



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN
EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

POSGRADO EN EDAFOLOGÍA

**MEZCLAS DE VERMICOMPOST Y TEZONTLE,
DISEÑADAS MEDIANTE UN PROGRAMA DE
OPTIMIZACIÓN EN SAS, PARA EL CULTIVO DE
TOMATE BAJO INVERNADERO E HIDROPONÍA**

ELIA CRUZ CRESPO

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE**

DOCTORA EN CIENCIAS

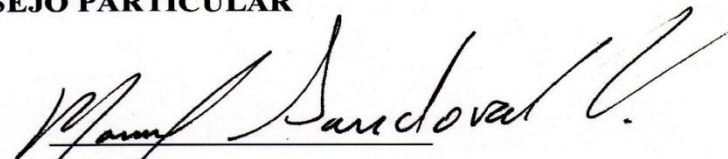
**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO
2010**

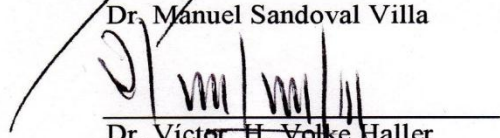
La presente tesis titulada: **Mezclas de vermicompost y tezontle, diseñadas mediante un programa de optimización en SAS, para el cultivo de tomate bajo invernadero e hidroponía**, realizada por la alumna: **Elia Cruz Crespo**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

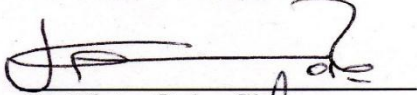
DOCTORA EN CIENCIAS


EDAFOLOGÍA

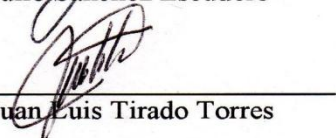
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: 
Dr. Manuel Sandoval Villa

Asesor: 
Dr. Víctor H. Volke Haller

Asesor: 
Dr. Víctor Ordaz Chaparro

Asesor: 
Dr. Julio Sánchez Escudero

Asesor: 
Dr. Juan Luis Tirado Torres

Montecillo, Texcoco, México, noviembre de 2010

MEZCLAS DE VERMICOMPOST Y TEZONTLE, DISEÑADAS MEDIANTE UN PROGRAMA DE OPTIMIZACIÓN EN SAS, PARA EL CULTIVO DE TOMATE BAJO INVERNADERO E HIDROPONÍA

Elia Cruz Crespo, Dra.
Colegio de Postgraduados, 2010

Uno de los aspectos más importantes para el manejo sustentable de los recursos productivos naturales es la incorporación de materia orgánica en el sistema de producción. En los sistemas hidropónicos se ha propuesto la sustitución de los medios de crecimiento no renovables, como turbas, por el uso de compost y vermicompost de materiales diversos. En tomate se ha demostrado que las mezclas con vermicompost influyen en el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos; sin embargo, la evaluación de las mezclas de sustratos en general, se han llevado a cabo mediante propuestas aisladas no sistematizadas. Por ello, los objetivos de la presente investigación fueron determinar a través de un programa de optimización en SAS, mezclas de vermicompost con tezontle que resulten en la mejora de las características físicas y químicas del sustrato para el crecimiento de tomate en invernadero; y reducir la fertilización inorgánica mediante la combinación del uso de mezcla de tezontle-vermicompost con fertilización química sin disminuir el crecimiento, rendimiento y calidad postcosecha de frutos de tomate. Esta investigación se llevó a cabo en dos etapas, realizadas en el Colegio de Postgraduados. En la primera etapa, se creó un programa de optimización en SAS para la obtención de mezclas de costo mínimo de dos sustratos (tres vermicompost y tezontle), para lo cual se caracterizaron cada uno de los materiales tanto en sus propiedades físicas (espacio poroso total, EPT) y capacidad de aireación, CA), como en sus propiedades químicas (materia orgánica, MO) considerando el costo de los materiales. Para estas propiedades se establecieron rangos de valores. El programa generó combinaciones de distintas proporciones entre el tezontle y cada una de las tres vermicompost que cumplieron con los valores determinados de las propiedades físicas y químicas. Se seleccionaron las mezclas con las proporciones 65-35 (porcentaje de tezontle y vermicompost), 75-25 y 85-15, para los tres tipos de vermicompost, las cuales se caracterizaron en el laboratorio para EPT, CA y MO, y los valores obtenidos se compararon con los dados por el programa SAS. Se encontró: para EPT, diferencias en 33.33% de las mezcla; para CA, no se detectaron diferencias; para MO, hubo diferencias en 55.56% de las mezclas, con valores mayores para el programa al igual que en EPT y CA. En general, las diferencias se consideraron aceptables. Se concluyó que el programa de optimización en SAS constituye una opción aceptable para la generación de mezclas de sustratos. En la segunda etapa de la investigación se evaluó tomate Charleston en invernadero, utilizando mezclas de tezontle (TE) y dos vermicompost (VCa y VCb) en la proporción 65:35 obtenidas mediante programa de optimización en SAS. Las mezclas correspondientes TE-VCa y TE-VCb, se combinaron con concentraciones porcentuales de solución nutritiva de Steiner: 0, 50, 75 y 100% en un diseño completamente al azar. También, se evaluó un tratamiento que consistió de solución de Steiner al 100% usando como sustrato sólo tezontle (S100TE). Se encontró que la solución nutritiva al 50% empleando como sustrato la mezcla de tezontle con vermicompost fue la más eficiente, ya que el rendimiento y calidad postcosecha no fue afectado en relación a cuando se utilizó solución de Steiner al 75 y 100%. En cambio, la concentración nutrimental, crecimiento, rendimiento y calidad de S100TE fue menor al no utilizar la vermicompost en el medio de crecimiento. Se concluyó que la mezcla tezontle-vermicompost 65:35, obtenida a través del programa de mezclas en SAS fue apta para el crecimiento y producción de plantas de tomate Charleston, la cual permitió a su vez la disminución de la fertilización inorgánica.

Palabras clave: crecimiento, nutrientes, calidad, solución de Steiner, fertilización inorgánica.

MIXTURES OF VERMICOMPOST AND TEZONTLE, DESIGNED THROUGH A OPTIMIZATION PROGRAM IN SAS FOR GROWING TOMATO UNDER GREENHOUSE AND HYDROPONICS

Elia Cruz Crespo, Dra.
Colegio de Postgraduados, 2010

One of the most important aspects to sustainable management of productive resources is the incorporation of organic material in the production system. In the hydroponical systems has been proposed the replacement of non-renewable growth media as peat, by the use of compost, vermicompost and various materials. In tomato crop it has been demonstrated that mixtures with vermicompost plus other materials influence growth, yield and quality of crops; however, evaluation of mixtures of substrates have been generally carried out by not systematized and isolated proposals. Therefore, the objectives of this research were to determine through a program of optimization in SAS, vermicompost with tezontle mixtures resulting in the improvement of the physical and chemical characteristics of the substrate for the growth of greenhouse tomato; and reduce inorganic fertilization by combining mixture of tezontle-vermicompost with chemical fertilization without reduction of growth, yield and post-harvest tomato fruit quality. This research was carried out in two stages, in College of Postgraduates. In the first stage, an optimization program was created in SAS to obtain mixtures of two substrates (three vermicompost and tezontle), least-cost for which characterized each of materials both in its physical properties (total porous space, EPT) and aeration, CA), as in their chemical properties (organic matter, MO) and also considering the cost of materials. Ranges of values for these properties were established. The program generated combinations of various proportions between the tezontle and each of the three vermicompost that met certain values of the physical and chemical properties. Selected mixtures with proportions 65-35 (percentage of tezontle and vermicompost), 75-25, 85-15 for three types of vermicompost, which were characterized in the laboratory for TPS, AC, OM, and the values obtained compared with the given by the SAS program. It was found: for TPS, differences in 33.33% of the mixture; for AC, not detected differences; for OM, there were differences in 56% of mixtures with values greater for the program as well as on TPS and AC. In general, the differences were considered acceptable. We concluded that SAS optimization program constitutes an acceptable option for the generation of mixtures of substrates. In the second stage of this research greenhouse tomato Charleston was assessed using tezontle mixtures (TE) and two vermicompost in proportion 65:35 (VCa and VCb) obtained through SAS optimization program. TE-VCa and TE-VCb corresponding mixtures were combined with percentage concentration of Steiner nutrient solution: 0, 50, 75 and 100% in a design completely at random. Also, it was evaluated a treatment consisting of Steiner solution 100% using only tezontle (S100TE) as substrate. It was found that the nutritive solution 50% using as substrate vermicompost tezontle mix was the most efficient, since the yield and post-harvest quality was not affected in comparison when Steiner solution was used at 75% and 100%. Instead, nutrient concentrations, growth, yield, and quality of S100TE fruit was lower when not using the vermicompost in the growing media. It was concluded that tezontle-vermicompost 65: 35 mix, obtained through the program mixtures in SAS, was suitable for growth and production of tomato Charleston, which in turn allowed to decrease inorganic fertilization.

Key words: growth, nutrients, quality, Steiner's nutrient solution, inorganic fertilization.

AGRADECIMIENTOS

Al pueblo de México, quien a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) hizo posible el financiamiento para realizar mis estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados y a la especialidad de Edafología por brindarme la oportunidad de llevar a cabo mi Doctorado.

