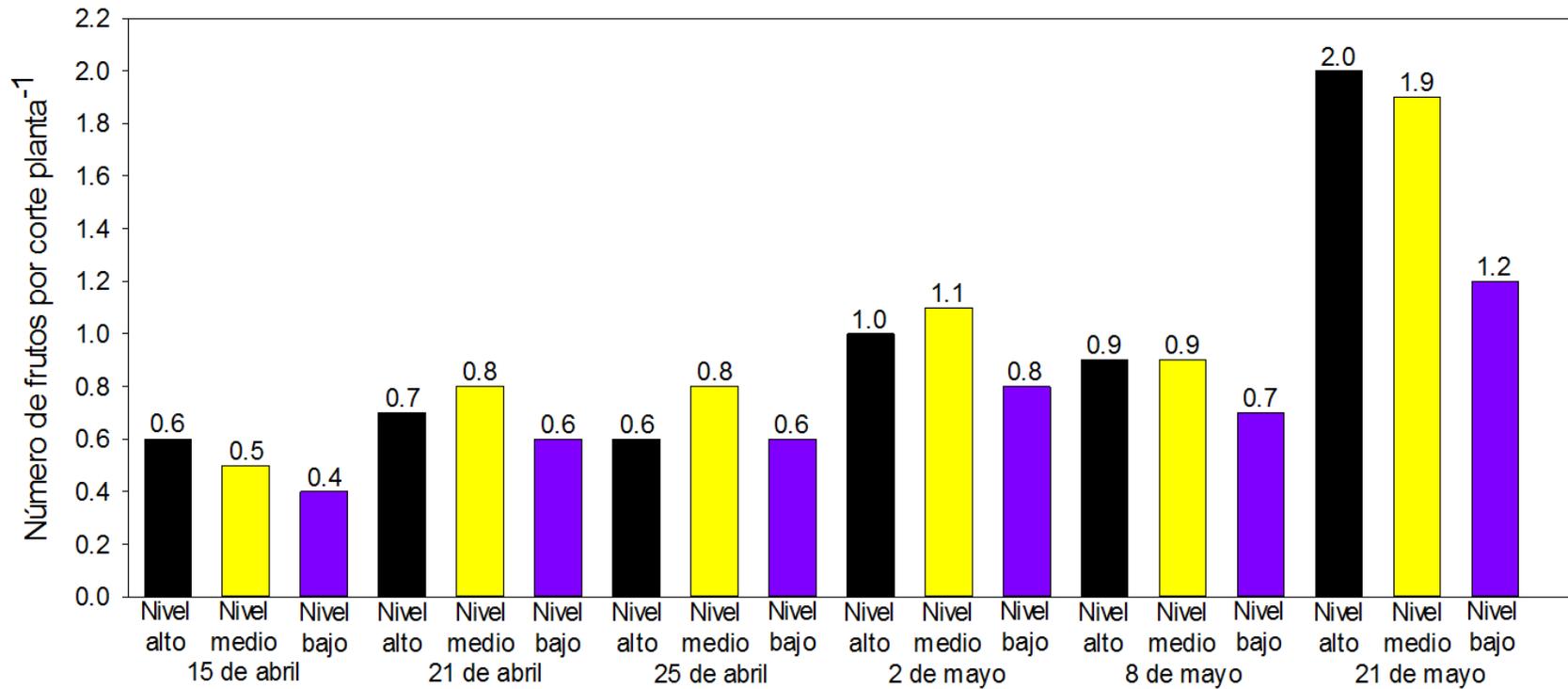


Figura 46. Número de frutos por corte-planta⁻¹ en los diferentes niveles del tubo del cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

Nivel alto: 160 – 130 cm, Nivel medio: 110 – 80 cm, Nivel bajo: 60 – 30 cm. Cada valor es el promedio de tres sustratos y tres cultivares.

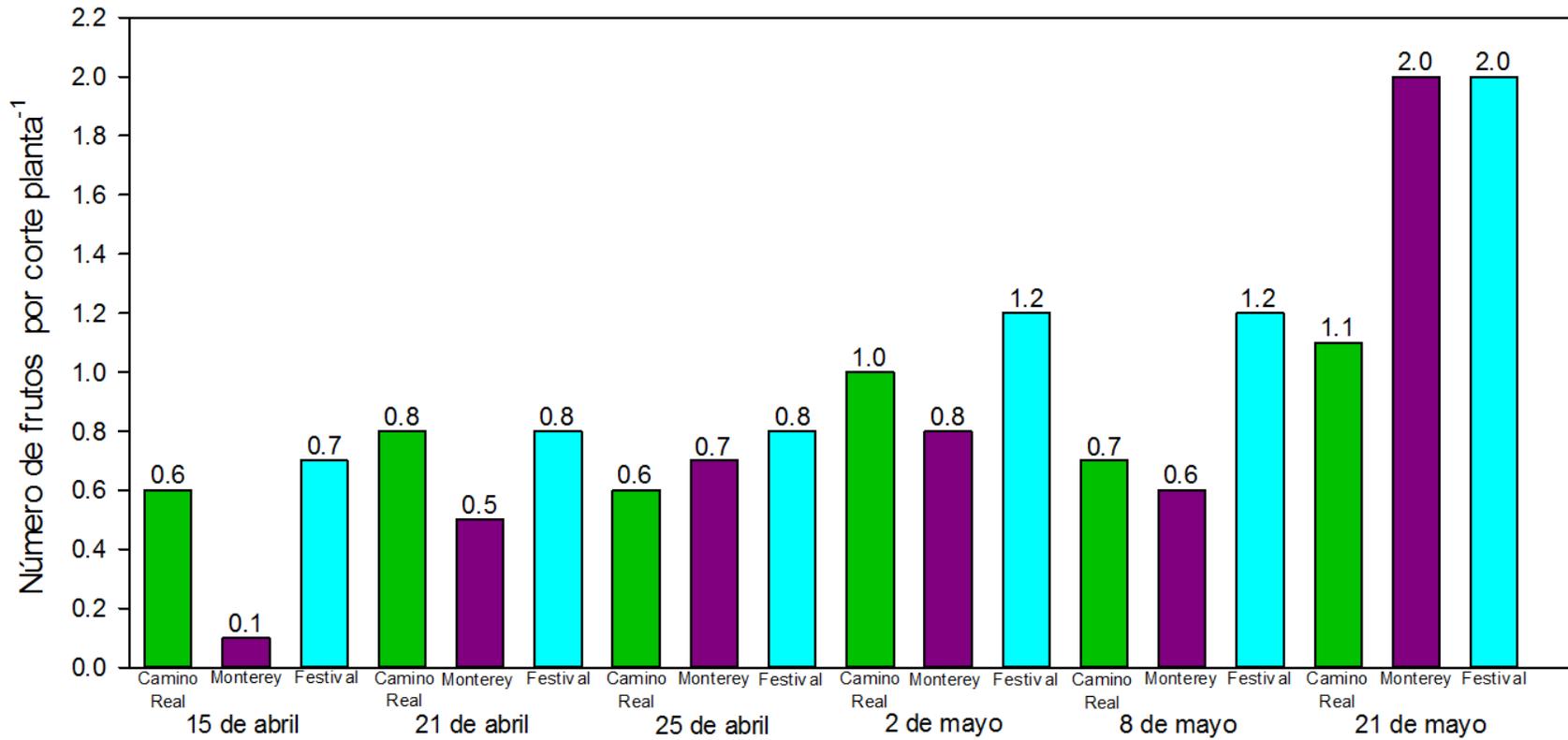


Figura 47. Número de frutos por corte-planta⁻¹ de los tres cultivares de fresa bajo condiciones de cultivo

hidropónico vertical.

Cada valor es el promedio de tres sustratos y tres niveles del tubo.

Número total de frutos·planta⁻¹.

Las plantas del nivel alto y medio del tubo presentaron el mayor número de frutos. En tanto que en el nivel bajo presentó el menor valor (Figura 48).

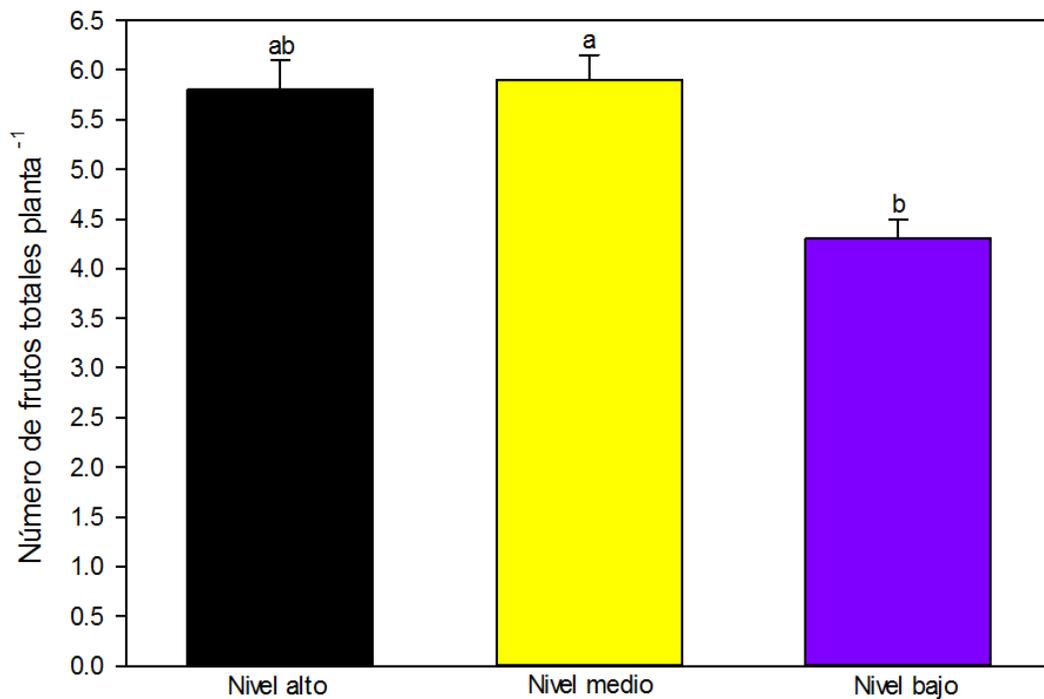


Figura 48. Número de frutos totales·planta⁻¹ en los diferentes niveles del tubo del cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

Nivel alto: 160 – 130 cm, Nivel medio: 110 – 80 cm, Nivel bajo: 60 – 30 cm. Cada valor es el promedio de tres sustratos y tres cultivares.

Las plantas del cultivar Festival presentaron el mayor número de frutos por planta en tanto que los cultivares Camino Real y Monterey produjeron el mismo número (Figura 49).

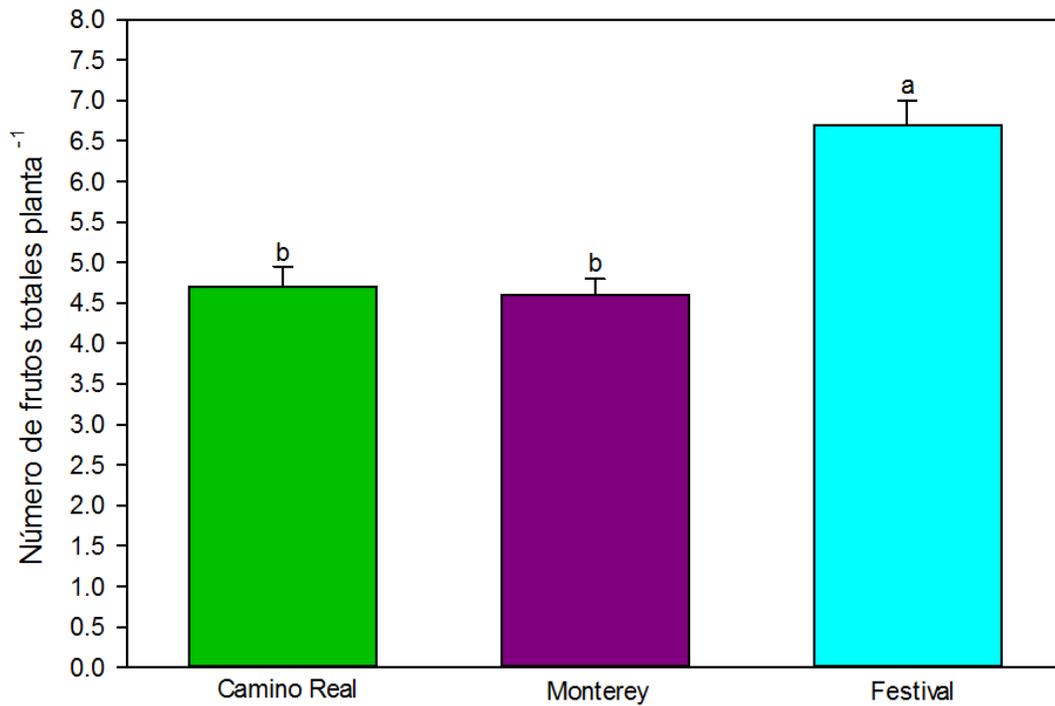


Figura 49. Número de frutos totales-planta⁻¹ de los tres cultivares de fresa bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.

Cada valor es el promedio de tres sustratos y tres niveles del tubo.

El tipo de sustrato no afectó significativamente el número de frutos totales por planta (Figura 50).

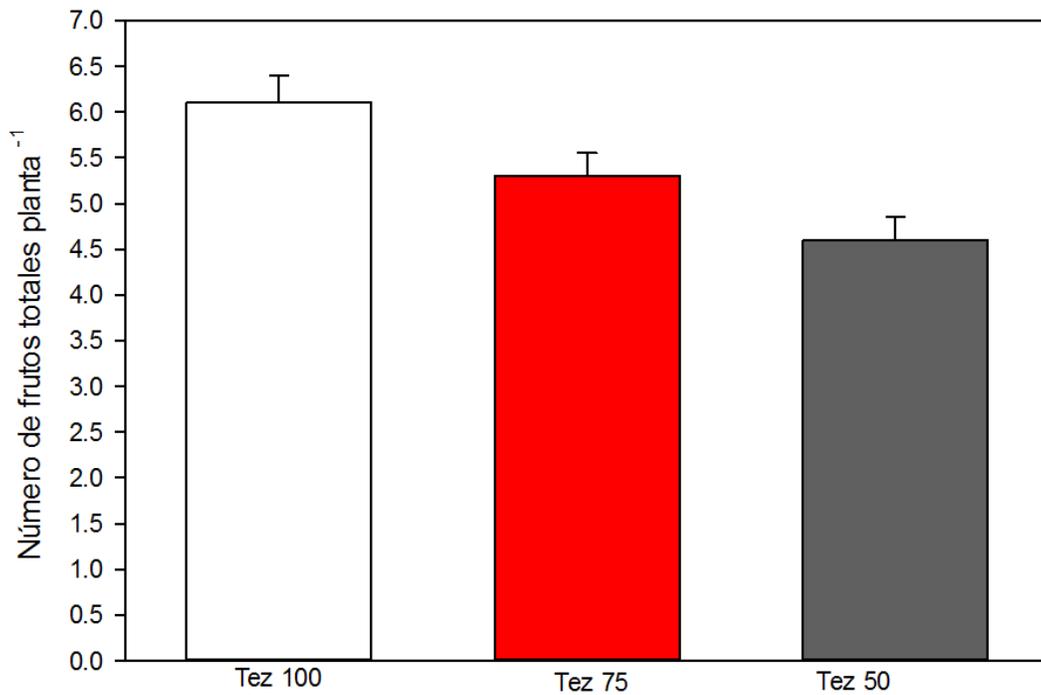


Figura 50. Número de frutos totales·planta⁻¹ en los tres sustratos de fresa bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.

Tez 100: tezontle 100 %, Tez 75: tezontle 3:1 turba y Tez 50: tezontle 1:1 turba. Cada valor es el promedio de tres niveles del tubo y tres cultivares.

Se observó una interacción significativa entre sustrato y nivel del tubo, de tal forma que en el nivel alto se presentaron diferencias con los tres sustratos; con el sustrato Tez 100 se presentó el mayor número de frutos totales·planta⁻¹, seguido por el sustrato Tez 75 y finalmente con el menor número de frutos en el sustrato Tez 50 (Cuadro 13).

Cuadro 13. Número de frutos totales·planta⁻¹ de los tres sustratos de fresa y niveles del tubo bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.

Sustrato	Nivel alto	Nivel medio	Nivel bajo
Tez 100	7.2±0.8 a ^z	7.4±0.8	3.8±0.9
Tez 75	6.7±0.9 ab	5.5±0.8	3.6±0.5
Tez 50	3.5±1.2 b	4.9±0.8	5.4±0.7
DMS	3.5	2.5	2.6
CV	50.67	35.87	51.50

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación, Tez 100: Tezontle 100%, Tez 75: Tezontle 3:1 Turba v/v, Tez 50: Tezontle 1:1 Turba v/v.

Rendimiento total por planta (g).

Las plantas que crecieron en el sustrato Tez 100 presentaron el mayor rendimiento, seguido por el de las plantas del Tez 75, y con el valor más bajo el rendimiento de las plantas del Tez 50 (Figura 51).