A los Doctores Manuel Sandoval Villa, Víctor Hugo Volke Haller, Víctor Ordaz Chaparro, Julio Sánchez Escudero y Juan Luis Tirado Torres, por la dirección, apoyo y sugerencias para llevar a cabo la ejecución del trabajo y escritura de Tesis. También, les agradezco su valiosa y preciosa amistad y comprensión en todo momento; por su gran lado humano. **MÁS QUE MIL GRACIAS.**

Al Dr. Manuel Sandoval Villa, por haber sido un buen Consejero, profesor y amigo. Por su sinceridad, honestidad y espíritu de lucha.

Al Dr. Prometeo Sánchez García, por la amistad y apoyo brindado.

A la M.C. María Teresa de Jesús Luna Ojeda, M.C. Álvaro Can, M.C. Ibar Felipe Tlatilpa, Dr. Porfirio Juárez y M.C. Israel Castro quienes contribuyeron de una u otra manera en la realización del trabajo y por brindarme su invaluable amistad.

Al personal secretarial del área de Edafología, en especial a Laura Santamarina y Jaquelina; personal de Física de Suelos (Sr. Oscar) y Biblioteca del Colegio de Postgraduados (Sr Juanito, Mario, Lupita y Anita).

A toda aquella persona que me brindo palabras de aliento.

DEDICO LA PRESENTE TESIS

Al DR. IGNACIO PÉREZ CAMACHO[†], con especial cariño y amor, por haber estado conmigo y ser mi compañero de vida, por motivarme a realizar mis estudios doctorales, por el apoyo brindado en momentos difíciles, por la preocupación de que saliera adelante, por su gran sensibilidad y comprensión hacia los demás, por haber sido admirable profesor en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, pero sobre todo por haber sido maravilloso PADRE, el mejor Hijo, el mejor Hermano, un buen Amigo y el mejor Tío, en pocas palabras... un gran ser humano. Gracias por haber estado conmigo, aprendí mucho de ti...seguiré adelante.

A MI HIJA, SARA DANIELA PÉREZ CRUZ, por ser una princesita comprensiva, inteligente y valiente. Por todos los momentos de alegría. Por el apoyo y ánimo en momentos de tormenta. Por tu compañía todos los días, por tu linda e incomparable sonrisa y correr por la calle, por tus travesuras, por tus lindas y sabías palabras, por todo tu amor. Perdón, por las horas en las que no pude estar contigo. Para ti mi Princesita TODO MI AMOR. También es tu tesis doctoral.

A MÍ, DRA. ELIA CRUZ CRESPO, por haber terminado el presente trabajo, por todo el esfuerzo y tiempo invertido, por las horas de desvelo y ayuno, por no perder la esperanza y la fe. Por todos los obstáculos vencidos. Por seguir adelante, todo ello con el apoyo de CRISTO, mi salvador.

A MIS PADRES, Sra. Ana María Crespo, Sr. Demetrio Cruz, por darme la vida y por estar siempre conmigo.

A MIS HERMANOS, Claudia y Bernardo, por todos los momentos compartidos y apoyo.

A LA FAMILIA PÉREZ CAMACHO, por su fortaleza y palabras de apoyo en momentos difíciles, por tener especial preocupación por mi hija Sarita.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
2 OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivo General.....	4
2.1.1 Objetivos particulares	4
3 HIPÓTESIS.....	4
3.1 Hipótesis General	4
3.1.1 Hipótesis particulares.....	4
4 REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
4.1 Sustentabilidad de los Sistemas de Producción Agrícola.....	5
4.2 Compostaje y Vermicompostaje.....	7
4.3 Diferencias entre Compost y Vermicompost	7
4.3.1 Diferencias en propiedades físicas	8
4.3.2 Diferencias en propiedades químicas.....	8
4.3.3 Diferencias biológicas.....	10
4.4 Uso de la Vermicompost.....	11
5. LITERATURA CITADA.....	12
CAPÍTULO I. DISEÑO DE MEZCLAS DE SUSTRATOS A TRAVÉS DE UN PROGRAMA DE OPTIMIZACIÓN CON SAS, UTILIZANDO VARIABLES FÍSICAS Y QUÍMICAS.....	15
Resumen.....	15
1.1 INTRODUCCIÓN.....	16
1.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	17
1.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
1.4 CONCLUSIONES.....	35
1.5 LITERATURA CITADA.....	36
CAPÍTULO II. MEZCLA TEZONTLE-VERMICOMPOST OBTENIDA POR PROGRAMACIÓN, Y FERTILIZACIÓN INORGÁNICA EN EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE TOMATE EN INVERNADERO	38
Resumen.....	38

2.1 INTRODUCCIÓN	39
2.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	40
2.2.1 Producción en Invernadero	40
2.2.2 Diseño Experimental.....	42
2.2.3 Variables Evaluadas.....	42
2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
2.3.1 Concentración de Nutrientes.....	43
2.3.2 Lecturas SPAD	48
2.3.3 Crecimiento.....	50
2.3.4 Rendimiento	53
2.4 CONCLUSIONES	54
2.5 LITERATURA CITADA	55
CAPÍTULO III. CALIDAD DE TOMATE CULTIVADO BAJO INVERNADERO EN MEZCLA DE TEZONTLE:VERMICOMPOST, OBTENIDA POR PROGRAMACIÓN, Y FERTILIZACIÓN QUÍMICA.....	58
Resumen.....	58
3.1 INTRODUCCIÓN.....	59
3.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	60
3.2.1 Producción en invernadero.....	60
3.2.2 Diseño Experimental.....	62
3.2.3 Variables evaluadas.....	62
3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	63
3.3.1 pH de la pulpa.....	63
3.3.2 Sólidos solubles totales (SST).....	65
3.3.3. Acidez titulable.....	67
3.3.4 Firmeza	68
3.3.5 Pérdidas de peso y vida de anaquel.....	70
3.3.6 Color	71
3.4 CONCLUSIONES	74
3.5 LITERATURA CITADA.....	75

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES.....	78
1. Discusión General.....	78
2. Conclusiones generales.....	84
ANEXOS.	85

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Principales propiedades físicas y químicas de los materiales simples para la elaboración de mezclas mediante programación con SAS. Montecillo, Texcoco. 2007.....	21
Cuadro 2. Coeficientes de correlación entre variables físicas y químicas de los materiales simples utilizados en la elaboración de mezclas. Montecillo, Texcoco. 2007-2008.....	24
Cuadro 3. Programa de optimización con SAS para la generación de mezclas de dos materiales simples. Montecillo, Texcoco. 2007-2008.....	25
Cuadro 4. Mezclas de materiales calculadas con el programa de optimización SAS, utilizando Tezontle-Vermicompost de estiércol de bovino más desechos vegetales (TE-VC1). Montecillo, Texcoco. 2008.....	26
Cuadro 5. Mezclas de materiales calculadas con el programa de optimización SAS, utilizando Tezontle-Vermicompost de estiércol de bovino (TE-VC2). Montecillo, Texcoco.2008.....	27
Cuadro 6. Mezclas de materiales calculadas por el programa de optimización SAS, utilizando Tezontle-Vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café (TE-VC3). Montecillo, Texcoco. 2008.....	27
Cuadro 7. Propiedades físicas y químicas obtenidas en laboratorio de las tres combinaciones Tezontle- vermicompost en las proporciones 65-35, 75-25 y 85-15. Montecillo, Texcoco. 2007.....	29
Cuadro 8. Comparación de las propiedades físicas y químicas obtenidas en laboratorio y a través del programa SAS de las combinaciones TE-VC1, TE-VC2 y TE-VC3 en las proporciones 65-35, 75-25 y 85-15. Montecillo, Texcoco. 2008.....	30
Cuadro 9. Propiedades químicas obtenidas en laboratorio de las combinaciones TE-VC1, TE-VC2 y TE-VC3 en las proporciones 65-35, 75-25 y 85-15. Montecillo, Texcoco. 2008.....	33
Cuadro 10. Principales propiedades físicas y químicas de los materiales utilizados para la elaboración del sustrato. Montecillo, Texcoco. 2008.....	41
Cuadro 11. Composición nutrimental de las vermicompost evaluadas. Montecillo, Texcoco.2008.....	41
Cuadro 12. Comparación de medias para la concentración de nutrimentos en hoja de tomate Charleston, a los 70 días después de trasplante bajo invernadero, en función de los sustratos y la concentración de la solución de Steiner. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.....	45
Cuadro 13. Comparación de medias, entre tratamientos, para la concentración de macronutrimentos en hoja de tomate Charleston a los 70 días después de trasplante, cultivado bajo invernadero. Montecillo, Texcoco. Ciclo otoño-invierno 2008.....	46

Cuadro 14. Comparación de medias entre tratamientos para la concentración de micronutrientes en hoja de tomate Charleston a los 70 días después de trasplante, cultivado bajo invernadero. Montecillo, Texcoco. Ciclo otoño-invierno 2008.....	47
Cuadro 15. Comparación de medias para lecturas SPAD de hojas de cultivo de tomate Charleston a diferentes días después de trasplante (ddt) bajo invernadero, en función de los sustratos y la concentración de la solución de Steiner. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.....	49
Cuadro 16. Comparación de medias entre tratamientos de Lecturas SPAD de hojas de tomate Charleston, a diferentes días después de trasplante (ddt) bajo invernadero. Montecillo, Texcoco.Ciclo invierno 2008-2009.....	50
Cuadro 17. Comparación de medias de las variables de crecimiento y rendimiento de tomate Charleston, en función de los sustratos y la concentración de la solución de Steiner. Ciclo invierno 2008-2009.....	51
Cuadro 18. Comparación de medias entre tratamientos de las variables de crecimiento y rendimiento de tomate Charleston cultivado bajo invernadero. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.....	52
Cuadro 19. Principales propiedades físicas y químicas de los materiales utilizados para la elaboración del sustrato. Montecillo, Texcoco. 2008.....	61
Cuadro 20. Composición nutrimental de las vermicompost evaluadas. Montecillo, Texcoco. 2008.....	61
Cuadro 21. Comparación de medias de pH, sólidos solubles totales (SST) y acidez titulable de frutos de tomate Charleston cultivado bajo invernadero, en función de los sustratos y la concentración de la solución de Steiner. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.....	64
Cuadro 22. Comparación de medias, entre tratamientos, de pH, sólidos solubles totales (SST) y acidez titulable de tomate Charleston, cultivado bajo invernadero. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.....	65
Cuadro 23. Comparación de medias de firmeza y vida de anaquel de frutos de tomate Charleston cultivado bajo invernadero, en función de los sustratos y la concentración de la solución de Steiner. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.....	68
Cuadro 24. Comparación de medias, entre tratamientos, de firmeza y vida de anaquel de tomate Charleston cultivado bajo invernadero. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.....	69
Cuadro 25. Comparación de medias de luminosidad, hue y croma de frutos de tomate Charleston cultivados bajo invernadero, en función de los sustratos y la concentración de la solución de Steiner. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.....	72

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Curvas de humedad de las mezclas tezontle-vermicompost de estiércol de bovino más desechos vegetales (TE-VC1), vermicompost de estiércol bovino (TE-VC2) y tezontle-vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café (TE-VC3) para la proporciones a) 65-35 y b) 75-25.....32
- Figura 2. Curvas de humedad de las mezclas tezontle-vermicompost de estiércol de bovino más desechos vegetales (TE-VC1), vermicompost de estiércol bovino (TE-VC2) y tezontle-vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café (TE-VC3) para la proporción 85-15..... 32
- Figura 3. Interacción para la concentración de P en hojas de tomate bajo invernadero muestreadas a 70 días después de trasplante. SA = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos vegetales; SB = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos de jardinería..... 44
- Figura 4. Pérdidas de peso de frutos de tomate Charleston cultivados en mezcla de tezontle:vermicompost 65:35 y regados con diferentes soluciones nutritivas bajo invernadero, en el ciclo otoño-invierno 2008. S100 = solución de Steiner 100%; S75 = solución de Steiner 75%; S50 = solución de Steiner 50%; S0 = solución de Steiner al 0% (riego con agua)..... 71

INTRODUCCIÓN GENERAL

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La producción de hortalizas en México se caracteriza por ser intensiva, con una tasa de crecimiento media anual entre 2005 y 2009 de 5.3%, y por una alta concentración en pocas especies como: chile, tomate, melón, sandía, pepino fresa, papas y cebolla (El Financiero, 2010; El Informador, 2010).

En México, el tomate es la segunda especie hortícola con mayor importancia económica y social, dado que en el 2004 ocupó el 16% del valor total de las exportaciones agropecuarias y el 30% del total del sector hortícola (INEGI, 2005), además de la generación de empleos en la producción y comercialización.

A nivel mundial el tomate es la hortaliza más difundida y la de mayor valor económico, su demanda aumenta por las diversas formas en que puede ser consumido: en fresco, pasta, jugo y polvo, y por las propiedades anti cancerígenas que se le han conferido (Candelas-Cadillo *et al.*, 2006). De acuerdo con Franco (2004), los cinco principales países productores de tomate son: China, Estados Unidos de América, Turquía, India e Italia; mientras que entre los principales exportadores se encuentra: España, México, Holanda, Siria y Jordania (SIPAN, 2004).

En México, el rendimiento de tomate producido en campo es en promedio de 250 t ha⁻¹ año⁻¹ y su principal mercado es Estados Unidos, con el 99.6% de las exportaciones para consumo en fresco (ANCI, 2006).

Sin embargo, México ha venido perdiendo importancia en el mercado estadounidense, ante la competencia creciente de otros países como Canadá, Holanda, España e Israel (Franco, 2004). Según Cook y Calvin (2005), esto se debe a que éstos emplean estrategias tales como: 1) una mayor

tecnificación y uso de invernaderos, por ejemplo, en el 2003 del 100% del área de invernaderos dedicada a la producción agrícola entre los países miembros del TLC estuvo repartida en 42% para Canadá, 30% para Estados Unidos y 28% para México; 2) estos países tienen costos de producción menores a los de México. Asimismo, otros problemas observados en nuestro país es la dependencia externa en insumos como semilla, sustratos, fertilizantes y plaguicidas, así como la existencia de subdesarrollo tecnológico y la falta de recurso económico de los productores, entre otros (Osorio-Luna, 2006).

Por otra parte, existe una preocupación mundial por reducir la contaminación, conservar los recursos naturales, reducir el uso de materiales no renovables y de dar uso a los desechos orgánicos (Grigatti *et al.*, 2007). Al respecto, la creciente inquietud del consumidor de adquirir alimentos inocuos y la exigencia de cubrir la creciente demanda de alimentos ha llevado a establecer como alternativa el manejo de sistemas de producción sustentables, que además de promover prácticas que preservan los recursos naturales y la biodiversidad, permitan hacer uso eficiente y adecuado de los residuos que se derivan de las diversas actividades antropogénicas (Rippy *et al.*, 2004, Grigatti, 2007). Mahajan y Singh (2006) mencionan que la mejor alternativa para el uso eficiente de la tierra y de otros recursos, y lograr cubrir las demandas alimentarias es el uso de invernaderos por lo que su utilización ha aumentado.

Actualmente, hay algunos productores que han modificado algunas prácticas en su sistema de producción hidropónico usando materiales vermicompostados en mezcla con otros sustratos. Sin embargo, estas iniciativas no han tenido mucha consistencia y sistematización de los resultados, lo que ha generado gastos en recursos y tiempo. Aunado a lo anterior, en México son escasos los trabajos de investigación con uso de vermicompost y fertilización inorgánica en su efecto en la concentración nutrimental, crecimiento, rendimiento y calidad de tomate. Por todo lo anterior, en la presente

investigación se planteó el presente trabajo, el cual se dividió en tres fases: 1) Diseño de mezclas de sustratos a través de un programa de optimización con sas, utilizando variables físicas y químicas. 2) Mezcla tezontle-vermicompost obtenida por programación, y fertilización inorgánica en el crecimiento y rendimiento de tomate en invernadero. 3) Calidad de tomate cultivado bajo invernadero en mezcla de tezontle:vermicompost, obtenida por programación, y fertilización química.

Así se tuvo como objetivo general producir tomate en hidroponía bajo invernadero utilizando mezclas de vermicompost y tezontle, obtenidas mediante programación en SAS, que cumplan con propiedades físicas y químicas adecuadas, y aporten nutrimentos al cultivo

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Producir tomate en hidroponía bajo invernadero utilizando mezclas de vermicompost y tezontle, obtenidas mediante programación en SAS, que cumplan con propiedades físicas y químicas adecuadas, y aporten nutrimentos al cultivo.

2.1.1 Objetivos particulares

Determinar, a través de un programa de optimización en SAS, mezclas de vermicompost con tezontle que resulten con características físicas y químicas adecuadas para el cultivo de tomate en hidroponía bajo invernadero.

Reducir la fertilización química mediante la aplicación de vermicompost en mezcla con tezontle en el cultivo de tomate en hidroponía bajo invernadero, sin disminuir crecimiento, rendimiento y calidad postcosecha de fruto.

3 HIPÓTESIS

3.1 Hipótesis General

A través del programa de optimización en SAS, se pueden obtener mezclas de vermicompost y tezontle, apropiados para el cultivo del tomate en hidroponía bajo invernadero, las cuales con la aplicación simultánea de la fertilización inorgánica puede disminuirse la cantidad de ésta.

3.1.1 Hipótesis particulares

Mediante el uso de un programa de optimización en SAS se generan mezclas de sustrato tezontle-vermicompost con propiedades físicas y químicas, aptas para la producción de tomate en hidroponía bajo invernadero.

El uso de proporciones adecuadas de mezcla de tezontle-vermicompost con la aplicación simultánea de la fertilización inorgánica permite aminorar la concentración de ésta en solución, sin disminuir crecimiento, rendimiento y calidad postcosecha de frutos de tomate en hidroponía bajo invernadero.

4 REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Sustentabilidad de los Sistemas de Producción Agrícola

En los diferentes sistemas de producción agrícola convencional se ha logrado el incremento de la producción, conseguido éste a través del incremento de superficies cultivadas o por el uso intensivo de insumos agrícolas (Gliessman, 2002). Estos insumos incluyen, entre otros, fertilizantes y plaguicidas químicos, uso de semillas híbridas, energía usada para fabricar esos materiales y el combustible necesario para operar maquinaria agrícola diversa, los cuales son externos al sistema agrícola.

El uso intensivo de los diferentes insumos, aunque ha permitido ganancia al agricultor, también ha tenido un impacto en el ambiente natural y en especial sobre los recursos productivos no renovables: suelo, agua y biodiversidad (Gliessman, 2002).