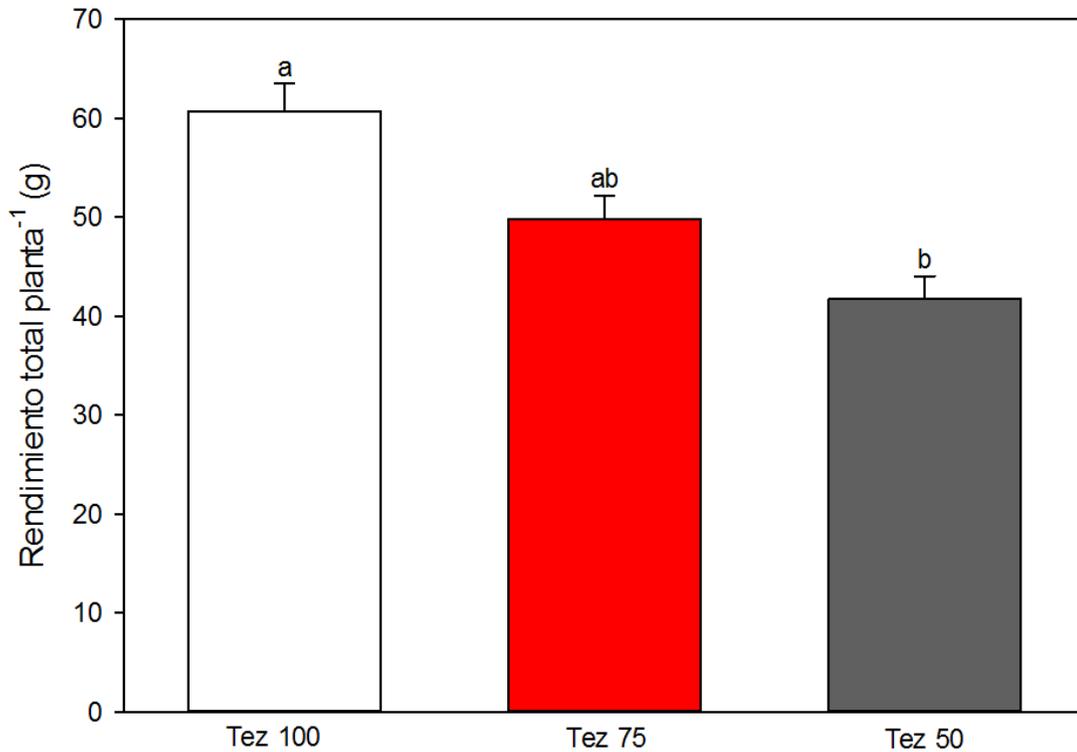


Figura 51. Rendimiento total-planta⁻¹ en los tres sustratos utilizados en el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

Tez 100: tezontle 100%, Tez 75: tezontle 3:1 turba y Tez 50: tezontle 1:1 turba. Cada valor es el promedio de tres niveles del tubo y tres cultivares.

Los resultados del rendimiento total por planta en relación al factor nivel del tubo fueron estadísticamente diferentes. En el nivel medio del tubo se presentó el mayor rendimiento por planta, seguidas por las de nivel alto y el nivel bajo. Entre el nivel alto y medio existió una diferencia de 5.0 g por planta y en el caso del nivel bajo con el nivel medio ésta fue de 17.5 g·planta⁻¹ (Figura 52).

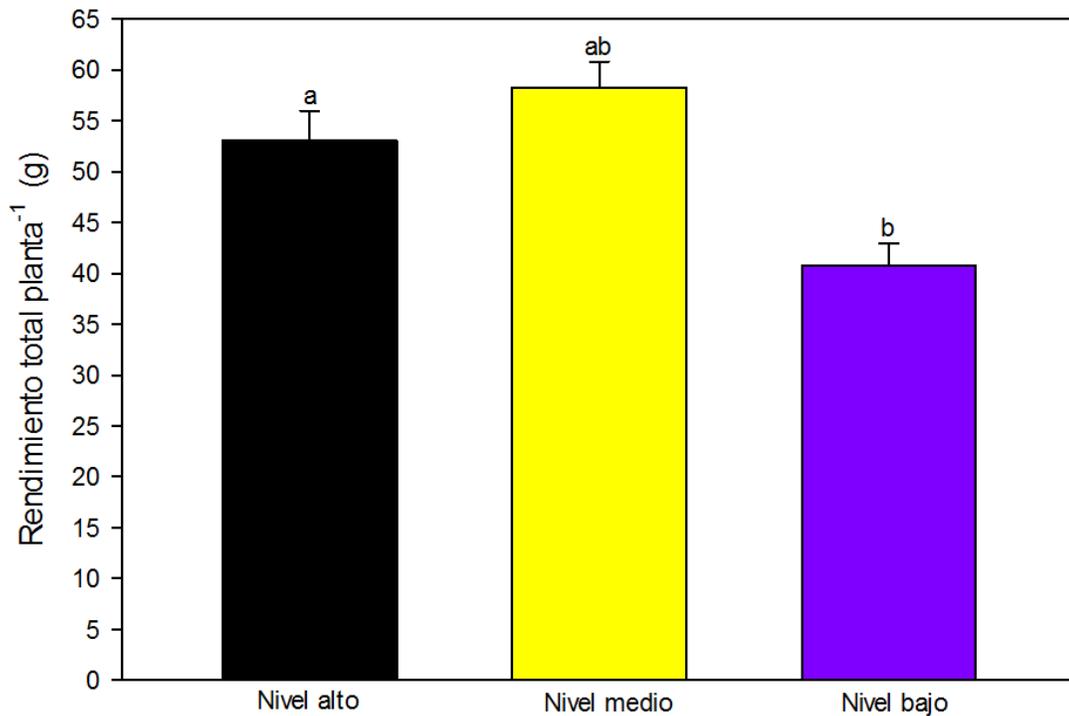


Figura 52. Rendimiento total·planta⁻¹ en los diferentes niveles del tubo del cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

Nivel alto: 160 – 130 cm, Nivel medio: 110 – 80 cm, Nivel bajo: 60 – 30 cm. Cada valor es el promedio de tres sustratos y tres cultivares.

Las plantas del cultivar Festival presentaron el mayor rendimiento total por planta, el segundo lugar lo ocupó el cultivar Monterey y en último lugar el 'Camino Real' con (Figura 53).

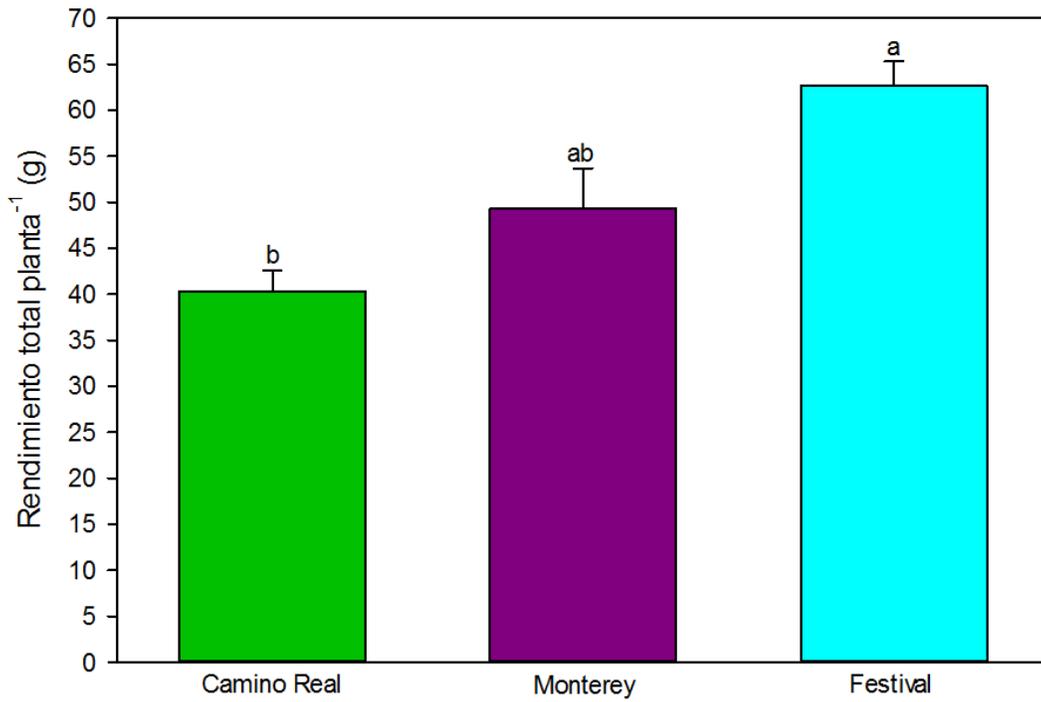


Figura 53. Rendimiento total·planta⁻¹ de los tres cultivares de fresa bajo condiciones de cultivo hidropónico vertical.

Cada valor es el promedio de tres sustratos y tres niveles del tubo.

Existió una interacción significativa entre los sustratos utilizados y nivel del tubo en el rendimiento total·planta⁻¹; el nivel alto presentó el mayor rendimiento con el sustrato Tez 100, seguido por el Tez 75 y con el menor rendimiento con el Tez 50 en el mismo nivel. En el nivel medio existió la misma tendencia que en el nivel alto (Cuadro 14).

Cuadro 14. Rendimiento total·planta⁻¹ de los tres sustratos por nivel del tubo del cultivo hidropónico vertical de fresa.

Sustrato	Nivel alto	Nivel medio	Nivel bajo
Tez 100	65.6±7.5 a ^z	75.4±8.6 a	41.0±10.3
Tez 75	62.8±7.6 ab	53.7±8.2 ab	33.0±4.9
Tez 50	30.9±10.8 b	45.9±6.9 b	48.4±5.1
DMS	32.0	26.7	26.3
CV	50.84	38.66	54.47

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación, Tez 100: Tezontle 100%, Tez 75: Tezontle 3:1 Turba, Tez 50: Tezontle 1:1 Turba.

Peso del fruto.

Los frutos del cultivar Monterey presentaron el mayor peso, seguido de los cultivares Festival y Camino Real con resultados similares de (Cuadro 15).

Cuadro 15. Número de frutos totales·planta⁻¹, Rendimiento total·planta⁻¹ y Peso de fruto total·planta⁻¹ obtenido en la producción hidropónica vertical de fresa.

	Número de frutos totales·planta ⁻¹	Rendimiento total·planta ⁻¹ (g)	Peso de fruto total·planta ⁻¹ (g)
Tez 100	6.1±0.6	60.7±5.7 a	9.6±0.5
Tez 75	5.3±0.5	49.8±4.6 ab	9.5±0.4
Tez 50	4.6±0.5	41.7±4.7 b	8.5±0.7
DMS	-	15.5	1.6
CV	44.10	46.04	26.03
Nivel alto	5.8±0.6 ab	53.1±5.8 ab	9.6±0.7
Nivel medio	5.9±0.5 a ^z	58.3±5.0 a	9.8±0.3
Nivel bajo	4.3±0.4 b	40.8±4.2 b	9.2±0.5
DMS	1.5	15.5	1.6
CV	44.10	46.04	26.03
Camino Real	4.7±0.5 b	40.3±4.6 b	8.1±0.5 b
Monterey	4.6±0.4 b	49.3±4.7 ab	10.7±0.5 a ^z
Festival	6.7±0.6 a	62.6±5.4 a	8.9±0.5 b
DMS	1.5	15.5	1.6
CV	44.10	46.04	26.03

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05. DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación, N: Frutos sin clasificar, Tez 100: Tezontle 100%, Tez 75: Tezontle 3:1 Turba, Tez 50: Tezontle 1:1 Turba.

Correlaciones.

Las correlaciones de Pearson para los factores sustrato, nivel y cultivar, entre las variables analizadas muestran una única asociación positiva entre el rendimiento total planta⁻¹ y número de frutos totales de 0.93 con una significancia estadística <0.01 %.

6. DISCUSIÓN

Temperatura del sustrato.

La temperatura de la zona de raíz presentó una mayor temperatura en el Tez 100 (Figura 5) seguido y siendo casi iguales los sustratos que contenían turba, esto posiblemente debido a las propiedades inherentes de inercia térmica de cada componente de sustrato, siendo el tezontle un sustrato con la capacidad de absorber y perder más rápido el calor del ambiente, en comparación con la turba que posee esta característica también pero menos acentuada, además de que el tezontle tiene una menor capacidad para retener el agua y siendo esta un amortiguador a cambios en la temperatura (Baixauli y Aguilar 2002). La temperatura de un sustrato es un factor importante que en algunas investigaciones que en ocasiones no se toma en cuenta. Como Baixauli y Aguilar (2002) describen, en un sustrato se da una menor inercia térmica que en el suelo y los cultivos están más expuestos a los posibles cambios de temperatura ambiental. Existen diversas investigaciones fisiológicas y bioquímicas donde se demuestran los efectos adversos de las altas y bajas temperaturas de sustrato (Barker y Pilbeam, 2007). Finalmente una disminución de crecimiento y otras alteraciones de nutrición pueden aparecer si la temperatura de la raíz se mantiene por arriba ó por debajo de la temperatura recomendada, para la mayoría de los cultivos comerciales es que sea no mayor a 30 °C (Jones, 2005; Kafkafi, 2008).

Hancock (1999) afirma que las altas temperaturas de sustrato afectan el crecimiento debido a la inducción en la disminución de conductancia estomática y transpiración generando en consecuencia una disminución en la fotosíntesis.

La mayor temperatura en el nivel más alto de los tubos es debido a que estos se encuentran expuestos por más tiempo y de manera directa a la radiación solar (Figura 6). Ramírez (2011) reporta una diferencia de 12 a 19 °C entre el nivel más alto y el más bajo en cultivos verticales, lo cual resulta mucho mayor a lo obtenido en el presente estudio; lo anterior puede ser debido a la capacidad de aislamiento térmico y grosor de los contenedores de poliestireno empleados en su estudio, en comparación con el polietileno utilizado en este experimento; sin embargo el factor hora es donde se apreciaron diferencias de temperatura de 15 a 20 °C (Figura 7). Paraskevopoulou-Paroussi *et al.* (1995) llevaron a cabo un experimento de cultivo vertical en bolsas de polietileno de 2 m de altura y 16 cm de diámetro encontrando una temperatura de sustrato durante el día de 14 a 22 °C de la mitad hacia la parte alta y de 11 a 19 °C de la mitad a la parte baja. Marfa *et al.* (1986) probaron que la diferencia de temperaturas del sustrato entre las diferentes alturas se ubicó entre 15.1 y 17.4 °C en cultivo vertical de *Philodendron scandens*.

Intensidad luminosa en el microambiente de las hojas

En los niveles altos del tubo la intensidad fue mayor y la más baja se registró en el nivel inferior, siendo a las 7:00 horas cuando se presentó la menor intensidad; con pocas excepciones la mayor intensidad se presentó a las 13:00

h. La intensidad luminosa afecta la tasa de asimilación de CO₂ en la fotosíntesis (Cuadro 8A).

Los niveles de intensidad luminosa obtenidos son muy bajos; Hancock (1999) expone que diversos factores tienen un efecto significativo en la tasa de asimilación de CO₂, los cuales incluyen: intensidad luminosa, temperatura, nutrición, desarrollo, manejo y método de propagación. Sin embargo, mayores niveles de luz se traducen en una mayor tasa de asimilación de CO₂. El punto de saturación de la fresa se encuentra entre 800 a 1200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (405.5 a 608.25 $\text{watts}\cdot\text{m}^{-2}$) (Hancock, 1999; Jones, 2005), la cual no se alcanzó en ninguno de los factores analizados en el experimento, presentándose de 5 a 12 veces menos que este intervalo (Cuadro 6A, 7A, 8A). Algunos estudios reportan resultados con tendencias similares a las observadas; Ramírez (2011) indica que la irradiancia fotosintética fue mayor en el estrato superior, los mismos que Anagnostou y Vasilakakis (1995), aunque estos últimos señalan que una baja intensidad luminosa en la parte superior produjo un bajo rendimiento. En otro experimento realizado por Daugovish y Larson, (2009), la intensidad luminosa a diferentes horas y a nivel alto, medio y bajo presentaron la misma tendencia que en los anteriores experimentos. Lo anterior permite suponer que la fresa en un sistema vertical permite una alta densidad, pero la intensidad luminosa afecta el crecimiento de las plantas en la parte baja.

Temperatura de hoja.

Se registraron las temperaturas de la hoja más altas a mayor altura en el nivel del tubo, similar a lo ocurrido con la temperatura de sustrato, lo cual ocurrió en

general a las 13:00 h (Cuadro 9A y 10A). El que las hojas no hayan alcanzado los 30 °C que se presentó en el ambiente puede deberse a que la transpiración causa un enfriamiento de las hojas, por lo que estas usualmente poseen una temperatura más baja que la del aire (Mannini y Anconelli, 1993) Este parámetro es afectado en gran medida por las condiciones ambientales, en particular la radiación solar y el déficit de presión de vapor (Mannini y Anconelli, 1993).

Jones (2005), establece además que la temperatura de la hoja afecta la tasa de fotosíntesis, respiración y crecimiento. La cantidad de agua perdida por transpiración dependerá en la diferencia de la presión de vapor entre la hoja y el aire del ambiente. Las temperaturas de la hoja y el aire impactan en la tasa de difusión de los gases, por consiguiente en las tasas de fotosíntesis y de transpiración de la hoja, las cuales disminuyen con el incremento de la temperatura al haber cierre de estomas cuando esta aumenta.

Concentración de CO₂.

Las concentraciones encontradas dentro del invernadero (Cuadro 4) se reportan por arriba de la concentración común en el aire (300 ppm) (Taiz y Zeiger, 2010). A lo largo del experimento tomando en cuenta los valores reportados, no existió ninguna tendencia de aumento respecto a los meses pero a las diferentes horas sí. Hancock (1999), expone que la mayoría de los estudios realizados para medir la tasa de asimilación fotosintética se han llevado a cabo con concentraciones de 375 ppm de CO₂; sin embargo, Jones (2005) establece que en un intervalo de 325 a 350 ppm se obtienen los mismos resultados reportados

por Hancock (1999). Las fresas responden positivamente a pequeños incrementos en la concentración de CO₂, además de existir un incremento lineal en la tasa de asimilación de CO₂ de la fotosíntesis entre 100 y 400 ppm y el efecto a largo plazo del incremento de CO₂ varía dependiendo del genotipo (Hancock, 1999).

Oxígeno disuelto y temperatura de la solución nutritiva.

Los resultados obtenidos en la concentración de O₂ disuelto y temperatura de la solución siguieron el comportamiento descrito por Urrestarazu (2004), Jones (2005) y Favela *et al.* (2008) quienes indican que a mayor temperatura menor oxígeno disuelto y viceversa. En el experimento realizado, la temperatura de la solución aumentó a partir del mes de febrero hasta mayo donde reportó su pico más alto en el último mes, siendo casi de manera inversa para el oxígeno disuelto donde numéricamente la concentración más baja fue en abril (Cuadro 12A). Los valores para ambos casos rondan de 12.1 a 25.0 °C y de 6.10 a 4.21 ppm de O₂. Las temperaturas de la solución reportadas por Geater *et al.* (1997), Chow *et al.* (2002), Economakis y Krulis (2002), Ikeda *et al.* (2007) y Yasunaga (2008) en donde se reportaron los mejores rendimientos y calidad de fruto en fresa fueron entre los 23 y 25 °C; en estudios realizados en NFT, y para el caso de la concentración de O₂ se encontró que los valores obtenidos se encontraban por arriba del límite mínimo que es de 3 a 4 ppm de O₂ (Urrestarazu, 2004). Favela *et al.* (2008) establecieron que con una concentración menor a 3 ppm de O₂ se disminuye el crecimiento radical. La temperatura de la solución nutritiva influye en la absorción de agua y

nutrimentos; temperaturas menores a 15 °C están asociadas con deficiencias de Ca, y Fe, principalmente, y en la medida en que la temperatura disminuye la absorción y asimilación también lo hace. En las horas con mayor actividad fotosintética, entre las 10:00 y 16:00 h no se presentaron temperaturas de la solución por debajo de 15 °C, caso contrario a partir del mes de febrero a mayo donde estuvo muy por arriba de 15 °C (Cuadro 12A).

Densidad aparente inicial

La composición de los sustratos evaluados no afectó la densidad aparente, probablemente debido a las características físicas inherentes de los componentes utilizados. La densidad aparente de un sustrato ideal debe ser menor a $0.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Abad *et al.*, 2004), sin embargo, en los sustratos utilizados en el presente experimento esta fue aproximadamente el doble de la densidad ideal (0.88 a $0.79 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) (Cuadro 5).

El concepto 'proporción umbral', explica que la mezcla de dos o más sustratos hace que la porosidad de la mezcla disminuya hasta un mínimo por la ocupación del espacio poroso por las partículas de menor tamaño de otro sustrato, y en consecuencia tiende a disminuir la densidad de la mezcla resultante siempre y cuando la densidad aparente del sustrato con un tamaño de partícula menor tenga una densidad más baja que el otro sustrato (Abad *et al.*, 2004; Urrestarazu y Salas, 2004) lo cual explica lo observado en el presente experimento. Wallch (2008) indica además que si el sustrato es una mezcla, las características de cada ingrediente contribuyen al total de la densidad aparente

del sustrato. Los sustratos Tez 75 y Tez 50 no aumentaron en densidad aparente respecto a Tez 100 como lo indica Wallch (2008), debido a la baja densidad de la turba (0.0757 a $0.1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) presente en la mezcla (Verdonck, 1983; Martínez *et al.*, 1991; Drazil *et al.*, 1999; Abad *et al.*, 2004; Adams, 2004; Urrestarazu y Salas, 2004; Blok *et al.*, 2008; Maher *et al.*, 2008).

EPT, CA y CRH inicial

El EPT de Tez 100 (74.59 %), es muy cercano al óptimo para un sustrato ideal es $>85\%$ (Baixauli y Aguilar, 2002; Abad *et al.*, 2004). El mayor espacio poroso total (EPT) inicial para el Tez 100 puede ser debido a que es una roca volcánica porosa, y su EPT está dado por el tamaño de partícula (Jones, 2005; Trejo *et al.*, 2013). En comparación con las mezclas que poseen turba como componente adicional al tezontle, se disminuye el EPT debido a que las partículas de turba ocupan los macroporos y el espacio entre partículas del tezontle reduciendo de manera general la porosidad total (Jones, 2005).

El EPT determina la capacidad de aireación (CA) y la capacidad de retención de humedad (CRH), que son respectivamente, la fase gaseosa y líquida de un sustrato (De Boodt y Verdonck, 1972; Lemaire, 1995; Wallch, 2008). El EPT es ocupado por agua y gases en proporciones inversas (Gregory, 2006).

El tezontle posee mayor cantidad de macroporos y por eso tiene una baja CRH y en el caso inverso la turba posee una alta cantidad de microporos lo cual contribuye a su alta CRH y menor CA. La capacidad de aireación (CA) que se presentó en el tezontle fue superior al ideal (Abad *et al.*, 2004; Adams, 2004;).

En el caso de Tez 75 y Tez 50 se presentaron valores de CA muy bajos (4.67 y 2.40 %) respectivamente (Cuadro 5), debido a que la turba ocupó la mayoría del espacio poroso y el espacio entre partículas del tezontle generando una disminución de la CA, y también de las características propias de la turba, donde la CA tiene un valor cercano al mínimo ideal (20 a 30 %) (Adams, 2004; Maher *et al.*, 2008), sin embargo, en diversos estudios se ha encontrado que esta propiedad varía mucho respecto al origen y tamaño de partícula de la turba (Urrestarazu y Salas, 2004; Maher *et al.*, 2008; Resh, 2013).

Se pueden concluir que la baja CA se debe primero a la ocupación de una cierta cantidad del espacio poroso y el espacio entre partículas del tezontle por parte de la turba, que es un material a su vez con una baja CA.

La capacidad de retención de humedad (CRH) es inversamente proporcional a la CA (Wallch, 2008) y es parte del EPT (De Boodt y Verdonck, 1972; Abad *et al.*, 2004; Blok *et al.*, 2008). Dada la anterior relación, los altos valores de CA encontrados para Tez 100 fueron relativamente inversos con respecto a la CRH, obteniendo 17.96 %, sin embargo está algo alejado del valor óptimo esperado de un sustrato ideal (30 % a 55 %) (Abad *et al.*, 2004). Estos resultados son similares a los encontrados en tezontle por Rodríguez *et al.* (2013) con 14.8 3%, Cruz *et al.* (2010) con 26.9 % y Trejo *et al.* (2013) con 22.6%, este último con un tamaño de partícula de 1 a 2 mm, donde se observó fácilmente que el tezontle posee una baja CRH inherente a su propiedad de roca volcánica porosa, lo que podría llevar a estados de estrés hídrico si no se realizan riegos adecuados.

Los resultados encontrados para Tez 75 y Tez 50 (Cuadro 5) estuvieron dentro del valor óptimo para un sustrato ideal Abad *et al.* (2004). La CRH se ocupa principalmente para determinar la frecuencia y duración del riego, con el cual los ciclos de riego deben ser suficientes para prevenir cualquier déficit de agua a las plantas entre ciclos, pero el ciclo debe ser lo suficientemente largo para proveer un adecuado drenaje del medio para que exista una apropiada oxigenación de las raíces (Resh, 2013), en el caso del Tez 100 requerirá de un riego más frecuente debido a un valor bajo de CRH en comparación con Tez 75 y Tez 50.

Finalmente para el caso de las mezclas que poseen turba y debido a sus propiedades intrínsecas como buena CRH, aceptable CA y alta EPT (Abad *et al.*, 2004; Urrestarazu y Salas, 2004), la CRH de las mezclas será mayor conforme mayor y la CA menor conforme aumenta la proporción de este componente en la mezcla (Cuadro 5).

El AFD en todos los sustratos estuvo por debajo del óptimo de 20% a 30% (Abad *et al.*, 2004).

En cuanto al ADR, Baixauli y Aguilar (2002) y Abad *et al.* (2004) establecen que de 4 % a 10 % como nivel óptimo, por lo que solo Tez 75 y Tez 50 se encuentran dentro del intervalo (Cuadro 5).

El ATD, la suma del AFD y ADR, es la cantidad de agua disponible para la planta y su óptimo está entre 24 % y 40 % (v/v) (Abad *et al.*, 2004). Los resultados encontrados en los distintos sustratos utilizados se observa la misma

tendencia encontrada tanto en AFD como en ADR en cuanto a que en Tez 100 se encuentra por debajo del límite inferior y en Tez 75 y Tez 50 se encuentran muy cercanos al valor mínimo, debido a las propiedades inherentes orgánicas de la turba, la cual tiene la capacidad de retener mayor cantidad de humedad (Cuadro 5) (Baixauli y Aguilar, 2002).

El ADD, presenta el mismo comportamiento que las anteriores variables relacionadas con el contenido de humedad en los sustratos.

pH y CE sustratos inicial

El pH inicial en Tez 100 son al neutro (Cuadro 8) y son similares a los reportados por Trejo *et al.* (2013) y Cruz *et al.* (2010) con 7.1 y Rodríguez *et al.* (2013) con 7.2. Al ser un sustrato inerte posee una muy baja o nula CIC (Abad *et al.*, 2004; Urrestarazu y Salas, 2004; Silber, 2008) lo cual no influirá o tendrá efecto sobre la composición iónica de la solución nutritiva con el paso del tiempo (Baixauli y Aguilar, 2002; Abad *et al.*, 2004; Maher *et al.*, 2008). El pH óptimo de un sustrato es de 5.5 a 6.8 (Ingram *et al.*, 1993; Baixauli y Aguilar, 2002; Abad *et al.*, 2004); sin embargo este dependerá del cultivo y podrá ser modificado con la aplicación de la solución nutritiva en el sustrato, al valor deseado (Klougart y Bagge, 1969; Michel, 2007; Silber, 2008; Maher *et al.*, 2008; Sooneveld y Voogt, 2009). En Tez 75 y Tez 50 se obtuvo un pH ácido, lo cual puede deberse a la mayor proporción de turba en las mezclas (Cuadro 8).

La acidez natural en la turba (Maher *et al.*, 2008) puede presentar valores diversos dependiendo del origen de esta y pueden estar dentro de un intervalo

de 3.9 a 5.83 (Verdonck, 1983; Abad *et al.*, 2004; Martínez *et al.*, 2005) sin embargo, en la mayoría de las presentaciones comerciales el pH se corrige para que este en un intervalo de 6.0 a 6.5.

La conductividad eléctrica (CE) presente en Tez 100 fue la más baja (0.15 dSm^{-1}) (Cuadro 8), debido a que por su naturaleza mineral no presenta sales solubles que contribuyan a la CE. Rodríguez *et al.* (2013) reportan valores de 0.05 dSm^{-1} , Cruz *et al.* (2010) de 0.08 dSm^{-1} y Trejo *et al.* (2013) con 0.15 dSm^{-1} , lo cual es similar a lo encontrado en Tez 100. Desde un inicio es bueno tener un sustrato con bajos niveles de CE, debido a que no requeriría de lavados previos para disminuirla, y no afecten en la nutrición del cultivo (Baixauli y Aguilar, 2002; Abad *et al.*, 2004; Jones, 2005; Michel, 2007).

Se presentó un aumento en la CE conforme aumenta la proporción de turba utilizada en las mezclas (Cuadro 8), la turba misma presenta una baja concentración de sales minerales (Baixauli y Aguilar, 2002; Maher *et al.*, 2008) a pesar de ser un sustrato orgánico; Abad *et al.* (2004) reportó que existen en las turbas rubias una CE de 0.4 dSm^{-1} (Cuadro 8). A pesar de tener esta conductividad inicial conforme se realicen los riegos la CE se alterará y tenderá tener el mismo valor como el de la solución nutritiva aportada por los riegos (Jones, 2005; Michel, 2007; Resh, 2013).

Características inherentes del cultivo vertical

La forma y volumen del tubo vertical influyó en gran medida en el sistema de cultivo (Ingram *et al.*, 1993), debido a su altura ya que esta tiene un efecto

directamente proporcional sobre la CA *in situ* del sustrato, donde a mayor altura del contenedor mayor CA (Abad *et al.*, 2004) y menor CRH (Baixauli y Aguilar, 2002; Urrestarazu y Salas, 2004); este fenómeno es debido a la fuerza de gravedad que concentrará mayor cantidad de agua en el nivel bajo del tubo vertical y la cantidad de agua en este nivel del tubo dependerá del tamaño de partícula como al igual en los restantes niveles del tubo (Ingram *et al.*, 1993; Wallch, 2008).

El cultivo hidropónico vertical en bolsa, a diferencia de otras técnicas hidropónicas, presenta una desventaja ya que la altura y volumen del contenedor, junto con el volumen, masa y densidad de los sustratos, provocan una fuerza de compresión que compacta el sustrato y es inversamente proporcional a la altura, siendo las zonas bajas del tubo donde presenta mayor compactación de los sustratos y la menor a mayor altura; este fenómeno afecta de manera secuencial a la densidad aparente, porosidad, EPT, CA y CRH (Ingram *et al.*, 1993; Blok *et al.*, 2008; Wallch, 2008).

La compresibilidad o fuerza de compresión genera una compactación de los sustratos el cual provoca una disminución en la porosidad intergranular (Lemaire, 1995; Baixauli y Aguilar, 2002), esto a su vez ocasiona que se reduzca el volumen (Asady *et al.*, 1985; Ingram *et al.*, 1993), lo que a su vez provoca que la densidad aparente aumente (Ingram *et al.*, 1993; Lemaire, 1995; Verhagen, 2009). La densidad aparente es un parámetro relacionado de manera inversamente proporcional en la mayoría de los casos con el EPT (Asady *et al.*, 1985; Verhagen, 2009). Estas alteraciones de las propiedades en

los sustratos provocadas por la fuerza de compresibilidad ocurren siempre *in situ* y en muchos de los casos algunas de las propiedades que se encontraban alteradas *in situ* mantienen en cierto grado sus propiedades alteradas después de dejar de ejercer la fuerza de compresión.

Densidad aparente final

El aumento de la densidad aparente al finalizar el ciclo del cultivo evidencia una reducción en el volumen del sustrato, probablemente debido a un decaimiento de la estructura física del sustrato (Verhagen, 2009), lo cual está relacionado a un rompimiento de partículas provocando que estas fueren más pequeñas y el espacio interparticular disminuya (Ingram *et al.*, 1993). Este comportamiento se evidenció más en Tez 100 y en menor medida con Tez 50, probablemente se puede explicar por dos razones, la primera, es que posiblemente el tezontle presenta una estructura más frágil a cambios mecánicos y la turba al ser un material orgánico puede presentar más plasticidad a estos cambios y no sufrir alteraciones tan evidentes como en el tezontle y segundo, a mayor concentración de tezontle en las mezclas estas presentaron un mayor peso por unidad de volumen debido a que el tezontle tiene mayor densidad aparente que la turba provocando una mayor fuerza de compresibilidad que generó mayor rompimiento de partículas y disminución del espacio poroso.

EPT, CA y CRH final

El EPT se afectó de manera inversa a la densidad aparente, existiendo una disminución como lo indica Ingram *et al.* (1993) y Lemaire (1995), esta

reducción fue del 36 % con Tez 100 (Cuadro 6) respecto al inicial; esto pudo ser dado que el tezontle presenta una estructura más frágil a la fuerzas mecánicas en comparación con la turba que formó parte del Tez 75 y Tez 50, los cuales presentaron una reducción del 1 % al 8 % (Cuadro 6) corroborándose que conforme mayor cantidad presente de turba en la mezcla de sustratos, mayor resistencia a la fuerza mecánica evitando así una alteración mayor de las propiedades físicas del sustrato al finalizar el cultivo. Los niveles ideales del EPT (> 85 %) (Abad *et al.*, 2004) demuestran que los valores finales se alejaron aún más del valor ideal para todos los sustratos involucrados. Los niveles se comportaron de manera similar a la densidad aparente, existiendo una muy leve diferencia entre el nivel alto y bajo donde se presentaron los valores más altos y bajos respectivamente de EPT (Cuadro 6), este resultado evidencia que no existió un gran efecto posterior de la alteración de las propiedades físicas de los sustratos debido a la fuerza de compresibilidad existente en el tubo vertical durante el ciclo de cultivo (Asady *et al.*, 1985; Lemaire, 1995; Verhagen, 2009).

La CA final de los sustratos tuvo una disminución muy marcada para Tez 100 reduciéndose de 56.63 % a un 10.61 % (Cuadro 5 y 6), el cual está muy alejado del ideal (20 a 30 %) (Abad *et al.*, 2004). Esta disminución a un nivel tan inferior puede esperarse que exista anoxia en los niveles del sustrato que tengan un nivel muy cercano o por debajo del 10 % de CA (Walch, 2008). En cambio, la CA en Tez 75 y Tez 50 se incrementó un 2 % y 7 % respectivamente en comparación a la CA inicial (Cuadro 5 y 6), sin embargo estos valores aún son muy bajos para entrar del intervalo óptimo como se mencionó antes y pudieran

presentar mayor posibilidad de presentar anoxia el sustrato como lo indicó (< 10 % CA) (Wallch, 2008). La CA esa relacionada con el flujo de O₂ dentro del espacio poroso y es su principal medio de transporte (Blok *et al.*, 2008); pero si se encuentra en un nivel bajo como los especifica Wallch (2008) (< 10 %) puede existir una disminución en la respiración de la raíz y una disminución el crecimiento de esta. Una disminución temporal ó crónica de la concentración de O₂ restringe primero el crecimiento y a continuación la de la parte aérea (Abad *et al.*, 2004; Kafkafi, 2008; Verhagen, 2009; Lynch *et al.*, 2012; Resh, 2013).

La disminución del O₂ no solo está relacionada con la disminución del crecimiento de la raíz o planta sino además de estar relacionado con incidencias de enfermedades; en condiciones anaeróbicas las raíces no pueden obtener energía del proceso de respiración y evitar así enfermedades (Gregory, 2006), que muchos de los casos de muerte de raíces es debido a enfermedades (Abad *et al.*, 2004; Prasad y Maher, 2004; Verhagen, 2009; Resh, 2013).

Existió el doble de CA entre el nivel alto y bajo (Cuadro 6) pero estando dentro de un intervalo muy bajo, lo que posibilita que existan las alteraciones antes mencionadas en un ambiente con una baja CA y un bajo flujo de O₂.

En el Tez 100 existió una aumento de un en la CRH de un 10 %, sin embargo, este comportamiento no fue el mismo para Tez 75 y Tez 50, donde se registró una disminución de un 9 y 6 % respectivamente (Cuadro 6). Los valores óptimos de CRH de 30 a 55 % (Abad *et al.*, 2004) alojan a los resultados

obtenidos de CRH de todos los sustratos involucrados incluso podría considerarse al Tez 100 con 27.89 % (Cuadro 6), el cual en sus propiedades físicas iniciales, no se podía considerar con una buena CRH. Los niveles del tubo vertical (Cuadro 6) presentaron diferencias mínimas entre estos aunque presentando un mayor valor en el nivel bajo, esta tendencia es similar a la encontrada en densidad aparente, EPT y CA, traduciéndose en que no existió una alteración tan evidente de los efectos de la fuerza de compresibilidad presentes en el cultivo vertical.