Actualmente, existe la necesidad de conservar tales recursos. Por lo que se requiere generar sistemas sustentables de producción de alimentos, a través de prácticas del cultivo basadas en el conocimiento adecuado y profundo de los procesos ecológicos que suceden tanto en las parcelas de producción como en el contexto de las cuales son parte (Gliessman, 2002). Al respecto Stoffella y Kahn (2005) definen que la agricultura sustentable es “la utilización a largo plazo de los recursos sin degradación”. Por su parte, Romero (2000) y Romero *et al.* (2000) señalan a la agricultura sustentable como “aquella en la que la producción ha de ser lograda mediante la noción del efecto de las actividades humanas realizadas en ella para con el ambiente y las especies a largo plazo, ajustándose a los principios de ser ecológicamente sana, económicamente viable, socialmente justa y humana, en la que se encuentran

cobijados diversas prácticas y sistemas, que además buscan lo mejor de la agricultura tradicional y de los avances científicos y tecnológicos”.

Por su parte Gliessman (2002) indica que los sistemas de producción agrícola no pueden ser sustentables mientras dependan de insumos externos, dado que los recursos naturales de los cuales provienen los insumos son no renovables. Además de que la dependencia a insumos externos hace al agricultor vulnerable a la oferta de insumos, a las fluctuaciones de mercado y al incremento de los precios. En los sistemas de producción no convencionales (invernadero-cultivo sin suelo) al igual que los convencionales, el suministro de insumos es externo al sistema y aunque su uso es menor, no dejan de tener impacto ambiental. Así, ante la necesidad de generar sistemas sustentables es importante revisar los sistemas de producción bajo cubierta, ya que podrían ofrecer alternativas importantes de manejo.

El incremento en la producción de alimentos mediante el manejo de nutrición integrada, que incluye el reciclaje de residuos vegetales y animales, es consecuencia del interés generado por hacer sustentables los sistemas productivos en el largo plazo y por la obtención de alimentos más sanos (Tuzel *et al.*, 2003; Márquez y Cano, 2005), además de minimizar la contaminación ambiental. Existe un gran volumen de desechos orgánicos que no se utilizan y representan una fuente muy importante de materia prima para diversos fines como para la obtención de sustratos (Benito *et al.*, 2006). Entre estos se encuentran los residuos provenientes de la industria agroalimentaria tales como: el orujo de uva, malta, cascarilla de arroz y bagazo de agave tequilero; los de la explotación forestal: corteza, aserrín y corcho; los de la explotación agrícola: rastrojos, restos de podas, bagazo de caña, fibra de coco) y de la explotación ganadera: estiércoles, entre otras (Velasco, 2002; Stoffella y Kahn, 2005). Sin embargo, muchos de esos materiales orgánicos deben someterse a un proceso de compostaje, para su adecuación como sustratos (Burés, 1997). Actualmente, también se utiliza el vermicompostaje, con el mismo fin, en el cual intervienen lombrices para la transformación de los materiales orgánicos.

4.2 Compostaje y Vermicompostaje

El compost es el producto obtenido por descomposición aeróbica, bajo condiciones controladas, de residuos orgánicos como restos vegetales, animales, excrementos y purines que se someten a un tratamiento hemofílico (45 a 65 °C) para la degradación y estabilización del material, en donde se lleva a cabo la reproducción masiva de bacterias y otros microorganismos aerobios que están presentes en forma natural en cualquier lugar. Normalmente, se trata de evitar en lo posible la putrefacción de los residuos orgánicos por exceso de agua, que impide la aireación-oxigenación y crea condiciones biológicas anaeróbicas “malolientes” (Pereira y Zezzi-Arruda, 2003; Raviv, 2005).

Por otra parte, la vermicompost es el producto de la bioxidación acelerada de materia orgánica que ya ha pasado por una fase termófila, mediante el uso de una alta densidad de población de lombrices de tierra (Domínguez *et al.*, 1997). La vermicompost es el resultado de un proceso que consiste en la bioxidación acelerada y estabilización de los materiales orgánicos a través de la acción desintegradora conjunta de lombrices y microorganismos, que lo convierten en un material humificado y mineralizado.

Hoy en día, las especies de lombrices composteras más difundidas son: *Eisenia foetida*, *Eisenia andrei*, *Eudrilus eugeniae*, *Perionyx excavatus*, aunque *E. foetida* o lombriz roja californiana es considerada como la más eficiente para el vermicompostaje (Sánchez-Hernández *et al.*, 2006).

4.3 Diferencias entre Compost y Vermicompost

El proceso de elaboración es una de las diferencias entre un producto y otro, ya que en el caso de la vermicompost, la materia orgánica de la que se alimentan las lombrices, ya ha pasado por una etapa de acondicionamiento de los residuos, la cual implica una fase termófila; pero además, las compost y vermicompost poseen propiedades físicas, químicas y biológicas en las cuales también pueden diferir.

Algunos autores han comparado éstas propiedades entre ambos productos, encontrando para algunas características resultados de contraste cuando se han utilizado las mismas materias primas.

4.3.1 Diferencias en propiedades físicas

Porosidad. La vermicompost tiene más porosidad total y mayor porosidad de aire que el compost (Edwards y Burrows, 1988; Frederickson *et al.*, 2007).

Retención de humedad. El tamaño de partícula en la vermicompost es más fino por lo que tiene mayor área superficial y en consecuencia mayor retención de agua en comparación al compost (Domínguez *et al.*, 2003; Frederickson *et al.*, 2007). En estudios por Atiyeh *et al.* (2000a) y Hashemimajd *et al.* (2004) la vermicompost mostró mayor retención de agua que la compost, ambas elaboradas de los mismos materiales.

El menor tamaño de partícula de la vermicompost en relación al compost se debe a que la acción de las lombrices en el proceso de compostaje es de tipo físico/mecánico y bioquímico. Los procesos físicos o mecánicos incluyen: aireación, mezclado, y la molienda del material (Buck *et al.*, 2000); sin embargo, el proceso bioquímico es realizado por la descomposición microbiana de éste en el intestino de las lombrices (Ndegwa *et al.*, 2000).

4.3.2 Diferencias en propiedades químicas

Nutrimientos. En el vermicompostaje se ha encontrado que tanto la velocidad de mineralización del N como los índices de conversión del N-NH_4^- a N-NO_3^- aumentan (Atiyeh *et al.*, 2002; Nikita *et al.*, 2007). Esto coincide con lo encontrado por Tognetti *et al.* (2005) donde al comparar el contenido de la concentración de N total y N-NO_3^- fue mucho más alto en vermicompost que en compost, ambos elaboradas de las mismas materias primas. Garg *et al.* (2006) encontró que el N aumentó durante el

vermicomposteo en comparación con los compost, empleando desechos de gallina, fibras y desechos agroindustriales.

Potencial de hidrógeno (pH). Es probable encontrar un pH más alcalino en las vermicompost, puesto que una función de las glándulas de Morren dentro de la morfología de la lombriz es secretar carbonato cálcico y producir una digestión alcalina, por lo que puede resultar en valores de pH ligeramente alcalinos en los diferentes humus de lombriz (Bollo 1999). Sin embargo, Tognetti *et al.* (2007) no encontraron tendencia clara en cuanto a valores de pH entre vermicompost y compost elaboradas a partir de los mismos materiales; mientras que Hashemimajd *et al.* (2004) encontraron, en general, un pH menor en las vermicompost que en las compost, en las cuales se emplearon materiales diversos.

Conductividad eléctrica (CE). Varios autores señalan que la CE de las vermicompost es menor que las compost, por lo que la hace un material más adecuado para ser utilizado en los medios de crecimiento (Lazcano *et al.*, 2008). Sin embargo, hay quienes opinan que la CE puede ser variable ya que se pueden encontrar valores altos o bajos de salinidad, lo cual puede deberse a las condiciones en las que se lleve a cabo el proceso de vermicompostaje o compostaje y al origen de los materiales utilizados para su elaboración. De acuerdo a Vogtmann *et al.* (1993), las vermicompost producidas en lugares cubiertos, muestran niveles más altos de sales, que aquellas expuestas a la lluvia en donde puede ocurrir el lavado y la subsiguiente pérdida de lixiviados, en materiales que son originalmente altos en sales. Vogtmann *et al.* (1993), considera al K como uno de los principales contribuyentes en la salinidad, lo cual concuerda con lo encontrado por Durán y Enríquez (2007) en trabajos realizados en cinco vermicompost con cinco diferentes materiales orgánicos: desechos domésticos (materiales verdes de cocina), estiércol de vacuno, desechos de la producción bananera, desechos de plantas ornamentales y broza de café, que encontraron que la vermicompost con mayor contenido de potasio (desechos domésticos con 3.3% de K y desechos de banano con 6.8% de K) presentaron la mayor CE

(1.3 y 1.5 mS cm⁻¹, respectivamente). Por lo tanto, la CE que presente una vermicompost en relación a una compost dependerá de la naturaleza de los materiales que se hayan utilizado para su elaboración así como del manejo y condiciones que se hayan dado.