El AFD final de los sustratos utilizados se redujo de manera general entre 0.50 % y 1.88 % (Cuadro 6), esta reducción no es tan significativa en comparación con los valores iniciales del sustrato (Cuadro 5). La disminución del EPT consecuencia del decaimiento de la estructura física de un sustrato, trae como consecuencia una disminución del espacio poroso drenable y a continuación una disminución del AFD. Abad *et al.* (2004) menciona que el AFD debe estar entre 20 a 30 %, el cual no es alcanzado por ninguno de los sustratos evaluados (Cuadro 6). Los sustratos que contienen turba presentan una mayor AFD que Tez 100 ya que, entre mayor fue el porcentaje de turba el AFD paralelamente; esto puede deberse a que la turba es un sustrato orgánico y posee la característica de retener altas cantidades de agua (Baixauili y Aguilar, 2002; Resh, 2013). Los niveles del tubo tuvieron una diferencia de 1 % entre estos, lo cual es una diferencia mínima y no existió efecto respecto al nivel, sin embargo, el nivel de AFD es bajo respecto al nivel óptimo establecido por Abad *et al.* (2004) (20 a 30 %).

El ADR en Tez 100 aumentó pero hubo un comportamiento opuesto con Tez 75 y Tez 50 (Cuadro 6) respecto a las propiedades iniciales (Cuadro 5). Todos los sustratos se mantuvieron en el límite óptimo (4 % a 10 %) establecido por Abad *et al.* (2004). El estudio de las propiedades físicas del suelo en relación a los niveles estudiados al finalizar el ciclo de cultivo demuestran que además de encontrarse dentro del intervalo de valores óptimos mencionados anteriormente existió una diferencia mínima 1.17 % entre el valor máximo y mínimo reportado (Cuadro 6).

El ATD encontrada en todos los sustratos siguieron la misma tendencia tanto de la AFD y ADR, ya que el valor final encontrado para cada uno de los sustratos, se encuentran por debajo de los niveles óptimos 24 % a 40 % Abad *et al.* (2004) salvo para Tez 50 que se encuentra muy cercano a este valor debido a su alta cantidad de turba como componente (Ingram *et al.*, 1993). Niveles óptimos de ATD proveen a la raíz de la planta un aporte adecuado de agua; al tener baja ATD la frecuencia y volumen de riego deben ser los adecuados para evitar deficiencias hídricas en la planta (Baixauli y Aguilar, 2002). Por nivel del tubo, el ATD estuvo fuera de los niveles óptimos antes mencionados.

El ADD tuvo una tendencia en los sustratos similar al ATD donde el Tez 100 aumentó sus valores al finalizar el ciclo de cultivo y de manera contraria en el Tez 75 y Tez 50 (Cuadro 5 y 6). En el análisis por nivel no se encontró una tendencia clara entre niveles, sin embargo el mayor valor de ADD se encontró en el nivel bajo con 18.91 % (Cuadro 6). El ADD es el agua no disponible para la planta o que requerirá de más energía para ser absorbida, a mayor

porcentaje de esta en un sustrato tendrá efectos negativos a largo plazo sobre la planta relacionadas a la absorción. (Baixauli y Aguilar, 2002).

pH sustrato final

A final del experimento el pH, disminuyó en casi todos los casos excepto para Tez 50 respecto al pH inicial, donde este aumentó en 0.10 unidades. Los valores finales obtenidos para Tez 100, Tez 75 y Tez 50 (Cuadro 9), muestran valores estadísticamente idénticos. Este fenómeno es provocado por los riegos continuos a que fueron expuestos los sustratos, independientemente si Tez 100 era un sustrato inerte o si Tez 75 y Tez 50 tenían un componente en la mezcla químicamente activo (turba), con el paso del tiempo, la exposición continua de solución nutritiva con un valor de pH relativamente constante y la acidificación natural del medio por parte de la planta, el valor de pH final de los sustratos tendió a ser idéntico entre estos (Sonneveld, 2004). El intervalo óptimo de pH de un sustrato en cultivo sin suelo debe ser casi idéntico al de la solución nutritiva sobre todo si presenta sustratos químicamente inactivos o con una baja CIC, este intervalo abarca 5.5 a 6.8 en el cual prácticamente la totalidad de los nutrimentos están en forma asimilable (Baixauli y Aguilar, 2002; Abad *et al.*, 2004). Los resultados de pH de todos los sustratos utilizados se observan dentro de este intervalo. En el caso del cultivo de fresa, las plantas son tolerantes a un intervalo amplio en valores de pH pero crecen y producen mejor con un pH comprendido entre 6.0 y 6.5 (Hancock, 1999).

El análisis realizado por nivel mostró que todos son iguales y en relación a los valores obtenidos todos se encuentran dentro del intervalo óptimo de disponibilidad de nutrimentos en cultivo sin suelo y el intervalo adecuado para el desarrollo óptimo de la fresa como ya se mencionó anteriormente (Cuadro 9).

CE sustrato final

La CE analizada al finalizar el ciclo de cultivo en los sustratos utilizados se encontraron valores estadísticamente idénticos (Cuadro 9), los valores de cada sustrato utilizado fueron mayores a los registrados en la solución nutritiva a lo largo de los meses e incluso en el mes de mayo el cual fue el más alto ($2.19 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$) (Cuadro 14A), esta acumulación de sales en el sustrato se debió a un mayor consumo de agua versus absorción de nutrimentos de manera natural por parte de las plantas (Resh, 2013).

La CE fue similar en los niveles del tubo y con valores mayores para todos los casos en relación a la CE más alta en la solución nutritiva en el mes de mayo (Cuadro 14A). En el nivel bajo se encontró un valor numéricamente menor de CE, esto puede explicarse debido a la cercanía de la zona de drenaje en el tubo vertical que junto con la morfología del contenedor, hace que esta parte permanezca más húmeda en comparación con los demás niveles del tubo vertical, permitiendo un drenaje fluido y eficiente (Ingram *et al.*, 1993) y que no acumule mayor cantidad de sales en relación a los otros niveles (Resh, 2013).

La fresa es sensible a la salinidad (Hancock, 1999) y valores mayores de 2.6 dSm^{-1} provocan una baja considerable en el desarrollo de la planta, rendimiento

y en diversos parámetros de la calidad del fruto (Sarooshi y Cresswell, 1994; Awang y Atherton, 1995; Lamarre y Lareau, 1997; Giuffrida *et al.*, 2001; Kepenek y Koyuncu, 2002; Keutegn y Keutgen, 2003; Saied *et al.*, 2003; Rahimi y Biglarifad, 2011; Rahimi *et al.*, 2011), los resultados obtenidos en algunos casos superan ligeramente este nivel y el resto se encuentran cercanos ó menores a este, teniendo como resultado un ambiente de raíz ubicado en el límite máximo permitido.

Longitud de peciolo

La longitud del peciolo se vio solamente afectada por el factor cultivar y sustrato. Los cultivares utilizados presentaron diferencias en la longitud de peciolo Shaw *et al.* (2002) mencionan que la media de la longitud del peciolo es de 17.0 cm con un intervalo que va de 13.5 y 21.2 cm; al comparar estos datos con los obtenidos en el experimento (Cuadro 16A) se demuestra que la longitud del peciolo se encontró reducida en un 50 % aproximadamente en comparación con la media de longitud de peciolo descrita.

Shaw *et al.* (2009), mencionan que la longitud media de peciolo en el cultivar Monterey es 21.2 cm con un intervalo entre 20.0 y 23.0 cm, por lo que la longitud de peciolo observada en el presente estudio fue reducida en un 50 %.

Chandler (2004) menciona que la media de la longitud de peciolo en el cultivar Festival es 12.0 cm, por lo que en el presente estudio hubo una reducción de en un 25 % siendo menos acentuada en comparación con los demás cultivares.

Grosor de peciolo

Para el cultivar Camino Real Shaw *et al.* (2002) mencionan que tiene una media de 3.1 mm con un intervalo de 2.9 a 3.3 mm, por lo que este factor se vio disminuido en un 50 %.

Para el cultivar Monterey Shaw *et al.* (2009) describieron una media de 5.1 mm en un intervalo de 4.0 a 6.0 cm, por lo que hubo una reducción cercana al 60 %.

En el cultivar Festival Chandler (2004) establece que el grosor de peciolo con 3.5 mm de media, y comparando los resultados del experimento se observó una reducción del 50 %.

La longitud y grosor de peciolo muestran que existieron condiciones adversas (baja intensidad luminosa y baja aireación de sustrato a menores alturas respecto al tubo) al crecimiento y desarrollo de la planta, provocando una reducción del porte y tamaño de la planta en comparación con lo descrito en sus patentes respectivas.

Peso seco total, aéreo y de raíz por planta

El peso seco total, aéreo y de raíz mostraron tendencias similares, ya que se presentó mayor acumulación de biomasa en los niveles altos del tubo (Cuadro 16A), lo cual puede ser explicado por la mayor radiación recibida (Cuadro 6A) en este nivel así como por la mayor CA del sustrato (Cuadro 6) (Taiz y Zeiger, 2010). Los cultivares Monterey y Festival fueron los que más acumulación de

materia seca presentaron excepto para peso seco de raíz donde no hubieron diferencias entre estos.

Relación peso seco aéreo/peso seco raíz

La relación PSA/PSR fue mayor en el nivel medio del tubo, lo que indica que en este estrato las plantas tuvieron un mayor desarrollo de la parte aérea en comparación con la raíz. Esta relación puede ser afectada por la nutrición de la planta, estado hídrico, como el ATD presentado en el Cuadro 6, (Resh, 2013) y factores físicos en sustrato (Marshall, 2002; Gregory, 2006).

Área foliar

El área foliar fue mayor en plantas ubicadas en el nivel alto y medio, pudo deberse a la mayor intensidad luminosa presente durante el desarrollo del cultivo y la alta capacidad de aireación del sustrato al final del estudio (Cuadro 6); estos son dos factores muy importantes que pudieron haber favorecido el desarrollo de hojas (Hancock, 1999; Blok *et al.*, 2008).

En el caso de los cultivares, presentó la misma tendencia que en longitud y grosor de peciolo y corroborada en peso seco total y aéreo por planta, siendo Monterey y Festival la que mayor área foliar presentaron.

Estado nutrimental.

Nitrógeno

El resultado del análisis foliar mostró que para la concentración de Nitrógeno se encontraban en el rango de suficiencia de 2.0 a 2.8 % (Hancock, 1999), sin

embargo el cultivar Festival se encuentra en la zona de deficiencia presentando un valor de 1.92 % mientras que Camino Real fue la que presentó en una mayor concentración de N (2.12 %) seguido de Monterey (2.01 %) (Cuadro 18A).

Fósforo

En el caso del fósforo ocurrió un efecto opuesto al nitrógeno ya que (Cuadro 18A) se encontraron concentraciones de este elemento indicando un exceso en los tejidos el cual Hancock (1999) describe que un intervalo de 0.25 a 0.40% es el adecuado y a partir de 0.50 % se encuentra en exceso.

La concentración más alta se registró tanto en el nivel medio y bajo por lo que a mayor altura de tubo menor concentración de fósforo (Cuadro 18A).

Potasio

Para el caso del potasio (Cuadro 18A), se encontraron niveles de deficiencia, ya que Hancock, 1999 establece que por debajo de 1.3% se encuentran dentro de esta clasificación, y para un nivel de suficiencia se debió tener valores de 1.5% a 2.5 % de K.

A mayor proporción de turba en las mezclas mayor porcentaje de potasio foiar (Cuadro 18A), lo cual puede deberse a que es un ión altamente soluble (Taiz y Zeiger, 2010), permaneciendo más tiempo en medios húmedos, y dado que las mezclas ocupadas que contenían turba presentaron una mayor CRH y CIC

(Baixauli y Aguilar, 2002), las raíces podrían absorberlo de una manera más eficiente.

A un nivel más alto en el tubo menor cantidad de agua retenida y menor concentración de potasio se encontró (Cuadro 18A).

'Monterey' presentó mayor concentración de potasio, seguido 'Camino Real' y 'Festival'.

Calcio

La concentración de calcio (Cuadro 18A) se encuentran muy cerca del valor mínimo en el intervalo de suficiencia el cual es de 0.7 a 1.7 % (Hancock, 1999).

Magnesio

El magnesio estuvo dentro de los niveles de suficiencia 0.3 % a 0.5 % (Hancock, 1999) (Cuadro 18A). En el caso de los sustratos Tez 75 y Tez 50 existió una mayor concentración de magnesio, tal vez debido a la capacidad de intercambio catiónico propia de la turba (Ingram *et al.*, 1993; Baixauli y Aguilar, 2002; Adams, 2004; Maher *et al.*, 2008).

Sodio

A una mayor altura del tubo se presentó una menor concentración de sodio, tal vez porque las altas acumulaciones en el nivel bajo se deba a que los lixiviados de los niveles más altos hagan que se acumulen más a este nivel (Cuadro 18A).

Calidad de fruto

pH de fruto

Los valores de pH de fruto encontrados para el factor sustrato y cultivar (Cuadro 12) tienen un valor más bajo a lo propuesto por Hancock (1999) de 3.5 como nivel óptimo de pH en fruto de fresa, la mayor acidez presentada en los frutos del experimento respecto al nivel óptimo pudo deberse por alguna de las variables climáticas Taghavi *et al.* (2006). Los sustratos Tez 100 y Tez 75 fueron los que obtuvieron los menores valores de pH por Tez 50.

Acidez titulable

La acidez titulable (AT) presentó mayor acidez en los sustratos Tez 100 y Tez 75 seguido de Tez 50 (Cuadro 12); el valor de la AT depende en el cultivar y en las condiciones ambientales además de que varía dependiendo del grado de madurez del fruto y conforme la madurez aumenta éste gradualmente decrece (Hancock, 1999). Los resultados de AT que se encontraron en el experimento se encontraron dentro del intervalo de valores obtenidos por diversos autores que van desde 0.4 % hasta 1.2 % Caruso y Villari (2003); Kiprijanovski *et al.* (2009); Kirad *et al.* (2009); Krüger *et al.* (2009); Martínez-Bolaños *et al.* (2008); Moor *et al.* (2009); Pádua *et al.* (2009); Sharma y Singh (2009); Sone *et al.* (2009); Hassan *et al.* (2011); Bieniasz *et al.* (2012); Neocleous y Vasilakakis (2012).

Firmeza

'Festival' la que obtuvo mayor firmeza seguida de 'Monterey' y finalmente 'Camino Real' (Cuadro 12). Diversos autores han encontrado que la firmeza puede encontrarse entre 130.3 a 496.8 lb y en el caso de los resultados obtenidos para los cultivares en el experimento la mayoría estuvieron dentro de este intervalo (Paraskevopoulou-Paroussi *et al.*, 1995; Kepenek y Koyuncu, 2002; Stevens *et al.*, 2007; Martínez-Bolaños *et al.*, 2008; Singh *et al.*, 2009;).

Sólidos solubles totales

Tanto los resultados encontrados en sustratos y cultivares se encontraron dentro de un intervalo de valores óptimos (6 a 9 % en frutos maduros rojos) como lo indica Hancock (1999). Existe un amplio intervalo de valores de sólidos solubles totales encontrados experimentalmente, los cuales pueden ir de 4.3 a 13.4 % (Cordenunsi *et al.*, 2002; Keutegn y Keutgen, 2003; Sturm *et al.*, 2003; Ikeda *et al.*, 2009; Qureshi *et al.*, 2012; Neocleous y Vasilakakis, 2012) y donde los resultados obtenidos en el experimento en cultivo vertical se ubican también dentro de este intervalo.

En cultivo vertical de fresa Paraskevopoulou-Paroussi *et al.* (1995) encontró un aumento de esta variable conforme los frutos provenían de zonas más altas. Martínez-Bolaños *et al.* (2008) y Neocleous (2012) encontraron para la cultivar Festival valores de 8.5 y 6.8 % respectivamente, estando dentro de este intervalo de valores el resultado encontrado para Festival en el experimento (Cuadro 12). Hancock (1999) menciona que el contenido de sólidos solubles

totales son dependientes del cultivar y de las condiciones ambientales. En el experimento tal vez se hubieran podido alcanzar valores más altos ya que Hancock (1999) menciona que las altas temperaturas por arriba de 25 °C pueden reducir la concentración de sólidos solubles, situación que ocurrió en el cultivo vertical de fresa durante el periodo de producción de frutos (marzo a mayo) (Cuadro 2).

Relación sólidos solubles totales/acidez titulable

A mayor proporción de turba en los sustratos mayor relación sólidos solubles totales/acidez titulable (SST/AT) (Cuadro 12). La relación (SST/AT) es un parámetro usado comúnmente para evaluar el sabor y el estado de madurez del fruto, en donde una relación de 8.5 – 14.0 es considerada como un balance apropiado de la dulzura del sabor característica de la fresa en la probabilidad para el ser humano (Haffner y Vestrheim, 1997 y Keutgen y Pawelzik, 2007). Martínez-Bolaños *et al.* (2008) señalan que este parámetro es utilizado para determinar la aceptabilidad del consumidor. Los resultados obtenidos tanto por sustrato como por cultivar (Cuadro 12) se encontraron dentro de este intervalo de balance óptimo para SST/AT. Wang y Camp (2000) demostraron que a altas temperaturas ambientales (25/12 °C, 25/22 °C y 30/22 °C día/noche) la SST, AT y SST/AT disminuyen, este fenómeno ocurrió durante el día de manera similar con altas temperaturas diurnas (temperaturas máximas) (Cuadro 2) en el experimento registrándose durante el periodo de fructificación (marzo a mayo).

Rendimiento y número de frutos por corte y totales, peso por fruto.

Rendimiento y número de frutos por corte

Al inicio de los cortes la producción de fruto era baja tanto en número como rendimiento, y conforme las fechas de corte avanzaban en los meses involucrados (abril y mayo) se aumentaba la producción encontrando el pico máximo en el último corte del mes de mayo; este comportamiento puede deberse a un incremento gradual natural al inicio de la fase de producción por parte de la planta, ya que el experimento solo contempló este periodo de tiempo para cosecha, sin embargo, si se hubiera dejado por más tiempo el número de cortes, número de frutos y rendimiento por corte hubiera sido mayor.

El comportamiento del número y rendimiento de frutos por corte (Figura 45 y Cuadro 21A) en base a los sustratos utilizados se deben debido principalmente a la propiedades físicas de los sustratos inherentes a estos, donde la CA fue un factor importante para aumentar la producción y número de frutos debido al aumento del flujo de O₂ en la raíz (Blok *et al.*, 2008; Taiz y Zeiger, 2010).

En el nivel alto y medio del tubo se presentó mayor rendimiento como número de frutos por corte (Figura 46) quedando casi con el mismo número de frutos al finalizar la cosecha. En el caso del rendimiento por corte solo existió (Cuadro 21A) una diferencia numérica entre el nivel medio y alto de 5 g al finalizar los cortes, probablemente debido a la mayor intensidad luminosa presente en el nivel alto y medio (Cuadro 8A), además de que en estos la CA *in situ* de los sustratos pudieron ser el adecuado, trayendo como consecuencia una mejor

producción de frutos debido a una mejor condición para la actividad de la raíz y la parte aérea (Ingram *et al.*, 1993).

La producción (número y rendimiento de frutos) de Camino Real se mantuvo estable en todas las fechas de corte (Cuadro 20A y 21A), sin embargo el comportamiento de 'Monterey' comenzó con una baja producción para después al finalizar el último corte superar a Camino Real. Festival siempre se comportó como el cultivar con mayor producción. Los resultados en la producción de los cultivares estudiados son resultado de la adaptación a las condiciones ambientales y el medio en el cual se desarrollan (Hancock, 1999; Blok *et al.*, 2008).

Número de frutos totales

El nivel alto y medio presentaron el mayor número de frutos totales por planta (Cuadro 15), probablemente debido a una baja intensidad luminosa encontrada en el nivel bajo durante todos los meses del experimento en comparación con los niveles superiores (Cuadro 6A) generando una baja actividad fotosintética en la planta (Taiz y Zeiger, 2010), la forma y volumen del tubo vertical que permitió, debido a la gravedad y sin importar el tipo de sustrato, concentrará mayor cantidad de agua a un nivel más bajo en el tubo vertical lo que hizo disminuir la CA del sustrato y en consecuencia la concentración de O₂ (Ingram *et al.*, 1993; Wallch, 2008) disminuyendo el metabolismo de la raíz que afectaría a la parte aérea y en consecuencia existiría menor cantidad de fotosimilados para la producción de frutos (Taiz y Zeiger, 2010), sumando a esta lista la fuerza

de compresión hizo disminuir el espacio interparticular del sustrato generando una nueva disminución *in situ* de la CA (Lemaire, 1995; Baixauli y Aguilar, 2002).

Se obtuvo mayor número de frutos para 'Festival' siendo iguales 'Camino Real' y 'Monterey' la producción de estos (Cuadro 15), esta diferencia podría deberse a la producción inherente de cada cultivar utilizada (Shaw *et al.*, 2002; Chandler, 2004; Shaw *et al.*, 2009).

La temperatura ambiental registrada en el experimento jugó un papel muy importante en el número total de frutos (Cuadro 2), debido a que temperaturas por arriba de los 20 °C comienza una restricción a la formación y desarrollo del botón floral y sobre todo si estas se presentan en la etapa de floración o fructificación, en el presente experimento pudo limitarse el número total de frutos producidos (Hancock, 1999).

Realizando una comparación entre las técnicas de cultivo sin suelo tradicionales sin contar el sistema vertical, se encontraron dos grupos de resultados en relación al número de frutos·planta⁻¹; el primero ubicado entre 7 a 20 frutos·planta⁻¹ (Fletcher *et al.*, 2004; Chaturvedi *et al.*, 2005; Saied *et al.*, 2005; Pérez *et al.*, 2005; Linsley-Noakes *et al.*, 2006; Paranjpe *et al.*, 2008; Al-Raisy *et al.*, 2010; Copettic *et al.*, 2012) en el segundo grupo se ubica con un intervalo de 20 a 40 número de frutos·planta⁻¹ (Sarooshi y Cresswell, 1994; Awang y Atherton, 1995; El-Behairy *et al.*, 2001; Kaya *et al.*, 2002; Asao *et al.*, 2008; Bosc y Demene, 2009; Milivojevic *et al.*, 2009). En algunos experimentos se ha

superado este intervalo, llegando a obtener hasta 76 frutos (Lieten, 2002). Los periodos de duración del ciclo de cultivo de los dos grupos se ubican entre 2 a 4 meses.

Los resultados obtenidos en el experimento (Cuadro 15) al ser comparados con la información anterior de los cultivos sin suelo se llega a la conclusión de que se encuentran dentro del intervalo debido a que este experimento tuvo una duración de 1 mes 1 semana el periodo de cosecha y la información establece que los experimentos tuvieron una duración de 2 meses como mínimo.

Ejemplos en cultivo vertical, el número de frutos·planta⁻¹ obtenidos muestran resultados muy variados y no poseen una clara tendencia de su verdadero potencial; Durner (1999) indica haber obtenido 28.3 frutos·planta⁻¹, Linsley-Noakes *et al.* (2006) en un mes de cosecha se obtuvo 9 a 8 frutos·planta⁻¹, Caso *et al.* (2009) 43 a 68 frutos·planta⁻¹ en 8 meses de cultivo, Al-Raisy *et al.* (2010) 11 a 16 frutos·planta⁻¹ en 3 meses de cosecha y finalmente Villagra *et al.* (2012) indican 2 frutos·planta⁻¹ en un periodo de 1 mes, llegando a la conclusión que en el cultivo vertical varían en gran manera los resultados debido principalmente al cultivar usado, sustratos, técnica de irrigación, disposición de plantas, condiciones ambientales y tipo de plantas utilizadas, lo que conlleva a multivariados resultados que no concluye algo en concreto. Comparar lo obtenido en el experimento (Cuadro 15) con estos resultados en cultivo vertical, muestra que para la mayoría de los estudios se encuentran cercanos al límite inferior del número de frutos por planta.

En cultivo en suelo en muchas de los casos los valores mínimos iniciales son cercanos o superiores a 40 frutos por planta (Lieten, 1997; Yuan *et al.*, 2004; Yasunaga, 2008; Selamovska y Nikolic, 2009;) y llegando a valores cercanos a los 70 frutos por planta, ubicando la etapa de producción entre 3 y 7 meses.

Una comparación rápida entre los tres sistemas antes mencionados se llega a la conclusión que un mayor número de frutos se obtiene en suelo, seguido del sistema sin suelo y en última posición al sistema vertical. En los resultados obtenidos en el experimento de cultivo vertical de fresa se observó que son demasiado bajos y se encuentran cercanos al límite inferior de los cultivos hidropónicos, sin embargo podría ser que en el experimento se hubieran aumentado el número de frutos por planta si se hubieran alargado más el periodo de cosecha, ya que este fue de aproximadamente 35 días. Finalmente otro factor involucrado que pudo ocasionar una baja obtención de frutos fue la poda de flores que se realizó durante casi 3 meses previos a iniciar el periodo de cosecha, disminuyendo así el número de frutos posibles por obtener.

Peso promedio por fruto

Monterey fue el cultivar que obtuvo el mayor peso de fruto, sin embargo si se analizaran estos resultados con los de sus propias patentes se puede llegar a la conclusión que se obtuvieron frutos pequeños, de manera general en todos los cultivares; Shaw *et al.* (2002) reportaron para 'Camino Real' tener una media de fruto de 31.1 g, Shaw *et al.* (2009) para 'Monterey' de 32.4 g, Chandler (2004) para 'Festival' de 15 a 25 (fruto no primario) o 25 a 35 g (fruto primario).

Al-Raisy *et al.* (2010) encontraron en un experimento de cultivo vertical con macetas, utilizando los cultivares Camarosa, Aid Catherina y Al-Ain, promedios de peso de fruto que van de los 8.73 a 8.42 g·fruto⁻¹ respectivamente para columnas con una altura de 6 macetas a 8, estos resultados concuerdan con lo encontrado en el experimento de cultivo vertical (Cuadro 18A).

La explicación del pequeño tamaño de frutos se debe a las temperaturas ambientales superiores a los 25 °C presentes en el periodo de floración y fructificación registradas durante el día (Cuadro 6A) que tienen efectos negativos en el tamaño de fruto, este proceso se lleva a cabo al aumentar la tasa de desarrollo de fruto en la planta y en consecuencia genera una disminución en el tamaño (Hancock, 1999). Otra causa que haya afectado el número de frutos fue la baja intensidad luminosa encontrada de manera general durante todo el experimento (Cuadro 6A) generando una baja actividad fotosintética y una disminución en la concentración de fotosintatos disponibles para el desarrollo del fruto (Taiz y Zeiger, 2010).

Rendimiento total por planta

El mayor rendimiento en sustrato fue Tez 100, lo cual puede deberse a la CA presente en los sustratos (Cuadro 5 y 6), donde el sustrato que presentó mayor CA fue el que mayor proporción de tezontle tenía, esto originó que el ambiente de la raíz tuviera mayor contenido de O₂ (Ingram *et al.*, 1993) y con esto cumpliera de una mejor manera las funciones metabólicas la raíz, generando un

mejor desarrollo de la parte aérea y en consecuencia una mayor cantidad de fotoasimilados disponibles para el desarrollo del fruto (Taiz y Zeiger, 2010).

El nivel medio fue el que mayor rendimiento se reportó seguido del nivel alto, sin embargo, en el nivel bajo existió una reducción de 30 % y 25 % respectivamente en relación a cada nivel comparado (Cuadro 15). El sistema de cultivo vertical presenta una desventaja inherente al sistema, que es la disminución del rendimiento respecto a la posición de la planta en la bolsa vertical, por lo regular a mayor altura más rendimiento y viceversa; este fenómeno fue comprobado por Paraskevopoulou-Paroussi *et al.* (1995); Anagnostou y Vasilakakis (1995); Durner (1999); Linsley-Noakes *et al.* (2006); Rowley *et al.* (2010); este fenómeno no se presentó del todo en el experimento, ya que el nivel que presentó mayor rendimiento fue el medio y no el alto, sin embargo, si se cumplió para el nivel bajo, donde tuvo el menor rendimiento en comparación con los demás niveles, obteniendo menor rendimiento a menor altura (Cuadro 15). El menor rendimiento encontrado en el nivel bajo se pueden explicar de la misma manera que el número de frutos por planta; la intensidad luminosa fue la más baja encontrada en el nivel bajo en comparación con los demás niveles durante el ciclo de cultivo (Cuadro 6A) generando una baja actividad fotosintética en la planta (Taiz y Zeiger, 2010), además el efecto del volumen y forma del contenedor permitiendo que se acumulara mayor cantidad de agua a niveles más bajos en el tubo vertical debido a la fuerza de gravedad ocasionando una disminución de la CA del sustrato generando una disminución en las concentraciones de O₂ (Ingram *et al.*, 1993; Wallch, 2008), la fuerza de

compresión disminuyó el espacio interparticular del sustrato generando otra nueva disminución *in situ* de la CA (Lemaire, 1995; Baixauli y Aguilar, 2002), todos los anteriores fenómenos provocaron una baja actividad metabólica de la raíz que afectaría a la parte aérea y en consecuencia a la formación de los frutos (Taiz y Zeiger, 2010);

El mayor rendimiento lo obtuvo 'Festival', seguido de 'Monterey' y 'Camino Real' (Cuadro 15). Los rendimientos establecidos por la patente de cada cultivar como en el caso de Shaw *et al.* (2002), para el cultivar Camino Real ($1813 \text{ g}\cdot\text{planta}^{-1}$) indicó que se obtuvo este rendimiento en un periodo de 4 meses, aritméticamente al dividir el rendimiento total entre los meses se obtiene un rendimiento por mes de $453.2 \text{ g}\cdot\text{planta}^{-1}$; de esta manera se puede comparar los rendimientos con lo obtenido en el cultivo vertical ya que el periodo de cosecha este duró un mes; encontrando una reducción en el rendimiento en un 95 % respecto a la patente. Para los demás cultivares se realizó el mismo cálculo encontrando para los meses correspondientes, Shaw *et al.* (2009) obtuvo $550.16 \text{ g}\cdot\text{planta}^{-1}$ por mes para Monterey ($3301 \text{ g}\cdot\text{planta}^{-1}$ obtenido en 6 meses) teniendo una reducción de un 95 %, y Chandler (2004) para Festival con $175 \text{ g}\cdot\text{planta}^{-1}$ ($700 \text{ g}\cdot\text{planta}^{-1}$ obtenido en 4 meses) presentó una reducción de 34 %. Un bajo rendimiento por planta es observado en cultivo vertical en casi todas las investigaciones realizadas, pero que se ve compensado por la alta densidad de plantas que posee, en comparación con el cultivo en suelo o en sistemas hidropónicos de cultivo horizontal, provocando al

final un aumento en el rendimiento total por m^2 (Paraskevopoulou-Paroussi *et al.*, 1995; Rowley *et al.*, 2010; Ramírez, 2011; Villagra *et al.*, 2012; Resh, 2013).

El rendimiento obtenido del cultivo vertical, se puede comparar con los resultados obtenidos de diversos autores en los cuales la bolsa de cultivo vertical utilizadas ocupó siempre $1 m^2$. El número de plantas utilizadas por bolsa van de las 20 hasta 36 e incluso 50. 24 plantas m^{-2} es el valor más comúnmente utilizado Manios *et al.* (1985); Anagnostou y Vasilakakis (1995); Paraskevopoulou-Paroussi *et al.* (1995); Vlachonasios *et al.* (1995); Al-Raisy *et al.* (2010); Villagra *et al.* (2012), aunque hubo otros autores que utilizaron un mayor o menor cantidad de plantas por m^2 siendo el caso de Ramírez (2011) que ocupó 20 plantas m^{-2} , Rowley *et al.* (2010) 21.5 plantas m^{-2} , Caso *et al.* (2009) 26 plantas m^{-2} , Takeda (1999); Al-Raisy *et al.* (2010) 28 plantas m^{-2} , Durner (1999) y Al-Raisy *et al.* (2010) 32 plantas m^{-2} , Özeke *et al.* (1999) y Linsley-Noakes *et al.* (2006) 36 plantas m^{-2} y Linsley-Noakes *et al.* (2006) hasta 50 plantas m^{-2} . En el experimento realizado a pesar de haber utilizado una cantidad menor de plantas para cada bolsa (14 plantas), el distanciamiento favoreció para que la densidad de plantación fuese 28.2 plantas m^{-2} .

Otro fenómeno acontecido en este sistema es el efecto de la densidad de plantación, donde a mayor densidad menor rendimiento por planta, sin embargo este fenómeno no puede demostrarse de una manera tan evidente ya que los diferentes estudios que se han llevado a cabo difieren en el clima, región, cultivar y sustratos dando resultados muy aleatorios, sin embargo los estudios realizados por Al-Raisy *et al.* (2010) y Linsley-Noakes *et al.* (2006) demostraron

que aumentando la altura del tubo vertical y adicionando plantas se aumenta la densidad de plantación generando que se disminuya el rendimiento por planta.

En los diferentes experimentos donde se utilizó un sistema vertical, existieran diversos periodos de cosecha, que difirieron entre estos por su duración, siendo unos más largos o cortos, pero que no presentaron alguna tendencia donde se demostrase que los periodos más largos se obtuviera mayor rendimiento (Anagnostou y Vasilakakis, 1995; Vlachonasios *et al.*, 1995; Paraskevopoulou-Paroussi *et al.*, 1995; Durner, 1999; Takeda, 1999; Özeker *et al.*, 1999; Linsley-Noakes *et al.*, 2006; Caso *et al.*, 2009; Al-Raisy *et al.*, 2010; Rowley *et al.*, 2010; Ramírez, 2011). Para homogeneizar los datos de las diversas investigaciones consultadas, se dividió el rendimiento total entre el número de meses de cosecha y poder compararlo con lo obtenido con lo obtenido en el experimento ya que este solo se estableció que fuera 1 mes de periodo de cosecha-

Al-Raisy *et al.* (2010) utilizó una densidad de 28 plantas·m⁻², casi idéntica a lo utilizado en el experimento, obtuvo resultados similares a lo obtenido para los 3 factores involucrados en el análisis (sustrato, nivel y cultivar) (Cuadro 15). Al realizar esta misma comparación pero con una densidad de 24 plantas m⁻² se encontraron valores también muy similares teniendo un intervalo de los 28 – 83 g planta (Anagnostou y Vasilakakis, 1995; Paraskevopoulou-Paroussi *et al.*, 1995; Vlachonasios *et al.*, 1995; Al-Raisy *et al.*, 2010; Villagra *et al.*, 2012;); e incluso los resultados obtenidos (57.45 g·planta⁻¹ por mes) por Ramírez (2011) con una densidad de 20 plantas m⁻² son similares sin importar el factor comparado (sustrato, nivel y cultivar) respecto a lo obtenido en el experimento

de cultivo vertical (Cuadro 15). Esto se repitió también para Caso *et al.* (2009) que con una densidad de 26 plantas m^{-2} obtuvo por mes un promedio de 75 – 124 g planta $^{-1}$ por mes siendo este un poco mayor a todos los anteriores. Densidades mayores como 32 plantas m^{-2} Durner (1999) presentó 91.9 g planta $^{-2}$ por mes, Özeker *et al.* (1999) con 36 plantas m^{-2} obtuvo de 28.8 – 35.6 g planta $^{-1}$, siendo esta baja a comparación de los anteriores autores mencionados, Al-Raisy *et al.* (2010) con 35.6 g planta $^{-1}$ obtenida de una densidad de 32 g planta $^{-1}$ siendo también baja como rendimiento. Linsley-Noakes *et al.* (2006) a pesar de tener densidades sumamente altas 36 – 50 plantas m^{-2} , obtuvo un rendimiento de 94.5 y 53 g planta $^{-1}$ respectivamente.

Un análisis general, demuestra que los resultados obtenidos, se encuentran dentro de un intervalo de valores ya obtenidos con anterioridad por diversos autores en diversas partes del mundo.

Los resultados obtenidos en el experimento de cultivo vertical (Cuadro 15) al expresarse en m^2 , con un intervalo de rendimiento promedio por mes de 40 a 60 g por planta multiplicando por la densidad de plantación ocupada (28.3 plantas m^{-2}) da un total de 1.132 a 1.698 $kg \cdot m^{-2}$ por mes, este resultado se extrapola por hectárea obteniéndose de 11.32 a 16.98 $ton \cdot ha^{-1}$ por mes; para ser nuevamente multiplicado por los meses de producción continua en México (que pueden ser anualmente de 8 meses) (Dávalos *et al.*, 2011), se obtiene 90.6 a 135.84 $ton \cdot ha^{-1}$, un rendimiento mayor al obtenido en suelo como se mencionó anteriormente tanto a nivel mundial (57.79 $ton \cdot ha^{-1}$ y 44.6 $ton \cdot ha^{-1}$) como nacional de (60 $ton \cdot ha^{-1}$ y 45 $ton \cdot ha^{-1}$), sin embargo, en rendimiento en

cultivo vertical a pesar de ser hasta más del doble que en suelo, requiere de mayor mano de obra, una inversión inicial más alta en los materiales utilizados y en su renovación-durabilidad hacen que sea muchísimo más costosa que las técnicas tradicionales en suelo, siendo esta técnica ideal para zonas o países que carezcan de producción de fresa o sea muy baja debido a principalmente a condiciones climáticas.