Materia orgánica y relación C/N. Pueden variar entre compost y vermicompost y esta variación puede depender de los materiales utilizados o no (Durán Enríquez, 2007). En relación a esto Tognetti *et al.* (2007) encontró que en vermicompost el contenido de materia orgánica tendió a ser menor que en el compost, ambos elaborados con los mismos materiales. Tognetti *et al.* (2005) en compost y vermicompost, elaborados del mismo material encontró que el contenido de materia orgánica fue superior en esta última.

En cuanto a la relación C/N, Subler *et al.* (1998) mencionan que las vermicompost se caracterizan por tener relación C/N bajas; mientras que Tognetti *et al.* (2005) encontraron una relación C/N similar entre vermicompost y compost, elaboradas de los mismos materiales.

4.3.3 Diferencias biológicas

Sustancias reguladoras del crecimiento. La aplicación de vermicompost favorece el crecimiento de raíces, desarrollo de las plantas y cosechas, lo cual se atribuye no solo al contenido nutricional de la vermicompost, sino también al efecto hormonal de los metabolitos microbianos de la misma (Arancon *et al.*, 2008). Arancon *et al.* (2003) y Arancon *et al.* (2006) señalan que la interacción entre lombrices de tierra y microorganismos puede producir cantidades significativas de hormonas reguladoras del crecimiento (auxinas, giberelinas y citoquininas) y ácidos húmicos.

Microorganismos. Se ha reportado que las deyecciones de la lombriz poseen mayor riqueza en flora bacteriana en comparación con el compost (Frederickson *et al.*, 2007; Aira *et al.*, 2006). Asimismo, la

vermicompost posee mayor diversidad bacteriana que el compost. Al respecto, Fracchia *et al.* (2006) encontró que en la compost dominaban principalmente *Actinobacteria* y *Firmicutes*, mientras que en la vermicompost predominaron *Chloroflexi*, *Acidobacteria*, *Bacteroidetes* y *Gemmatimonadetes*.

4.4 Uso de la Vermicompost

Los resultados de algunos estudios muestran una mejor calidad de la vermicompost sobre la compost; sin embargo, esto no se puede generalizar ya que existen discrepancias con otros resultados (Tognetti *et al.*, 2005).

Atiyeh *et al.* (2000b) menciona que en los últimos años el uso de la vermicompost se ha incrementado, lo cual se atribuye a lo siguiente:

- Las reglamentaciones para la aplicación y disposición del estiércol han sido más rigurosas en los últimos años, por lo que el vermicompostaje se considera un sistema ecológicamente seguro para manejarlo (Atiyeh *et al.*, 2000b).
- Asimismo, las lombrices composteras pueden procesar una amplia gama de desechos como: residuos de origen animal (estiércoles de vaca, patos, caballos, cerdos, de aves de corral, conejo y borregos), residuos de plantas (pastos composteados, desechos de jardinería, malezas de ríos, de especies vegetales, café molido), residuos urbanos (biosólidos y sobrantes de restaurantes y supermercados) y residuos agroindustriales (lodos, pulpa de papel, bagazos) (Gunadi y Edwards, 2003).
- Las vermicompost se han utilizado como mejorador del suelo y como componente del medio de crecimiento de plantas cultivadas en invernadero, con buenos resultados.
- Los lixiviados de las vermicompost también han sido aprovechados asperjándolos en diferentes cultivos, dando resultados importantes en crecimiento, calidad y rendimiento (Jarecki *et al.*, 2005; Tejada *et al.*, 2008; Singh *et al.*, 2010).

5. LITERATURA CITADA

- Aira, M., F. Monroy, and J. Domínguez. 2006. Changes in microbial biomass and microbial activity of pig slurry after the transit through the gut of the earthworm *Eudrilus eugeniae*. Biol. Fertil. Soils 42: 371–376.
- ANCI. 2006. Asociación Nacional de Constructores de Invernaderos. Disponible en línea en http://www.teorema.com.mx/articulos.php?id_sec=45&id_art=559&id_ejemplar=57. (Revisado el 1 de enero de 2010).
- Arancon, N.Q., E. Clive-A., A. Babenko, J. Cannon, P. Galves, and J.D. Metzger. 2008. Influences of vermicomposts, produced by earthworms and microorganisms from cattle manure, food waste and paper waste, on the germination, growth and flowering of petunias in the greenhouse. Appl. Soil Ecol. 89: 91-99.
- Arancon, N.Q., E. Clive-A., L. Stephen, and R. Byrne. 2006. Effects of humic acids from vermicomposts on plant growth. 2006. Eur. J. Soil Biol. 42: 565–569.
- Arancon, N.Q., L. Stephen, A. Clive-Edwards and R. Atiyeh. 2003. Effects of humic acids derived from cattle, food and paper-waste vermicomposts on growth of greenhouse plants. Pedobiologia 47: 741-744.
- Atiyeh, R. M., Arancon, N., Edwards, C. A., and Metzger, J. D., 2000b. Influence of earthworm-processed pig manure on the growth and yield of greenhouse tomatoes. Bioresour. Technol. 75: 175-180.
- Atiyeh, R. M., J. Domínguez, S. Subler, and C.A. Edwards. 2000c. Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (*Eisenia andrei*, Bouché) and the effects on seedling growth. Pedobiologia 44: 709-724.
- Atiyeh, R. M., S. Lee, C.A. Edwards, N.Q. Arancon, and J.D. Metzger. 2002. The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth. Bioresour. Technol. 84: 7-14.
- Benito, M., A. Masaguer, A. Moliner, and R.D. Antonia. 2006. Chemical and physical properties of pruning waste compost and their seasonal variability. Bioresour. Technol. 97: 2071-2076.
- Bollo, E. 1999. Lombricultura: una alternativa de reciclaje. Quito. Soboc Grafic. 149 p.
- Buck, C., M. Langmaack, and S. Schrader. 2000. Influence of mulch and soil compaction on earthworm cast properties. Appl. Soil Ecol. 14: 223-229.
- Burés, S. 1997. Sustratos. Ediciones Agrotécnicas. Madrid, España. 342 p.
- Candelas-Cadillo, M.G., M.G.J. Alanís-Guzmán, F. Del Rio-Olague. 2006. Cuantificación de licopeno y otros carotenoides en tomate y polvo de tomate. Revista Mexicana de Agronegocios 10: 1-10.
- Cook, R. and L. Calvin. 2005. Greenhouse tomatoes change the dynamics of the north american greenhouse tomato industry. Disponible en línea en <http://www.ers.usda.gov/publications/ERR2>. (Revisado el 15 de febrero de 2010).
- Domínguez, J., C.A. Edwards, and S. Subler. 1997. A comparison of vermicomposting and composting methods to process animal wastes. Biocycle 38: 57–59.
- Domínguez, J., R.W. Parmelee, and C.A. Edwards. 2003. Interactions between *Eisenia andrei* (Oligochaeta) and nematode populations during vermicomposting. Pedobiologia 47: 53-60.
- Durán, L y C. Enríquez. 2007. Caracterización química, física y microbiológica de vermicompostes producidos a partir de cinco sustratos orgánicos. Agronomía Costarricense 31: 41-51.

- Edwards, C. A. and I. Burrows. 1988. The potential of earthworm compost as plant growth media. *In*: Edwards, C.A., and Neuhauser, E.F. (Eds.), *Earthworms in waste and environmental management*. SPB Academic Publishers. The Hague, The Netherlands. pp. 21–32.
- El Financiero. 2010. Duplica México exportaciones agroalimentarias. Disponible en <http://www.elfinanciero.com.mx/ElFinanciero/Portal/cfpages/contentmgr.cfm?docId=265573&docTipo=1&orderby=docId&sortby=ASC> (Revisado el 1 de junio de 2010).
- El Informador. 2010. Duplica México exportaciones agroalimentarias. Disponible en <http://www.informador.com.mx/economia/2010/206268/6/duplica-mexico-exportaciones-agroalimentarias.htm> (Revisado el 1 de junio de 2010).
- Fracchia, L., A.B. Dohrmann, M.G. Martinotti, and C.C. Tebbe. 2006. Bacterial diversity in a finished compost and vermicompost: differences revealed by cultivation-independent analyses of PCR-amplified 16S rRNA genes. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 71: 942-952.
- Franco, D. 2004. Principales países productores de tomate. Disponible en línea en http://www.alimentosargentinos.gov.ar/0-3/revistas/r_3/cadenas/tomate_indus.htm (Revisado el 2 de febrero de 2010).
- Frederickson, J., H. Graham, and A.M. Hobson. 2007. Effect of pre-composting and vermicomposting on compost characteristics. *Eur. J. Soil Biol.* 43: 5320-5326.
- Garg, P., A. Gupta, and S. Satya . 2006. Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia foetida*: A comparative study. *Bioresour. Technol.* 97: 391-395.
- Gliessman, S.R. 2002. Agroecología. Procesos ecológicos en agricultura sostenible. Turrialba, Costa Rica. 359 p.
- Grigatti, M., M.E. Giorgioni, L. Cavani, and C. Ciavatta. 2007. Vector analysis in the study of the nutritional status of *Philodendron* cultivated in compost-based media. *Scie. Hort.* 112: 448-455.
- Gunadi, B. and C.A. Edwards. 2003. The effects of multiple applications of different organic wastes on the growth, fecundity and survival of *Eisenia fetida* (Savigny) (Lumbricidae). *Pedobiologia* 47: 18-25.
- Hashemimajd, K., M. Kalbasi, A. Golchin, and H. Shariatmadari. 2004. Comparison of vermicompost and compost as potting media for growth of tomatoes. *J. Plant Nutr.* 27: 1107-1123.
- INEGI. 2005. Banco de información económica. Disponible en <http://dgenesyp.inegi.gob.mx/?c=72>. (Revisado el 17 de enero de 2010).
- Jarecki, M.K., C. Chong, and R.P. Voroney. 2005. Evaluation of compost leachates for plant growth in hydroponic culture. *J. Plant Nutr.* 28: 651-667.
- Lazcano, C., M. Gómez-Brandón, and J. Domínguez. 2008. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. *Chemosphere* 27: 1013-1019.
- Mahajan, G. and K.G. Singh. 2006. Response of greenhouse tomato to irrigation and fertigation. *Agric. Water Manage.* 84: 202-206.
- Márquez, H.C. y P. Cano. 2005. Producción orgánica de tomate cherry bajo invernadero. *Actas Portuguesas de Horticultura* 5: 219-224.
- Ndegwa, P.M. and S.A. Thompson. 2000. Effects of C-to-N ratio on vermicomposting of biosolids. *Bioresour. Technol.* 75:7-12.