7.- CONCLUSIÓN

1. Los tres sustratos evaluados tuvieron un efecto similar en las características de la planta, estado nutrimental y en la calidad del fruto; pero en rendimiento y peso del fruto el Tez 100 fue el mayor. Los cultivares conservaron las características físicas de planta descritas en sus patentes; el orden por el vigor de la planta fue: las de 'Monterey' > 'Festival' > 'Camino Real'; el estado nutrimental de las plantas y la calidad de los frutos fueron semejantes en los tres cultivares. El rendimiento y peso por fruto tuvieron un mejor desempeño en las plantas de 'Festival', seguido por las de 'Monterey' y 'Camino Real'. Los frutos obtenidos en los tres cultivares fueron de tamaño mediano a pequeño.
2. Existen cambios físicos en todos los sustratos después de un ciclo de cultivo; sin embargo, en Tez 100 la capacidad de aireación se vio altamente disminuida en comparación con Tez 75 y Tez 50. Químicamente los sustratos, al final del ciclo de cultivo fueron similares y adecuados a lo requerido por el cultivo de fresa. A lo largo del tubo no se presentaron diferencias en las características químicas de sustratos, sin embargo, las diferencias físicas entre los niveles del tubo fueron mínimas.

8. LITERATURA CITADA

- Abad B., M.; Noguera M., P. Carrión B., C. 2004. Los sustratos en los cultivos sin suelo. *In: Tratado de cultivo sin suelo 3^{er} ed.* Urrestarazu, M. (ed.). Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. pp. 113 – 158.
- Adams, P. 2004. Aspectos del manejo de los diferentes sustratos, su comparación, elección y factores medioambientales a considerar. *In: Tratado de cultivo sin suelo 3^{er} ed.* Urrestarazu, M. (ed.). Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. pp. 239 – 262.
- Al-Raisy, F.S.; Al-Said, F.A.; Al-Rawahi, M.S.; Khan, I.A.; Al-Makhmari, S.M.; Mumtaz, M. 2010. Effects of column sizes and media on yield and fruit quality of strawberry under hydroponic vertical system. *European Journal of Scientific Research* 43(1): 48 – 60.
- Alcántar, G.G.; Sandoval V.M. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México. 156 p.
- Anicua, R.; Gutiérrez, M.C.; Sánchez G., P. 2008. Physical and micromorphological properties of organic and inorganic materials for preparing growing media. *Acta Horticulturae* 779: 577-582.
- Anagnostou, K.; Vasilakakis, M.D. 1995. Effect of substrate and cultivar on earliness, plant productivity, and fruit quality of strawberry. *Acta Horticulturae* 379: 267 – 274.

- AOAC Association of Official Analytical Chemistry. 1980. Official Methods of Analysis. 12th Ed. Washington, D.C. U.S.A. 1018 p.
- Asady, G. H.; Smucker, A. J. M.; ADAMS M.W. 1985. Seedling test for the quantitative measurement of root tolerances to compacted soil. *Crop Science*. 25: 802–806.
- Asao, T.; Kitazawa, H.; Ban, T.; Habibur, M.; Pramanik, R. 2008. Electrodegradation of root exudates to mitigate autotoxicity in hydroponically grown strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) plants. *HortScience* 43(7): 2034 – 2038.
- Awang, Y.B.; Atherton, J.G. 1995. Growth and fruiting responses of strawberry plants grown on rockwool to shading and salinity. *Scientia Horticulturae* 62: 25 – 31.
- Baixauli S., C. A.; Aguilar O., J. M. 2002. Cultivo sin Suelo de Hortalizas. Generalitata Valencia. Valencia, España. 110 p.
- Barker, A.V.; Pilbeam, D.J. 2007. Handbook of Plant Nutrition. Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, USA. pp. 3-18.
- Biela, M.M.; Nonnecke, G.R.; Graves, W.R.; Horner, H.T. 1999. High root-zone temperature inhibits strawberry reproductive and vegetative growth and development. *HortScience* 34(3): 326.

- Bieniasz, M.; Malodobry, M.; Dziedzic, E. 2012. The effect of foliar fertilization with calcium on quality of strawberry cultivars 'Luna' and 'Zanta'. *Acta Horticulturae* 926: 457 – 462.
- Blok, C.; De Kreijl, C.; Bass, R.; Wever, G. 2008. Analytical Methods Used in Soilless Cultivation. *In: Soilless Culture: Theory and Practice*. Raviv, M.; Lieth, J. H. (eds.). Elsevier. United States of America. pp. 245 – 290.
- Bosc, J.P.H.; Demene, M.N. 2009. Floral induction duration, plant architecture and fruit production relations in strawberry cv. 'Ciflorette'. *Acta Horticulturae* 842: 667 – 670.
- Camérón, J.S.; Hartlev, C.A. 1990. Gas exchange characteristics of *Fragaria chiloensis* genotypes. *HortScience* 25(3): 327 – 329.
- Caruso, G.; Villari, G. 2003. Effect of nutritive solution EC and shading on the "Fruit" quality of NFT-grown strawberry. *Acta Horticulturae* 614: 719 – 726.
- Caso, C.; Chang, M.; Rodríguez-Delfín, A. 2009. Effect of the growing media on the strawberry production in column system. *Acta Horticulturae* 843: 373 – 380.
- Chandler, C.K. 2004. Strawberry plant named 'Monterey'. US PP14, 739 P2.
- Chaturvedi, O.P.; Singh, A.K.; Tripathi, V.K.; Dixit, A.K. 2005. Effect of zinc and iron on growth, yield and quality of strawberry cv. Chandler. *Acta Horticulturae* 696: 237 – 240.

- Chow, K.K.; Pric, T.V.; Hanger, B.C. 2002. Effects of nitrogen, potassium, calcium concentrations and solution temperatures on the growth and yield of strawberry cv. Redgauntlet in a nutrient film (NFT) hydroponic system. *Acta Horticulturae* 633: 315 – 327.
- Copettic, C.; Borges, G.S.; Barcelos-Oliver, J.L. 2012. Antioxidant activity and productivity of different strawberry cultivars (*Fragaria x ananassa* Duch.) produced in a hydroponic system. *Acta Horticulturae* 947: 369 – 374.
- Cordenunsi, B.R.; Oliveira, J.R.; Genovese, M.I.; Lajolo, F.M. 2002. Influence of cultivar on quality parameters and chemical composition of strawberry fruits grown in Brazil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50: 2581 – 2586.
- Cruz C., E.; Sandoval V., M.; Volke H., V.; Ordaz C., V.; Tirado T., J. L.; Sánchez E., J. 2010. Generación de mezclas de sustratos mediante un programa de optimización utilizando variables físicas y químicas. *Terra Latinoamérica*. 28(3): 219-229.
- Daugovish, O.; Larson, K.D. 2009. Strawberry production with protected culture in Southern California. *Acta Horticulturae* 842: 163 – 166.
- Dávalos G., P.A.; Aguilar G., R.; Jofre Y Garfias, A.E.; Hernández R., A.R.; Vázquez S., M.N. 2011. Tecnología para sembrar viveros de fresa. 1^a ed. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. D.F., México. 154 p.

- De Boodt, M.; Verdonck, O. 1972. The physical properties of the substrates in horticulture. *Acta Horticulturae* 26: 37-44.
- Drzal, M. S.; Fonteno, W. C.; D. K Cassel. 1999. Pore fraction analysis: a new tool for substrate testing. *Acta Horticulturae* 481:43-54.
- DURNER, E.F. 1999. Winter greenhouse strawberry production using conditioned plug plants. *HortScience* 34(4): 615 – 616.
- Economakis, C.D.; Krulis, L. 2002. Water and nutrient uptake by strawberry plants grown with the nutrient film technique (NFT) under different minimum solution temperatures. *Acta Horticulturae* 579: 405 – 410.
- El-Behairy, U.A.; Abou-Hadid, A.F.; Medany, M.A.; Awad, M.M. 2001. The effects of different cultivars, orientation and soilless culture systems on production and quality of strawberry. *Acta Horticulturae* 548: 59 – 64.
- Ellis, M.A.; Funt, R.C.; Wright, S.; Demchak, K.; Wahle, E.; Doohan, D.; Welty, C.; Williams, R.N.; Brown, M. 2006. *Midwest Strawberry Production Guide*. Bulletin 926. The Ohio State University. Ohio, USA 138 p.
- Favela C., E.; Preciado R., P.; Benavides M., A. 2008. *Manual para la preparación de soluciones nutritivas*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, México. 146 p.
- Fletcher, J.M., Tatsiopoulou, A.; Hadley, P.; Davis, F.J. 2004. Growth, yield and development of strawberry cv. 'Elsanta' under novel photoselective film clad greenhouses. *Acta Horticulturae* 633: 99 – 106.

- Food and Agriculture Organization Statistic (FAOSTAT). 2015
<http://www.faostat.fao.org> (consultado 2 de marzo 2015)
- Fonteno, W. 1994. Growing media. *In: Bedding plants IV, a manual on the culture of bedding plants as a greenhouse crop.* 4th ed. Holcomb E., J. (ed.). Ball publishing. Batavia, Illinois, USA. pp. 21 – 40.
- Galletta, G. J.; Bringhurst, R. S. 1990. Strawberry management. *In: Small Fruit Crop Management.* Galletta, G. J.; Himelrick, D. G.; Chandler, L. (eds.). Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey USA. pp. 83-156.
- Geater, C.A.; Nonnecke, G.R.; Graves, W.R.; Aiello, A.S.; Dilley, C.A. 1997. High root-zone temperatures inhibit growth and development of *Fragaria* species. *Fruit Varieties Journal* 51(2): 91 – 101.
- Giorlando, A. 1978. Fertilization and irrigation of strawberries in vertical cultivation. *Frutticoltura* 3-4: 23 – 30.
- Giorlando, A. 1979. Fertilization and irrigation of strawberries in vertical cultivation. *Frutticoltura* 5: 43 – 49.
- Giuffrida, F.; Leonardi, C.; NOTO, G. 2001. Response of soilless grown strawberry to different salinity levels in the nutrient solution. *Acta Horticulturae* 559: 675 – 680.
- Gregory, P. 2006. *Plant roots growth, activity and interaction with soils.* Blackwell publishing. Oxford, UK. 330 p.

- Haffner, K.; Vestrheim, S. 1997. Fruit quality of strawberry cultivars. *Acta Horticulturae* 439: 325 – 332.
- Hancock, J. F. 1999. *Strawberries*. CAB International Publishing. New York, USA. 237 p.
- Hassan, A.H., Khereba, A.H.; El-Kattan, M.H.; Noha, G.; El-Rahman, A. 2011. Effect of various organic substrate culture and container types on productivity and fruit quality of strawberry (*Fragaria x ananassa*) cv. Festival. *Research Journal of Agriculture and Biological sciences* 7(5): 379 – 387.
- Ikeda, T.; Yamazaki, K.; Kumakura, H.; Hamamoto, H. 2007. Effect of cooling of medium on fruit set in high-bench strawberry culture. *HortScience* 42(1): 88 – 90.
- Ikeda, T., Yamazaki, K.; Kumakura, H.; Hamamoto, H. 2009. Effect of high temperature on fruit quality of pot-grown strawberry. *Acta Horticulturae* 842: 679 – 682.
- Ingram, D.L., Henley, R.W.; Yeager, T.H. 1993. Growth media for container grown ornamental plants. Bulletin 241, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. 16 p.
- Janowski, G.; Skapski, H. 1980. A vertical soilless system of lettuce cultivation. *ISOSC proc.* pp. 493 – 499.

- Jones, J. B. 2005. Hydroponics: a practical guide for the soilless grower. 2nd CRC PRESS. United States of America. 423 p.
- Kafkafi, U. 2008. Functions of the root system. *In: Soilless Culture: Theory and Practice*. Raviv, M.; Lieth, J. H. (eds.). Elsevier. United States of America. pp. 13 – 61.
- Kapylov, V.I.; Pupova, L.N. 1985. Strawberry cultivars for vertical culture. *Sadovodsvo, Vinogradastro I Vinodelie Moldavii* 9: 31 – 32 (English abstract).
- Kaya, C.; Kirnak, H.; Higgs, D.; Saltali, K. 2002. Supplementary calcium enhances plant growth and fruit yield in strawberry cultivars grown at high (NaCl) salinity. *Scientia Horticulturae* 93: 65 – 74.
- Kepenek, S.; Koyuncu, F. 2002. Studies on the salt tolerance of some strawberry cultivars under glasshouse. *Acta Horticulturae* 573: 297 – 304.
- Keutegn, A.J.; Keutgen, N. 2003. Influence of NaCl salinity stress on fruit quality in strawberry. *Acta Horticulturae* 609: 155 – 157.
- Keutgen, A.; Pawelzik, E. 2007. Modifications of taste-relevant compounds in strawberry fruit under NaCl salinity. *Food Chemistry* 105: 1487 – 1494.
- Kiprijanovski, K.; Arson, T.; Duralija, B.; Cmelik, Z.; Gjamovski, V. 2009. Possibilities of out of season strawberry production in the republic of Macedonia. *Acta Horticulturae* 825: 357 – 362.

- Kirad, K.S.; Barche, S.; Singh, D.B. 2009. Response of integrated nutrient management in strawberry (*Fragaria x ananassa* D.). *Acta Horticulturae* 842: 653 – 656.
- Klougart, A.; Bagge, O. 1969. Nutrition of container plants. *Acta Horticulturae* 15:34-36
- Krüger, E.; Toldman-Anderson, T.; Dietrich, H. 2009. Climatic influence on strawberry yield, quality and bioactive compounds in different European cultivation conditions. *Acta Horticulturae* 842: 903 - 906.
- Lamarre, M.; Lareau, M.J. 1997. Influence of nitrogen, potassium and magnesium fertilization on day-neutral strawberries in Quebec. *Acta Horticulturae* 439(2): 701 – 704.
- Lemaire, F. 1995. Physical, chemical and biological properties of growing medium. *Acta Horticulturae* 396: 273-284.
- Lieten, F. 1997. Effects of chilling and night-break treatment on greenhouse production of 'Elsanta'. *Acta Horticulturae* 439(2): 633 – 640.
- Lieten, P. 2002. The effect of humidity on the performance of greenhouse grown strawberry. *Acta Horticulturae* 567: 479 – 482.
- Linsley-Noakes, G.; Wilken, L.; De Villiers, S. 2006. High density, vertical hydroponics growing system for strawberries. *Acta Horticulturae* 708: 365 – 370.

- Lynch, J.; Marschner, P.; Rengel, Z. 2012. Effect of internal and external factors on root growth and development. *In: Marschner's mineral nutrition of higher plants 3rd ed.* Marschner, P. (ed.). Ed. Elsevier. United States of America. pp. 331 – 346.
- Maher, M.; Prasad, M.; Raviv, M. 2008. Organic soilless media components. *In: Soilless Culture: Theory and Practice.* Raviv, M.; Lieth, J. H. (eds.). Ed. Elsevier. United States of America. pp. 459 – 504.
- Manios, V.I. 1984. The vertical cultivation of strawberries in a greenhouse. *Agric. Subjects 2: 53 – 57.*
- Manios, V.I.; Kritsotakis, K.G.; Papadimitriou, D.M. 1985. Vertical cultivation of strawberries in greenhouse on substrates of pumice-stone with several composts. *Agric. Res. 9(1): 52 – 63.*
- Marfa, O.; Ramos, T.; Jover, M.; Savé, R. 1986. Vertical bag system used for mother foliage pot plants culture effects of substrates. *Acta Horticulturae 178: 245 – 256.*
- Martínez-Bolaños, M.; Nieto-Ángel, D.; Téliz-Ortíz, D.; Rodríguez-Alcázar, J.; Martínez-Damián, M.A. T.; Vaquera-Huerta, H.; Carrillo-Mendoza, O. 2008. Comparación cualitativa de fresas (*Fragaria x ananassa* Duch.) de cultivares mexicanos y estadounidenses. *Revista Chapingo Serie Horticultura 14(2): 113 – 119.*

- Mannini, P.; Anconelli, S. 1993. Leaf temperature and water stress in strawberry. *Acta Horticulturae* 345: 55 – 61.
- Martínez, F.; Castillo, S.; Pérez, S.; Carmona, E.; Ordovás, J.; Avilés, M. 2005. Effect of different soilless growing systems on biological properties of growth media in strawberry. *Acta Horticulturae* 697: 417 – 423.
- Martínez, F. X.; Burés, S.; Blanca, F.; Yuste, M. P.; Valero, J. 1991. Experimental and theoretical air/water ratios of different substrate mixtures at container capacity. *Acta Horticulturae* 294: 241-248.
- Marshall, P. D. 2002. Environmental sensing and directional growth of plants roots. *In: Plant roots the hidden half 3rd ed.* WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKFI, U. (eds.) CRC Press. New York, USA. pp. 471 – 487.
- Michel, J. C. 2007. Physical properties of growing media: state of the art and future challenges. *Acta Horticulturae* 819: 65-72.
- Milivojevic, J., Nikolic, M.; Durovic, D. 2009. The influence of growing system on cropping potential of strawberry cultivar 'Clery' grown in plastic tunnel. *Acta Horticulturae* 842: 115 – 118.
- Moor, V.; Poldma, P.; Tonutare, T.; Karp, K.; Starast, M.; Vool, E. 2009. Effect of phosphite fertilization on growth, yield and fruit composition of strawberries. *Scientia Horticulturae* 119: 264 – 269.
- Morard, P. 1985. Nutritional control of strawberries hydroponically grown in vertical columns using percolate analysis. *ISOSC Proc.* pp. 393 – 400.

- Morgan, J.V. 1974. A high density cropping system for glasshouse crops. ISOSC, Proc. pp. 106.
- Neal, J.; Wagner, D. 1983. Physical and chemical properties of coal cinder as a container media component. HortScience 18(5): 693-695.
- Neocleous, D. 2012. Effects of cultivars and coc-substrates on soilless strawberry production in Cyprus. Journal of Berry Research 2: 207 – 213.
- Neocleus, D.; Vasilakakis, M. 2012. Effects of cultivars and substrates on soilless strawberry production in Cyprus. Acta Horticulturae 926: 435 – 440.
- Nimah, M.N.; Bashour, I.; Corbani, K.; Yanni, S. 2004. Water and land productivity under conventional versus vertical cultivation. Acta Horticulturae 664: 437 – 443.
- Pádua, J.G.; Duarte F., J.; Caproni, C.M. 2009. Physical-chemical characterization of strawberry cultivars. Acta Horticulturae 842: 891 – 894.
- Paranjpe, A.V.; Cantliffe, D.J.; Stoffella, P.J.; Stoffella, P.J., Lamb, E.M.; Powell, C.A. 2008. Relationship of plant density to fruit yield of 'Sweet Charlie' strawberry grown in a pine bark soilless medium in a high-roof passively ventilated greenhouse 115(2): 117 – 123.

- Paraskevopoulou-Paroussi, G.; Paroussis, E.; Grafiadellis, M. 1995. Precocity, plant productivity and fruit quality of strawberry plants grown in soil and soilless culture. *Acta Horticulturae* 408: 109 – 117.
- Pérez, M.; Carw, J.; Battey, N. 2005. Efecto de la densidad de plantación sobre el crecimiento vegetativo y reproductivo de la fresa cv. Elsanta. *Bioagro* 17(1): 11 – 15.
- Petralia, S.; D' Amore, R.; Perrella, C. 1982. Substrati per la fragola in coltura verticale. *Colt. Protette* 2: 39 – 44.
- Prasad, M; Ní Chualáin, D. 2004. Relationship between particle size and air space of growing media. *Acta Horticulturae* 648: 161-166.
- Prasad, M. And Maher, M.J. 2004. Stability of peat alternatives and use of moderately decomposed peat as a structure builder in growing media *Acta Horticulturae* 648: 145–151.
- Qureshi, K.M.; Hassan, F.U.; Hassan, Q.U.; Qureshi, U.S.; Chughtai, U.S.; Saleem, A. 2012. Impact of cultivation systems on growth and yield of strawberry (*Fragaria x ananassa*) cv. 'Chandler'. *Pakistan Journal of Agricultural Research* 25(2): 39 – 45.
- Özeker, E.; Eltez, R.Z.; Tüzel, Y.; Gül, A.; Önal, K.; TANRISEVER, A. 1999. Investigations on the effects of different growing media on the yield and quality of strawberries grown in vertical bags. *Acta Horticulturae* 486: 409 – 413.

- Ramírez G., H. 2011. Sistemas de producción de fresa de altas densidades. Tesis de maestría en ciencias en edafología. Colegio de postgraduados. México. 89 p.
- Rahimi, A.; Biglarifard, A.; Mirdehgham, H.; Borghei, S.F. 2011. Influence of NaCl salinity on growth analysis of strawberry cv. Camarosa. *Journal of Stress physiology* 7(4): 145 – 156.
- Rahimi, A.; Biglarifard, A. 2011. Influence of NaCl salinity and different substrates on plant growth, mineral nutrient assimilation and fruit yield of strawberry. *Notulae Botanicae Agrobotanici Cluj-Napoca* 39(2): 219 – 226.
- Resh, M. H. 2013. *Hydroponic Food Production. A definitive guidebook for the advanced home gradener and the commercial hydroponic grower.* 7th ed. CRC Press. Boca Ratón. 287 p.
- Rodríguez D., E.; Salcedo P., E.; Rodríguez M., R.; González E., D. R.; Mena M., S. 2013. Reúso del tezontle: efectos en sus características físicas y en la producción de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Terra latinoamericana.* 31(4): 275-284.
- Rowley, D.; Black, B.L.; Drost, D. 2010. Early-season extension using June-bearing 'Chandler' strawberry in high-elevation high tunnels. *HortScience* 45(10): 1464 – 1469.

- Runkle, E. 2006. Light it up!, Technically speaking. Greenhouse product news magazine. 15 p.
- Saied, A.S.; Keutgen, N.; Noga, G. 2003. Effects of NaCl stress on leaf growth, photosynthesis and ionic contents of strawberry cvs. 'Elsanta' and 'Korona'. *Acta Horticulturae* 609: 67 – 73.
- Saied, A.S.; Keutgen, A.J.; Noga, G. 2005. The influence of NaCl salinity on growth, yield and fruit quality of strawberry cvs. 'Elsanta' and 'Korona'. *Scientia Horticulturae* 103: 289 – 303.
- Sarooshi, R.A.; Cresswell, G.C. 1994. Effects of hydroponic solution composition, electrical conductivity and plant spacing on yield and quality of strawberries. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 34: 529 – 535.
- SAS Institute INC, 1998. SAS/STAT guide for personal computers. Version 8. Cary NC. USA 595.
- Schippers, P. A. 1978. A vertical hydroponics system in greenhouse lettuce. *Journal of American Vegetable Growers* 26: 20 – 21.
- Selamovska, A.; Nikolic, K. 2009. Effects of rosettes quality and ordering on yield potential in strawberry. *Acta Horticulturae* 825: 395 – 399.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2015. <http://www.siap.gob.mx> (consultado 2 de marzo 2015)

- Silber, A. 2008. Chemical characteristics of soilless media. *In: Soilless Culture: Theory and Practice*. Raviv, M.; Lieth, J. H. (eds.). Ed. Elsevier. United States of America. pp. 210 – 244.
- Singh, R.; Sharma, R.R.; Moretti, C.L.; Kumar, A.; Gupta, R.K. 2009. Foliar application of calcium and boron influences physiological disorder, fruit yield and quality of strawberry (*F. x ananassa* Duch.). *Acta Horticulturae* 842: 835 – 838.
- Sharma, R.R.; Singh, R. 2009. Gibberelic acid influences the production of malformed and button berries, and fruit yield and quality in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Scientia Horticulturae* 119: 430 – 433.
- Shaw, D.V.; Larson, K.D. 2002. Strawberry plant named 'Camino Real'. US PP13, 079 P2.
- Shaw, D.V.; Larson, K.D. 2009. Strawberry plant named 'Monterey'. US PP19, 767 P2.
- Short, S. 2011. The effects of supra-optimal root zone temperature and arbuscular mycorrhizal fungi on the phytonutritional quality and growth of red onion (*Allium cepa* L.) cv. 'Rossa di Milano' and strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) cv. 'Chandler'. Thesis Master of Science. The Ohio State University. EEUU. 64 p.
- Smith, B.R.; Mahr, D.L.; McManus, P.S.; Roper, T.R. 2006. Growing strawberries in Wisconsin. University of Wisconsin. USA. 25 pp.

- Sone, K.; Okimura, M.; Kitadani, E.; Mochizuki, T.; Noguchi, Y. 2009. Inheritance of fruit cluster characteristics associated with size and uniformity of fruit. *Acta Horticulturae* 842: 451 – 454.
- Sonneveld, C. 2004. La nutrición mineral y salinidad en los cultivos sin suelo: su manejo. *In: Tratado de cultivo sin suelo 3^{er} ed.* Urrestarazu, M. (ed.). Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. pp. 305 – 368.
- Sooneveld, C.; Voogt, W. 2009. *Plant Nutrition of greenhouse crops.* Springer. USA. 423 p.
- Steiner, A. 1984. *The Universal Nutrient Solution.* ISOC. Netherlands.
- Stevens, M.; Lea-Cox, J.D.; Black, B.L.; Abbott, J.A. 2007. A comparison of fruit quality and consumer preferences among three cold-climate strawberry production systems. *HortTechnology* 17(4): 586 – 591.
- Sturm, K.; Koron, D.; Stampar, F. 2003. The composition of fruit of different strawberry varieties depending on maturity stage. *Food Chemistry* 83: 417 – 422.
- Taghavi, T.S.; Ebrahimzadeh, H.; Rahemi, A. 2006. The effect of nitrate: Ammonium ratios on fruit quality of the strawberry cultivar 'Selva'. *Acta Horticulturae* 708: 313 – 318.
- Taiz, L. and E. Zeiger. 2010. *Plant physiology.* 5th edition. Sinauer Associates. USA. 675 p.

- Takeda, F. 1999. Strawberry production in soilless culture systems. *Acta Horticulturae* 481: 289 – 295.
- Trejo T., L. I.; Ramírez M., M.; Gómez M., F. C.; García A., J. C.; Baca C., G.A.; Tejeda S., O. 2013. Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5: 863-876.
- Tropea, M. 1976. Nutrient control in a new vertical hydroponic system. *L' Italia Agricole* 113.
- Tropea, M. 1980. The control of strawberry plant nutrition in sack culture. *ISOSC Proc.* 477 – 484.
- Urrestarazu G., M.; Salas S., M.C. 2004. Cultivos en sustratos alternativos. *In: Tratado de cultivo sin suelo 3^{er} ed.* Urrestarazu, M. (ed.). Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. pp. 669 – 700.
- Urrestarazu, M. 2004. Bases de los cultivos sin suelo. *In: Tratado de cultivo sin suelo 3^{er} ed.* Urrestarazu, M. (ed.). Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. pp. 3 – 48.
- Vega R., R. 2008. Manejo de la producción de fresa en hidroponía e invernadero. *In: Agronomía de la Fresa Principios y Nuevas Tecnologías.* Velázquez M., M. A.; Pimentel E., J. L. (eds.). Instituto Politécnico Nacional. D.F., México. pp. 141-159.

- Verdonck, O. 1983. Reviewing and evaluation of new materials used as substrates. *Acta Horticulturae*. 150: 467-473.
- Verhagen, J. B. G.M. 2009. Stability of growing media from a physical, chemical and biological perspective. *Acta Horticulturae* 819: 135-142.
- Vlachonassios, C.; Vasilakakis, M.; Dogras, C.; Mastrokostas, M. 1995. Out of season glasshouse strawberry production in north Greece. *Acta Horticulturae* 379: 305 – 312.
- Villagra, E.L.; Minervini, M.G.; Brandán, E.Z. 2012. Determination of response in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch. Camarosa) to different nutritions in conventional agriculture on soil and soilless in vertical sleeves. *Acta Horticulturae* 947: 173 – 178.
- Walch, R. 2008. Physical characteristics of soilless media. *In: Soilless Culture: Theory and Practice*. Raviv, M.; Lieth, J. H. (eds.). Elsevier. United States of America. pp. 41 – 116.
- Wang, S.Y.; Camp, M.J. 2000. Temperatures after bloom affect plant growth and fruit quality of strawberry. *Scientia Horticulturae* 85: 183 – 199.
- Yasunaga, I. 2008. Root zone aeration improves growth and yields of coir-cultured strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) during summer. *Acta Horticulturae* 779: 251 – 254.

Yuan, B.Z.; Sun, J.; Nishiyama, S. 2004. Effect of drip irrigation on strawberry growth and yield inside a plastic greenhouse. *Biosystems Engineering* 87(2): 237 – 245.

ANEXO

Cuadro 1A. Análisis de varianza para temperatura del sustrato (°C) utilizado en la producción hidropónica vertical de tres cultivares de fresa.

Mes	Sustrato	Nivel	Hora	S x N	S x H	N x H	SxNxH
Noviembre	*	*	*	ns	*	*	ns
Diciembre	*	*	*	ns	*	*	ns
Enero	ns	*	*	ns	ns	*	ns
Febrero	*	*	*	ns	*	*	ns
Marzo	*	*	*	*	*	*	*
Abril	*	*	*	ns	*	*	ns
Mayo	*	*	*	ns	ns	*	ns

*Efecto significativo, ns: no significativo

Cuadro 2A. Temperatura de sustrato (°C) por meses obtenido en la producción hidropónica vertical de tres cultivares de fresa.

	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Sustrato							
Tez 100	16.5±0.6 a ^z	16.9±0.5 a	16.9±0.8	19.5±0.7 a	23.1±0.6 ab	23.2±0.5 a	21.4±0.5 a
Tez 75	15.8±0.6 b	16.3±0.4 b	16.4±0.8	19.0±0.7 b	23.3±0.7 a	22.6±0.5 b	20.7±0.5 b
Tez 50	15.6±0.5 b	16.4±0.5 b	16.4±0.8	18.9±0.6 b	22.4±0.6 b	22.7±0.5 b	21.0±0.5 b
DMS	0.4	0.4	0.7	0.4	0.7	0.4	0.4
CV	8.63	10.38	11.57	8.10	11.98	6.43	6.05
Nivel							
Nivel alto	16.6±0.6 a	17.0±0.6 a	16.9±0.8 a	19.9±0.7 a	22.8±0.6 a	24.2±0.6 a	22.0±0.6 a
Nivel medio	15.9±0.6 b	16.5±0.5 b	16.6±0.8 ab	19.1±0.6 b	23.4±0.7 a	22.6±0.5 b	20.8±0.5 b
Nivel bajo	15.5±0.5 b	16.1±0.5 c	16.2±0.7 b	18.5±0.6 c	21.7±0.5 b	21.9±0.5 c	20.3±0.5 c
DMS	0.4	0.4	0.6	0.4	0.7	0.4	0.4
CV	8.63	10.38	11.57	8.10	11.98	6.43	6.05
Hora							
07:00	8.0±0.1 d	8.4±0.1 d	6.7±0.2 d	9.2±0.1 d	12.7±0.2 d	13.9±0.1 d	14.8±0.2 d
10:00	13.3±0.2 c	14.1±0.1 c	11.8±0.2 c	14.3±0.1 c	19.0±0.2 c	19.8±0.2 c	18.9±0.2 c
13:00	19.5±0.3 b	19.7±0.1 b	21.2±0.3 b	24.2±0.3 b	27.9±0.3 b	28.0±0.3 b	24.0±0.3 b
16:00	23.2±0.3 a	24.0±0.3 a	26.5±0.4 a	28.8±0.3 a	32.2±0.5 a	29.7±0.2 a	26.3±0.3 a
DMS	0.5	0.5	0.7	0.5	0.9	0.5	0.4
CV	8.63	10.38	11.57	8.10	11.98	6.43	6.05

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación, Tez 100: Tezontle 100 %, Tez 75: Tezontle 3:1 Turba v/v, Tez 50: Tezontle 1:1 Turba v/v.

Cuadro 3A. Temperatura de sustrato (°C) obtenido en la producción hidropónica vertical de tres cultivares de fresa.

Sustrato	Nivel		Hora		
Tez 100	19.7±0.2 a ^z	Nivel alto	20.1±0.3 a	07:00	10.5±0.1 a
Tez 75	19.3±0.2 b	Nivel medio	19.4±0.2 b	10:00	16.0±0.1 b
Tez 50	19.2±0.2 b	Nivel bajo	18.7±0.2 c	13:00	23.7±0.1 c
DMS	0.2	DMS	0.2	16:00	27.4±0.2 d
CV	11.57	CV	11.57	DMS	0.3
				CV	11.57

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación, Tez 100: Tezontle 100 %, Tez 75: Tezontle 3:1 Turba v/v, Tez 50: Tezontle 1:1 Turba v/v.

Cuadro 4A. Temperatura de sustrato por cuatro diferentes horas del día en cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

	07:00	10:00	13:00	16:00
Tez 100	10.4±0.2 b ^z	16.6±0.2 a	24.7±0.3 a	28.1±0.3 a
Tez 75	10.4±0.2 c	15.9±0.2 c	23.9±0.3 b	28.0±0.5 a
Tez 50	10.8±0.2 a	16.1±0.2 b	23.4±0.3 c	27.0±0.3 b
DMS	0.04	0.1	0.1	0.6
CV	1.69	2.87	1.60	9.78

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación, Tez 100: Tezontle 100 %, Tez 75: Tezontle 3:1 Turba v/v, Tez 50: Tezontle 1:1 Turba v/v.

Cuadro 5A. Temperatura de sustrato (°C) en cuatro diferentes horas del día por nivel del tubo en cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

	07:00	10:00	13:00	16:00
Nivel alto	10.2±0.2 c ^z	16.6±0.2 a	25.2±0.3 a	28.5±0.3 a
Nivel medio	10.6±0.2 b	15.8±0.2 b	23.4±0.3 b	27.6±0.4 b
Nivel bajo	10.7±0.2 a	15.4±0.2 c	22.4±0.3 c	26.1±0.3 c
DMS	0.1	0.1	0.1	0.6
CV	2.52	3.76	1.60	9.78

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación.

Cuadro 6A. Resultados de intensidad luminosa (watts·m⁻²) por mes en cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Nivel							
Nivel alto	17.61±1.53 a ^z	29.92±1.72 a	42.21±2.91	60.38±3.33 a	64.26±3.69 a	61.74±2.92 a	59.49±3.31 a
Nivel medio	14.41±1.25 b	25.32±1.56 b	40.59±3.07	47.09±2.66 b	49.83±2.94 b	42.05±2.16 b	37.45±2.09 b
Nivelbajo	13.12±1.14 b	21.99±1.36 c	41.58±3.58	44.29±2.61 b	43.12±2.65 c	33.41±1.83 c	27.34±1.56 c
DMS	2.49	3.14	4.03	3.39	3.90	3.63	3.91
CV	45.65	50.84	31.96	25.19	29.99	30.94	27.7
Hora							
07:00	3.87±0.18 d	3.59±0.12 c	3.45±0.16 d	4.44±0.24 d	8.57±0.48 d	16.89±0.76 c	21.19±1.16 c
10:00	35.24±1.28 a	37.85±1.03 a	65.32±1.88 b	65.75±1.22 b	75.20±1.51 b	72.17±2.29 a	54.50±2.27 b
13:00	24.91±1.35 b	41.35±2.25 a	80.14±2.15 a	92.85±2.46 a	102.40±2.78 a	68.50±2.73 a	65.52±3.64 a
16:00	11.36±0.38 c	20.18±0.83 b	16.93±0.61 c	39.29±1.31 c	23.45±1.05 c	25.37±1.02 b	24.48±1.28 c
DMS	3.16	3.98	5.10	4.30	4.93	4.60	4.95
CV	45.65	50.84	31.96	25.19	29.99	30.94	27.7

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación.