- Nikita, S. and J.K.W. Eriksen-Hamel. 2007. Impacts of earthworms on soil nutrients and plant growth in soybean and maize agroecosystems. *Agr. Ecosyst. Environ.* 120: 442-448.
- Osorio-Luna, V. 2006. Competitividad de la comercialización de jitomate entre los países miembros del tratado de libre comercio (TLC). Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 120 p.
- Pereira, M. G. and Zezzi-Arruda, M. A. 2003. Vermicompost as a natural adsorbent material: characterization and potentialities for cadmium adsorption. *J. Braz. Chem. Soc.* 14: 39-47.
- Raviv, M. 2005. Production of high-quality composts for horticultural purposes: A mini-review. *HortTech.* 15: 52-57.
- Romero, Ma. R., A. Trinidad S., R. García E. y R. Ferrera C. 2000. Producción de papa y biomasa microbiana en suelo con abonos orgánicos y minerales. *Agrociencia* 34: 261-269.
- Romero, Ma. R.. 2000. Agricultura orgánica: elaboración y aplicación de abonos orgánicos. *In: C. Martínez C. y L. Ramírez F. (eds). Lombricomposta y Agricultura Sustentable. Ed. Futura. Texcoco, México. 208 p.*
- Ryppy, J.F.M., M.M. Peet, F.J. Louws, P.V. Nelson, D.B. Orr, and K.A. Sorensen. 2004. Plant development and harvest yields of greenhouse tomatoes in six organic growing systems. *HortScie.* 39: 223-229.
- Sánchez-Hernández, R., V.M. Ordaz-Chaparro, D.J. Palma-López y J. Sánchez-Bolón. 2006. El vermicompostaje: elemento útil en la agricultura sustentable. Fundación Produce Tabasco, A.C. Villahermosa, Tabasco. 47 p.
- Singh, R., R.K. Gupta, R.T. Patil, R.R. Sharma, R. Asrey, A. Kumar, and K.K. Jangra. 2010. Sequential foliar application of vermicompost leachates improves marketable fruit yield and quality of strawberry (*Fragaria _ ananassa* Duch.). *HortScience* 124: 34-39.
- SIPAN. 2004. Inteligencia de mercado de tomate. Disponible en línea en <http://www.ima.gob.pa/downloads/tomate.pdf> (Revisado el 15 de marzo de 2010).
- Stoffella, P.J. y B.A. Kahn. 2005. Utilización de compost en los sistemas de cultivo hortícola. Mundi-Prensa. Madrid, España. 397 p.
- Subler, S., C.A. Edwards, and J.D. Metzger 1998. Comparing composts and vermicomposts. *Biocycle* 39: 63–66.
- Tejada, M., J.L. Gonzalez, M.T. Hernández, and C. Gracia. 2008. Agricultural use of leachates obtained from two different vermicomposting processes. *Bioresour. Technol.* 99: 6228-6232.
- Tognetti, C., M.J. Mazzarino, and F. Laos. 2007. Improving the quality of municipal organic waste compost. *Bioresour. Technol.* 98: 1067-1076.
- Tognetti, C., M.J. Mazzarino, F. Laos, and M.T. Hernández. 2005. Composting versus vermicomposting: a comparison of end product quality. *Compost. Sci. Util.* 13: 6-13.
- Tuzel, Y., B. Yagmur, and M. Gumus. 2003. Organic tomato production under greenhouse conditions. *Acta Hort.* 614: 775-780.
- Velasco V., J. 2002. Alternativa tecnológica del reciclaje de los desechos orgánicos del Colegio de Postgraduados. Tesis de maestría. Colegio de Posgraduados. Montecillo, México, 116 p.
- Vogtmann H., K. Fricke., T. Turk. 1993. Quality, physical characteristics, nutrient content, heavy metals and organic chemicals in biogenic waste compost. *Compost. Sci. Util.* 1: 69-87.

CAPÍTULO I. DISEÑO DE MEZCLAS DE SUSTRATOS A TRAVÉS DE UN PROGRAMA DE OPTIMIZACIÓN CON SAS, UTILIZANDO VARIABLES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Resumen

Los sustratos para la producción de cultivos deben cumplir con ciertos requerimientos en propiedades físicas y químicas. Para encontrar las propiedades idóneas se ha recurrido a la mezcla de materiales simples (inorgánicos y orgánicos) o compuestos, procedimiento que se ha llevado a cabo mediante propuestas aisladas no sistematizadas, implicando esto tiempo y dinero. Por lo tanto el objetivo del presente trabajo fue obtener mezclas de los materiales tezontle y tres vermicompost, para sustratos de menor costo dentro de valores determinados de las características de espacio poroso total (EPT) > 58%, capacidad de aireación (CA) 10-30% y contenidos de materia orgánica (MO) 5-20%, mediante un programa de optimización con SAS con la finalidad de reducir tiempo y costos. El programa generó combinaciones de menor costo de distintas proporciones porcentuales entre el tezontle y cada una de tres vermicompost, que cumplieron con los valores determinados de las propiedades físicas y químicas consideradas. Posteriormente, se seleccionaron las mezclas con proporciones porcentuales (tezontle-vermicompost) de 65-35, 75-25 y 85-15, correspondientes a cada una de las tres vermicompost, las cuales se caracterizaron en el laboratorio para EPT, CA y MO, y los valores obtenidos se compararon con aquellos del programa SAS. Se encontró: para EPT, diferencias en 33.33% de las mezclas; para CA, no se detectaron diferencias; para MO, hubo diferencias en 55.56% de las mezclas, con valores mayores para el programa al igual que en EPT y CA. En general, las diferencias se consideraron aceptables. Se concluyó que el programa de optimización SAS constituye una opción aceptable para la generación de mezclas de sustratos.

Palabras clave: *espacio poroso total, tezontle, vermicompost.*

1.1 INTRODUCCIÓN

La tendencia actual en la investigación de sustratos para el crecimiento de plantas es la de buscar nuevos materiales o mezclas donde, además de proporcionar mejores condiciones de crecimiento, se considere la disminución del impacto ambiental, tal como el reducir el uso de fertilizantes y pesticidas, así como disminuir los costos (Riviére y Caron, 2001). Al respecto, la vermicompost es un material que se ha convertido en una opción como sustrato para el cultivo de plantas, debido a que por las características que confiere al medio de crecimiento y por el aporte de nutrimentos, entre otras contribuye a reducir el daño de los recursos naturales (Sánchez-Hernández *et al.*, 2006). Sin embargo, un material por si solo es difícil que cumpla con las mejores condiciones físicas y químicas para el desarrollo de las plantas, por lo que es necesario hacer mezclas de materiales con diferentes propiedades físicas y químicas, lo cual se aprovecha en la formación de un nuevo sustrato para obtener mejores condiciones de crecimiento (Nelson, 1999; Burés 1997; Strojny y Nowak, 2001). Al respecto, Verdonck *et al.* (1983) y Moreno-Álvarez (2002) mencionan que la mezcla de la mayoría de los materiales inertes con materiales orgánicos juega un papel importante en la formación de buenas propiedades físicas y químicas, dado que la materia orgánica es un componente activo y su incorporación en el sustrato mejora el espacio poroso, incrementa la retención de humedad y capacidad de intercambio catiónico. Por otra parte, en diversos estudios se señala que en los sustratos las propiedades físicas son más relevantes que las químicas, debido a que estas últimas son difíciles de corregirlas después de establecer el cultivo, por lo que al inicio deben ser las más apropiadas posibles (Caron y Nkongolo, 1999). Asimismo, para cumplir con el suministro de agua y aire, los sustratos deben poseer una elevada porosidad (más del 85%) y capacidad de retención de agua, aunado a un drenaje rápido y una buena aireación (entre 10 y 30%) (Ansorena, 1994). Un elemento importante a considerar cuando se utilizan materiales orgánicos es la propia materia orgánica, ya que la biodegradabilidad de ésta afecta las propiedades del sustrato, principalmente las físicas, dado que constituye la mayor parte de la fase sólida (Lemaire *et al.*, 1998).

En general, la obtención de mezclas de sustratos para el cultivo de plantas que cumplan con las características buscadas se ha llevado a cabo mediante propuestas aisladas no sistematizadas, lo cual ha implicado mayor tiempo y gastos de recursos. Sin embargo, en esta tarea se han logrado avances mediante la utilización de técnicas como la programación lineal (Burés *et al.*, 1988; Zamora-Morales *et al.*, 2005). No obstante, la comprensión y desarrollo completos de los aspectos teóricos y de cómputo de esta metodología, han limitado su uso en el ámbito agrícola, debido a que se requiere el conocimiento de los conceptos y de las técnicas fundamentales de varios temas matemáticos, tales como matrices y determinantes, vectores y espacios vectoriales, conjuntos convexos, desigualdades lineales, solución a ecuaciones lineales simultáneas, entre otros (Gass, 1969).

Al respecto, otra opción para llevar a cabo el cálculo de mezclas de materiales puede ser a través de la utilización de otros programas más sencillos que la programación lineal, tal como el programa SAS, el cual permite obtener las mismas soluciones (Statistical Analysis System) (SAS, 1982).

Con base en lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo la formulación de mezclas de sustratos de mínimo costo, a través de un programa de optimización con SAS, para lo cual se consideraron las propiedades físicas (espacio poroso total y capacidad de aireación) y químicas (materia orgánica) de un material inorgánico (tezontle) y materiales orgánicos (tres vermicompost), además del costo de éstos.

1.2 MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales utilizados fueron el material inorgánico tezontle (TE) y tres materiales orgánicos correspondientes a tres vermicompost: una de estiércol bovino más desechos vegetales (VC1), otra de estiércol bovino (VC2) y la de estiércol bovino y pulpa de café (VC3). Todos los materiales fueron

tamizados y se empleó un tamaño de partícula entre 2 mm y 10 mm de diámetro para TE y para vermicompost de 0.5 a 5 mm.

A estos materiales se les determinó sus propiedades físicas tal como: espacio poroso total (EPT) y capacidad de aireación (CA), y químicas: materia orgánica (MO), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y nitrógeno total (N). El EPT y CA se determinaron mediante la metodología de Landis (2000), para esto se utilizaron contenedores de 300 mL con perforaciones en la base, las cuales se taparon para evitar pérdida del material y agua, después se colocó la muestra seca hasta la marca indicada para 300 mL (V1) sin compactar, enseguida se adicionó lentamente agua de la llave hasta cubrir la muestra y saturarla, la cantidad de agua agregada se denominó V2; posteriormente se drenó el agua del recipiente, la cual se recogió y cuantificó (V3); así, el $EPT(\%) = (V2/V1) \times 100$ y la $CA(\%) = (V3/V1) \times 100$.

Para la MO las muestras de vermicompost se secaron a 105 °C, se pesaron 5 g y se calcinó a 550 °C por 3 h en una mufla (Aendekerk *et al.*, 2000); así, $MO(\%) = (\text{peso } 105\text{ °C} - \text{peso } 550\text{ °C}) / \text{peso } 105\text{ °C}$. El pH y la CE se obtuvieron con un medidor digital, marca Conductronic modelo PC18, para lo cual se utilizó agua destilada cuyo pH fue de 6.3. La CIC se determinó utilizando acetato de amonio y sodio (Aendekerk *et al.*, 2000) y la concentración de N por el método Kjeldahl (Kirk, 1950). Las determinaciones se llevaron a cabo en cinco repeticiones.

El programa de optimización con SAS para mezclas de sustratos fue diseñado para combinar dos o más materiales simples, considerando propiedades físicas y, dado el caso, químicas, que en la mezcla encuentren sus valores dentro de cierto rango o mayores a cierto valor, deseados; paralelamente, la consideración de los precios de los sustratos simples, permite obtener las mezclas de sustratos de mínimo costo, que cumplan con las propiedades deseadas.

En el presente caso, se seleccionaron las propiedades físicas EPT y CA, dada la importancia que tienen en un sustrato ya que influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Cabrera, 1999), y la propiedad química MO, que influye sobre estas variables por la biodegradabilidad de la misma (Lemaire *et al.*, 1998). Para estas variables, los rangos o valores mínimos que se establecieron fueron: EPT, valores iguales o mayores que 58%, esto de acuerdo al valor mínimo encontrado de EPT en los materiales simples y a Ansorena (1994); CA, valores entre 10 y 30%, de acuerdo a Ansorena (1994); MO valor mayor a 5% y menor de 20%, de acuerdo a un suelo muy rico en materia orgánica (Vázquez-Alarcón, 1996).

Estas variables y sus rangos de valores o valores mínimos considerados, se introdujeron como restricciones, en el programa de optimización SAS, resultando las combinaciones porcentuales en volumen de cada material. Paralelamente, se introdujeron en el programa los costos de los materiales simples, también en términos de una restricción para obtener las mezclas que tuvieran un costo mínimo o no mayor que un cierto valor determinado. Por lo tanto, el criterio de costo máximo establecido para la selección de la mezcla, calculada por el programa, se hizo de acuerdo al costo comercial de cada composta, así para VC1 y VC3 fue de \$0.60 L⁻¹ y de \$1.0 L⁻¹ para la VC2.

El programa obtuvo mezclas, que cumplieron con las restricciones establecidas, con sus respectivos valores teóricos de las propiedades/variables consideradas. Las variables se determinaron también experimentalmente en las mezclas, con la misma metodología utilizada para los materiales simples, y los resultados de éstas se compararon con los valores teóricos calculados con el programa de optimización en SAS. Las curvas de retención de humedad de cada una de las mezclas evaluadas también fueron determinadas, utilizando el equipo y metodología descrita por De Boodt *et al.* (1974), que se basa en establecer tensiones a los materiales situados en embudos de Haines mediante un sistema de vasos comunicantes (tubos de plástico). Primero, el material correspondiente (mezcla) se

saturó con agua en recipientes perforados, drenando el exceso de agua; posteriormente, se tomó una muestra y se colocó en el embudo de Haines y se tapó. Se dejó transcurrir 24 h para que el nivel de agua contenida en los tubos de plástico se estabilizará al nivel del sustrato, después el nivel del agua del tubo de plástico se bajó a la altura de 10 cm (10 cm de tensión), con respecto al nivel del sustrato, y se monitoreo hasta el momento que éste se estabilizó (aproximadamente 36 h). Enseguida se extrajo una muestra y se peso, después se secó en estufa y se tomó nuevamente el peso para obtener el contenido de humedad a 10 cm de tensión. Este procedimiento se repitió para 50 y 100 cm de tensión. Finalmente, el contenido de humedad a 0, 10, 50 y 100 cm de tensión fueron obtenidos, los cuales se graficaron para obtener las curvas de humedad volumétrica de cada mezcla.

Los análisis estadísticos consistieron en la comparación de las propiedades físicas y químicas entre los materiales simples, con base en un diseño experimental completamente al azar y la correlación entre las propiedades físicas y químicas de éstos. También se realizó la comparación de las propiedades EPT, CA y MO, obtenidas experimentalmente, entre las proporciones de las mezclas T-VC1, T-VC2 y T-VC3, con base en un diseño experimental completamente al azar y prueba de comparación de medias Tukey. Por otra parte, la comparación de las propiedades EPT, CA y MO de las proporciones para cada una de las mezclas T-VC1, T-VC2 y T-VC3 determinadas en laboratorio con las obtenidas con el programa SAS, se realizó con base en un diseño experimental completamente al azar de muestras apareadas y con la prueba de comparación de medias Tukey ($P = 0.05$). Finalmente, para las propiedades químicas pH, CE, CIC y N se realizó una comparación entre proporciones, con un diseño experimental completamente al azar y la prueba de comparación de medias Tukey ($P \leq 0.05$).

1.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización física y química de los materiales simples se muestra en el Cuadro 1. Se observó que el EPT varió entre 58 y 63% entre los materiales, con el mayor valor para la vermicompost VC1;

sin embargo, estos valores son inferiores al considerado óptimo en sustratos, el cual debe ser mayor a 85% (Ansorena, 1994).

La CA mostró diferencias entre los materiales, con valores mayores para el TE (31.7%), intermedios para la vermicompost VC1 (18.8%) y vermicompost VC3 (19.1%), y el menor valor para la vermicompost VC2 (10.84%); sin embargo, a excepción del TE, todos los materiales presentan valores entre 10 y 30%, los cuales son considerados ideales para sustratos (Ansorena, 1994).

Cuadro 1. Principales propiedades físicas y químicas de los materiales simples para la elaboración de mezclas mediante programación con SAS. Montecillo, Texcoco. 2007.

Sustrato	Variables						
	EPT	CA	MO	pH	CE	CIC	N
	----- % -----				mS cm ⁻¹	meq 100 g ⁻¹	g kg ⁻¹
TE	58.6 b [†]	31.7 a	0.0 d	7.1 b*	0.08 c	2.7 c	0.0 c
VC1	63.0 a	18.8 b	36.5 b	8.8 a	3.35 a	57.3 b	11 b
VC2	58.3 b	10.8 c	33.9 c	8.8 a	1.31 b	57.3 b	10 b
VC3	58.0 b	19.1 b	55.9 a	7.1 b	1.33 b	88.4 a	21 a

[†]Medias con misma letra dentro de columnas son significativamente iguales, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Te = tezontle VC1 = vermicompost de estiércol bovino más desechos vegetales 1; VC2 = vermicompost de estiércol bovino; VC3 = vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café; EPT = espacio poroso total; CA = capacidad de aireación; MO = materia orgánica. *Este valor fue determinado utilizando agua destilada, cuyo pH fue de 6.5.