Cuadro 7A. Resultados de la intensidad luminosa en cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

Nivel		Hora	
Nivel alto	48.69±1.21 a ^z	07:00	8.36±0.25 d
Nivel medio	37.47±0.96 b	10:00	58.34±0.72 b
Nivel bajo	32.79±0.90 c	13:00	68.55±1.16 a
DMS	1.83	16:00	23.35±0.41 c
CV	45.06	DMS	2.32
		CV	45.06

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación.

Cuadro 8A. Resultados de la Intensidad luminosa (watts·m⁻²) en cuatro diferentes horas del día por nivel del tubo.

	07:00	10:00	13:00	16:00
Nivel alto	16.96±0.99 a ^z	85.65±1.75 a	106.79±2.57 a	37.76±1.21 a
Nivel medio	10.73±0.56 b	64.31±1.11 b	79.00±2.33 b	25.81±0.88 b
Nivel bajo	7.86±0.35 c	55.80±1.09 c	67.81±2.38 c	21.27±0.84 c
DMS	1.14	2.67	3.27	1.13
CV	35.49	14.35	14.24	14.73

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación.

Cuadro 9A. Resultados de temperatura de hoja (°C) por mes en cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Nivel							
Nivel alto	15.7±0.6 a ^z	16.1±0.5 a	16.5±0.7 a	19.1±0.7 a	23.0±0.7 a	23.5±0.6 a	22.3±0.6 a
Nivel medio	14.4±0.5 b	15.1±0.4 b	15.5±0.7 b	17.9±0.6 b	21.7±0.6 b	21.8±0.5 b	20.9±0.5 b
Nivel bajo	13.6±0.5 c	14.3±0.4 c	14.9±0.7 c	17.1±0.6 c	20.9±0.6 c	21.1±0.5 c	20.6±0.5 b
DMS	0.5	0.4	0.6	0.4	0.6	0.5	0.4
CV	10.97	10.07	12.16	8.52	10.27	8.97	5.75
Hora							
07:00	5.9±0.1 d	6.4±0.1 d	5.0±0.2 d	5.5±0.2 c	9.5±0.2 d	11.8±0.1 d	13.6±0.2 d
10:00	15.4±0.4 c	16.0±0.2 c	13.9±0.3 c	17.7±0.2 b	23.5±0.3 c	23.5±0.3 c	23.7±0.3 b
13:00	18.9±0.4 a	18.9±0.2 b	21.2±0.3 b	24.5±0.3 a	28.6±0.3 a	29.0±0.3 a	25.7±0.3 a
16:00	18.0±0.3 b	19.4±0.3 a	22.4±0.4 a	24.3±0.2 a	26.0±0.3 b	24.4±0.2 b	22.1±0.3 c
DMS	0.6	0.5	0.7	0.5	0.7	0.6	0.5
CV	10.97	10.07	12.16	8.52	10.27	8.97	5.75

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación.

Cuadro 10A. Resultados de temperatura de hoja (°C) obtenido en la producción hidropónica vertical de tres cultivares de fresa.

Nivel		Hora	
Nivel alto	19.5±0.3 a ^z	07:00	8.1±0.1 d
Nivel medio	18.2±0.2 b	10:00	19.1±0.2 c
Nivel bajo	17.5±0.2 c	13:00	23.9±0.2 a
DMS	0.2	16:00	22.5±0.1 b
CV	12.83	DMS	0.3
		CV	12.83

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación.

Cuadro 11A. Resultados de la temperatura de hoja (°C) en cuatro diferentes horas del día por nivel del tubo en cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

	07:00	10:00	13:00	16:00
Nivel alto	8.1±0.2 b ^z	20.6±0.3 a	25.7±0.3 a	23.7±0.2 a
Nivel medio	8.2±0.2 a	18.9±0.3 b	23.5±0.3 b	22.3±0.2 b
Nivel bajo	8.1±0.2 a	17.9±0.3 c	22.5±0.3 c	21.5±0.2 c
DMS	0.1	0.2	0.1	0.2
CV	3.11	4.45	2.40	3.73

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación.

Cuadro 12A. Resultados de oxígeno disuelto (ppm) y temperatura (°C) de solución nutritiva por mes utilizada en el cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Hora	[ppm]						
07:00	6.10±0.07 a ^z	6.07±0.06 a	5.96±0.09 a	5.53±0.08 a	4.95±0.10 a	4.67±0.09 a	4.94±0.09
10:00	5.83±0.06 b	5.69±0.06 b	5.58±0.10 b	5.23±0.09 b	4.61±0.09 b	4.31±0.09 b	4.74±0.08
13:00	5.67±0.05 c	5.61±0.06 b	5.31±0.05 c	5.00±0.09 c	4.36±0.08 c	4.21±0.08 b	4.70±0.08
16:00	5.85±0.04 b	5.74±0.07 b	5.59±0.10 b	5.27±0.09 b	4.67±0.09 b	4.56±0.07 a	4.89±0.09
DMS	0.10	0.17	0.14	0.12	0.20	0.16	0.27
CV	1.52	2.97	2.02	2.09	4.34	3.46	4.07
Hora	°C						
07:00	14.5±0.6 c	14.3±0.2 c	12.1±0.6 c	15.5±0.4 d	18.4±0.5 c	19.5±0.5 c	20.4±0.7 c
10:00	15.9±0.6 b	17.3±0.4 b	14.6±0.7 b	17.7±0.4 c	20.4±0.4 b	21.9±0.5 b	22.0±0.5 b
13:00	17.6±0.4 a	19.2±0.5 a	17.7±0.6 a	21.4±0.6 a	24.8±0.5 a	23.5±0.4 a	24.5±0.2 a
16:00	16.7±0.6 ab	18.4±0.6 ab	17.7±0.4 a	19.9±0.5 b	23.9±0.4 a	23.8±0.4 a	25.0±0.3 a
DMS	1.2	1.3	1.4	1.1	1.0	0.9	1.3
CV	6.54	7.94	7.39	5.37	4.87	4.12	3.93

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación.

Cuadro 13A. Resultados de oxígeno disuelto (ppm) y temperatura de solución nutritiva (°C) utilizada en la producción hidropónica vertical de tres cultivares de fresa.

Hora	[ppm]	(°C)
07:00	5.46±0.1 a ^z	16.4±0.3 d
10:00	5.13±0.1 c	18.6±0.3 c
13:00	4.97±0.1 d	21.3±0.4 a
16:00	5.22±0.1 b	20.8±0.4 b
DMS	0.06	0.5
CV	3.12	6.43

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

Cuadro 14A. Resultado de pH y conductividad eléctrica (dS·m⁻¹) de la solución nutritiva utilizada en la producción hidropónica vertical de tres cultivares de fresa.

	pH	CE
Noviembre	5.64±0.02	1.90±0.02
Diciembre	5.68±0.05	1.98±0.03
Enero	5.67±0.02	1.92±0.02
Febrero	5.68±0.03	1.97±0.02
Marzo	5.68±0.04	2.02±0.02
Abril	5.70±0.03	2.10±0.01
Mayo	5.65±0.03	2.19±0.02

Cuadro 15A. Análisis de varianza de las características de la planta de fresa obtenido en cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

	LP (cm)	GP (mm)	PS (g)	PSA (g)	PSR (g)	PSA/PSR	AF (cm ²)
Sustrato	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Nivel	ns	ns	*	*	*	*	*
CV	*	*	*	*	ns	*	*
S x N	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
S x CV	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
N x CV	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S x N x CV	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

*Efecto significativo, ns: no significativo

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación, LP: Longitud de peciolo (cm), GP: Grosor de peciolo, PS: Peso seco por planta, PSA: Peso seco aéreo por planta, PSR: Peso seco raíz por planta, PSA/PSR: Peso seco aéreo por planta/ Peso seco raíz por planta, AF: Área foliar, S: Sustrato, N: Nivel, CV: Cultivar.

Cuadro 16A. Resultados de las características físicas de la planta obtenidas al finalizar el periodo del cultivo hidropónico vertical de tres cultivares de fresa.

Factor	LP (cm)	GP (mm)	PS (g)	PSA (g)	PSR (g)	PSA/PSR	AF (cm ²)
Tez 100	8.8±0.4 b ^z	1.8±0.1	8.1±0.6	6.7±0.5	1.4±0.1	4.58±0.30	564.56±41.44
Tez 75	9.9±0.4 ab	1.8±0.1	8.4±0.8	7.0±0.7	1.4±0.1	4.95±0.25	604.78±48.78
Tez 50	10.8±0.7 a	2.0±0.1	8.0±0.7	6.6±0.6	1.5±0.1	4.34±0.39	618.16±55.60
DMS	1.7	0.4	2.1	1.8	0.4	0.8	152.47
CV	25.67	33.81	39.75	41.43	39.15	27.80	38.97
Nivel alto	9.0±0.7	1.8±0.1	9.6±0.9 a	7.9±0.7 a	1.7±0.1 a	4.30±0.33 b	639.85±56.13 a
Nivel medio	10.4±0.5	2.0±0.1	8.6±0.6 a	7.2±0.6 a	1.4±0.1 ab	5.21±0.30 a	661.90±47.79 a
Nivel bajo	10.2±0.4	1.7±0.1	6.3±0.4 b	5.1±0.4 b	1.1±0.1 b	4.35±0.30 b	485.75±33.24 b
DMS	1.7	0.4	2.1	1.8	0.4	0.8	152.47
CV	25.67	33.81	39.75	41.43	39.15	27.80	38.97
Camino Real	8.8±0.4 b	1.6±0.1 b	6.2±0.6 b	4.9±0.6 b	1.3±0.1	3.57±0.31 b	450.98±46.93 b
Monterey	11.6±0.6 a	2.2±0.1 a	9.5±0.6 a	8.0±0.6 a	1.5±0.1	5.49±0.22 a	693.66±38.91 a
Festival	9.2±0.4 b	1.8±0.1 ab	8.8±0.7 a	7.3±0.6 a	1.5±0.1	4.80±0.30 a	642.87±47.65 a
DMS	1.7	0.4	2.1	1.8	0.4	0.8	152.47
CV	25.67	33.81	39.75	41.43	39.15	27.80	38.97

^zValores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

DMS: Diferencia LP: Longitud de peciolo (cm), GP: Grosor de peciolo, PS: Peso seco por planta, PSA: Peso seco aéreo por planta, PSR: Peso seco raíz por planta, PSA/PSR: Peso seco aéreo por planta/ Peso seco raíz por planta, AF: Área foliar, Tez 100: Tezontle 100%, Tez 75: Tezontle 3:1 Turba v/v, Tez 50: Tezontle 1:1 Turba v/v.

Cuadro 17A. Análisis de varianza de las concentraciones de elementos en la planta al final de la producción hidropónica vertical de tres cultivares de fresa.

Factores	N	P	K	Ca	Mg	Na
	%					
Sustrato	ns	ns	*	ns	*	ns
Nivel	ns	*	*	ns	ns	*
CV	*	*	*	ns	*	*
S x N	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S x CV	ns	*	ns	ns	ns	ns
N x CV	ns	ns	ns	ns	ns	ns
S x N x CV	ns	ns	ns	ns	ns	ns

*Efecto significativo, ns: no significativo
S: Sustrato, N: Nivel, CV: Cultivar.

Cuadro 18A. Resultados de las concentraciones de elementos en la planta al final de la producción hidropónica vertical de tres cultivares de fresa.

Factores	N	P	K	Ca	Mg	Na
Sustrato				(%)		
Tez 100	2.00±0.05	0.50±0.02	0.94±0.02 c	0.73±0.02	0.41±0.01 b	0.09±0.010
Tez 75	2.03±0.07	0.51±0.03	0.98±0.03 b	0.75±0.03	0.44±0.01 a	0.09±0.004
Tez 50	2.02±0.05	0.50±0.02	1.08±0.02 a	0.72±0.03	0.45±0.01 a	0.09±0.004
DMS	0.18	0.11	0.07	0.09	0.02	0.01
CV	13.96	13.75	10.83	18.41	7.50	21.29
Nivel						
Nivel alto	2.02±0.06	0.44±0.02 b	0.95±0.02 b	0.74±0.03	0.43±0.01	0.07±0.003 c
Nivel medio	2.01±0.06	0.52±0.02 a	1.02±0.03 ab	0.73±0.03	0.43±0.01	0.09±0.005 b
Nivel bajo	2.03±0.06	0.55±0.02 a	1.04±0.03 a	0.73±0.02	0.43±0.01	0.10±0.003 a
DMS	0.18	0.11	0.07	0.09	0.02	0.01
CV	13.96	13.75	10.83	18.41	7.50	21.29
Cultivar						
Camino Real	2.12±0.05 a ²	0.43±0.02 c	0.98±0.02 b	0.71±0.02	0.46±0.01 a	0.10±0.006 a
Monterey	2.01±0.06 ab	0.60±0.02 a	1.08±0.03 a	0.78±0.03	0.44±0.01 a	0.08±0.003 b
Festival	1.92±0.05 b	0.49±0.02 b	0.93±0.02 b	0.71±0.02	0.39±0.01 b	0.08±0.003 b
DMS	0.18	0.11	0.07	0.09	0.02	0.01
CV	13.96	13.75	10.83	18.41	7.50	21.29

²Valores con la misma letra dentro de factor en cada columna son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05

DMS: Diferencia mínima significativa, CV: Coeficiente de variación, Tez 100: Tezontle 100 %, Tez 75: Tezontle 3:1Turba v/v, Tez 50: Tezontle 1:1 Turba v/v.

Cuadro 19A. Análisis de varianza acidez titulable (%), firmeza (lb), sólidos solubles totales (°Brix), relación sólidos solubles totales /acidez titulable en frutos de tres cultivares de fresa.

Factores	pH fruto	Acidez titulable	Firmeza	Sólidos solubles totales	SST/AT
Sustrato	*	*	ns	ns	*
Cultivar	ns	ns	*	ns	ns
S x CV	ns	ns	*	ns	ns

*Efecto significativo, ns: no significativo

S: Sustrato, CV: Cultivar, SST: Sólidos solubles totales, AT: Acidez titulable.

Cuadro 20A. Número de frutos por corte-planta⁻¹ obtenidos en la producción hidropónica vertical de fresa.

Fecha	Sustrato	Total	Nivel	Total	Cultivar	Total
15 de abril	Tez 100	0.7	Nivel alto	0.6	Camino Real	0.6
	Tez 75	0.4	Nivel medio	0.5	Monterey	0.1
	Tez 50	0.5	Nivel bajo	0.4	Festival	0.7
21 de abril	Tez 100	0.8	Nivel alto	0.7	Camino Real	0.8
	Tez 75	0.7	Nivel medio	0.8	Monterey	0.5
	Tez 50	0.6	Nivel bajo	0.6	Festival	0.8
25 de abril	Tez 100	0.7	Nivel alto	0.6	Camino Real	0.6
	Tez 75	0.7	Nivel medio	0.8	Monterey	0.7
	Tez 50	0.6	Nivel bajo	0.6	Festival	0.8
2 de mayo	Tez 100	1.1	Nivel alto	1.0	Camino Real	1.0
	Tez 75	1.0	Nivel medio	1.1	Monterey	0.8
	Tez 50	0.8	Nivel bajo	0.8	Festival	1.2
8 de mayo	Tez 100	1.0	Nivel alto	0.9	Camino Real	0.7
	Tez 75	0.8	Nivel medio	0.9	Monterey	0.6
	Tez 50	0.6	Nivel bajo	0.7	Festival	1.2
21 de mayo	Tez 100	1.8	Nivel alto	2.0	Camino Real	1.1
	Tez 75	1.7	Nivel medio	1.9	Monterey	2.0
	Tez 50	1.5	Nivel bajo	1.2	Festival	2.0

Tez 100: Tezontle 100 %, Tez 75: Tezontle 3:1 Turba v/v, Tez 50: Tezontle 1:1 Turba v/v..

Cuadro 21A. Rendimiento por corte-planta¹ (g) obtenidos en la producción hidropónica vertical de fresa.

Fecha	Sustrato	Total	Nivel	Total	Cultivar	Total
15 de abril	Tez 100	7.2	Nivel alto	5.9	Camino Real	6.5
	Tez 75	4.2	Nivel medio	5.2	Monterey	1.5
	Tez 50	4.6	Nivel bajo	5.0	Festival	8.0
21 de abril	Tez 100	9.9	Nivel alto	8.5	Camino Real	8.0
	Tez 75	8.9	Nivel medio	10.1	Monterey	7.1
	Tez 50	6.9	Nivel bajo	7.1	Festival	10.5
25 de abril	Tez 100	7.4	Nivel alto	5.4	Camino Real	4.8
	Tez 75	7.2	Nivel medio	8.7	Monterey	8.2
	Tez 50	6.5	Nivel bajo	7.0	Festival	8.0
2 de mayo	Tez 100	11.1	Nivel alto	8.0	Camino Real	7.9
	Tez 75	8.7	Nivel medio	10.6	Monterey	8.1
	Tez 50	6.2	Nivel bajo	7.5	Festival	10.1
8 de mayo	Tez 100	9.2	Nivel alto	7.6	Camino Real	4.9
	Tez 75	6.6	Nivel medio	7.2	Monterey	6.1
	Tez 50	4.3	Nivel bajo	5.2	Festival	9.1
21 de mayo	Tez 100	15.8	Nivel alto	17.7	Camino Real	8.1
	Tez 75	14.2	Nivel medio	16.6	Monterey	18.1
	Tez 50	13.2	Nivel bajo	9.0	Festival	17.0

Tez 100: Tezontle 100 %, Tez 75: Tezontle 3:1 Turba v/v, Tez 50: Tezontle 1:1 Turba v/v.

Cuadro 22A. Análisis de varianza para número de frutos totales·planta⁻¹, rendimiento total·planta⁻¹ y peso por fruto total·planta⁻¹ obtenido en la producción hidropónica vertical de fresa.

	Número de frutos totales·planta ⁻¹	Rendimiento totales·planta ⁻¹ (g)	Peso de fruto total·planta ⁻¹ (g)
Sustrato	ns	*	ns
Nivel	*	*	ns
Cultivar	*	*	*
SxN	*	*	ns
SxCV	ns	ns	ns
NxCV	ns	ns	ns
SxNxCV	ns	ns	ns

*Efecto significativo, ns: no significativo

S: Sustrato, N: Nivel, CV: Cultivar