La MO varió desde 33.9 a 36.55% para las vermicompost VC2 y VC1, respectivamente, hasta 55.9% para la vermicompost VC3, con diferencias significativas. Estos valores se encuentran por debajo del 80%, el cual es el considerado como ideal para materiales orgánicos destinados a ser utilizados como sustratos (Ansorena, 1994).

Durán y Henríquez (2007) señalan que el tipo de ingredientes utilizados para la elaboración de vermicompost determina en gran medida las características del producto final, manifestándose variabilidad en ellas, lo cual coincide con lo encontrado en las estudiadas.

Caron y Nkongolo (1999) mencionan que las características de los sustratos para el cultivo de plantas cambian en el tiempo, y por lo general las propiedades físicas del mismo tienden a reducirse, por lo que hay que procurar que dichas características sean al inicio lo más altas o lo más cercano a lo considerado como ideal. Por otro lado, la tendencia actual es producir plantas de calidad en sustratos y con los costos más bajos (Buyatti, 2000). Uno de los conceptos por lo cual el costo de producción se eleva es el uso de fertilizantes químicos y de sustratos de valor elevado, como la turba.

En el presente trabajo los costos de los materiales fueron de \$0.1/L para TE, \$1.3/L para VC1 y VC3 y \$2.5/L para VC2. Así, se observa que resultaría idóneo producir en TE utilizando una solución nutritiva; sin embargo, también es de interés buscar materiales que contribuyan a disminuir el uso de fertilizantes, como es el caso de las vermicompost. Se ha mencionado que las propiedades químicas, a diferencia de las físicas, pueden modificarse una vez colocado el sustrato en los contenedores; sin embargo, el análisis de las propiedades químicas es importante debido a su interacción con los fertilizantes y su efecto en el desarrollo de las plantas, siendo el pH, CE y CIC las principales a considerar (Quesada y Méndez, 2005).

El pH óptimo para el crecimiento de las plantas se ha establecido entre 5.3 y 6.8 (Argo, 1998). La VC1 y la VC2 tuvieron un pH alcalino de 8.85 y 8.78, respectivamente, mientras que la VC3 fue neutro (7.08). Al respecto, Bollo (1999) menciona que una de las funciones de la glándula de Morren en la lombriz es secretar carbonato de calcio y producir una digestión alcalina, por lo que es de esperarse un pH ligeramente alcalino en vermicompost como lo encontraron Durán y Henríquez (2007). Asimismo, para el caso del TE, el pH fue de 7.1; material que en términos estrictos no es inerte ya que el pH original del agua utilizada fue de 6.5.

La mayor concentración de sales la presentó la VC1 (con un valor de CE de 3.35 mS cm^{-1}). Al respecto, los valores de CE superiores a 3.5 mS cm^{-1} son considerados como nocivos para plántulas de hortalizas, aunque también depende de la tolerancia del cultivo (Abad *et al.*, 2004). Por lo tanto, las vermicompost aquí estudiadas no presentan problema alguno en cuanto a la concentración de sales. Las diferencias de CE entre las vermicompost depende de la naturaleza del material a transformar; asimismo, pueden deberse a las condiciones en las cuales se llevó a cabo el vermicomposteo (Durán y Henríquez, 2007).

En cuanto a la CIC, la VC2 y VC3 presentaron el mayor valor ($88.41 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$) lo que coincide con la mayor concentración de MO, mientras que en TE fue $2.69 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$ dado que es un material casi inerte. El contenido de N fue mayor para la VC3 con el 2.1%, mientras que para VC1 y VC2 fue cercano a 1%. La presencia de N en compost resulta lógica dado que una de las materias primas en su elaboración fue el estiércol.

Las propiedades consideradas para el diseño de mezclas mediante el programa de optimización con SAS fueron: EPT, CA y MO. En relación a esto, Baumgarten (2008) menciona que los resultados obtenidos del análisis de sustratos por diversos autores, en cuanto a sus características físicas y químicas, pueden ser una base para el desarrollo de modelos, para así reducir el trabajo analítico y gastos. Por ello, se consideró lo señalado por autores como: Zamora-Morales *et al.* (2005) quienes mencionan que el EPT y la CA deben ser incluidos como variables de diseño en la generación de mezclas por programación lineal. Por su parte, Bunt (1976), Bragg y Chambers (1988) y Pastor (1999) mencionan que la fase gaseosa y líquida de un medio de crecimiento la constituye el espacio ocupado por aire (CA) y agua, es decir, el EPT y éste constituye la propiedad física más importante en los sustratos. Burés (1997) y Marfa *et al.* (1999) señalan que la MO es la fracción importante de la fase sólida y que influye en las propiedades físicas y químicas del sustrato.

El análisis que se presenta en el Cuadro 2 indica correlaciones significativas para CA-CIC, CA-N, N-CIC, pH-N, pH-CIC, pH-MO, MO-CIC, CA-MO y N-MO, lo que confirma lo indicado por Burés (1997) y Marfa *et al.* (1999) respecto a la MO, por lo que es necesario considerarla en el diseño de mezclas.

De acuerdo con las propiedades EPT, CA, MO y costo de material, se planteó el programa de optimización con SAS para la generación de mezclas de sustratos considerando dos materiales, el cual se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 2. Coeficientes de correlación entre variables físicas y químicas de los materiales simples utilizados en la elaboración de mezclas. Montecillo, Texcoco. 2007-2008.

	Variables físicas y químicas						
	EPT	CA	pH	CE	CIC	MO	N
EPT	-	0.3692 ns	-0.3268 ns	0.0899 ns	0.0629 ns	0.0993 ns	0.1736 ns
CA		-	0.1943 ns	-0.4776 ns	-0.7078**	-0.6904*	-0.5769*
pH			-	0.0195 ns	-0.7692**	-0.7720**	-0.8737**
CE				-	0.5016 ns	0.5245 ns	0.3973 ns
CIC					-	0.9980**	0.9806**
MO						-	0.9829**
N							-

EPT = espacio poroso total, CA = capacidad de aireación, CE = conductividad eléctrica, MO = materia orgánica, N = nitrógeno, * = significancia a 0.05, ** = significancia a 0.01, ns = no significativo.

El programa de optimización SAS se aplicó para realizar la combinación de dos materiales, señalando que puede ser empleado para más de dos, aunque no suelen considerarse mezclas de más de tres de ellos. Las combinaciones fueron: tezontle-vermicompost de estiércol bovino más desechos vegetales (TE-VC1), tezontle-vermicompost de estiércol bovino (TE-VC2), tezontle-vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café (TE-VC3).

Cuadro 3. Programa de optimización con SAS para la generación de mezclas de dos materiales simples. Montecillo, Texcoco. 2007-2008.

Desarrollo del programa

Data mezcla;

/*propiedades consideradas, por ejemplo: ept=espacio poroso total, ca=capacidad de aireación, mo=materia orgánica*/

/*X1 = material 1, X2 = material 2*/

/*valores de las propiedades y costos (co) para cada material:

material ept ca mo co

X1 ept1 ca1 mo1 co1

X2 ept2 ca2 mo2 co2*/

do X = 0 to 100 by 5;

do X2 = 0 to 100 by 5;

do X12 = X1 + X2;

/*X12 es la suma de los porcentajes de cada material en la mezcla*/

/*las mezclas se considerarán para combinaciones porcentuales de 5 en 5% de los materiales, que sumen 100%; pueden considerarse valores diferentes de 5 pero que 100 sea múltiple de ellos*/

ept = (X1 * ept1 + X2 * ept2) / X12;

ca = (X1 * ca1 + X2 * ca2) / X12;

mo = (X1 * mo1 + X2 * mo2) / X12;

output; end; end;

data a1; set mezcla; keep X1 X2 X12 ept ca mo co;

proc sort data = a1; by descending X12; data a11; set a1;

if X12 > 96 and X12 < 105;

/*la última instrucción eliminará todas las combinaciones porcentuales de los materiales que no sume 100%*/

/*Se definen los valores del rango óptimo o valor mínimo de las propiedades en la mezcla, los que se introducen como restricciones, por ejemplo:

propiedad rango o valor mínimo

ept ept > eptmin

ca camin <= ca <= camax

```

mo          momin <= mo <= momax*/

data a2; set a11; keep X1 X2 X12 ept ca mo co;
proc sort data=a2; by descending ept; data a22; set a2;
if ept >= eptmin;
data a3; set a22; keep X1 X2 X12 ept ca mo co;
proc sort data=a3; by descending ca; data a33; set a3;
if ca >= camin and ca <= camax;
data a4; set a33; keep X1 X2 X12 ept ca mo co;
proc sort data=a4; by descending mo; data a44; set a4;
if mo >= momin and mo <= momax;

```

/*para obtener las mezclas de mínimo costo se introduce un costo dado aproximado, para que se consideren sólo las mezclas de costo menor a dicho valor, mismo que se denominará costo X0*/

```

data a5; set a44; keep X1 X2 X12 ept ca mo co;
proc sort data = a5; by descending co; data a55; set a5;
if co <= co X0;
data c; set a55; proc print;
run;

```

En los Cuadros 4, 5 y 6 se presentan las mezclas de sustratos obtenidas para las tres combinaciones de materiales.

Cuadro 4. Mezclas de materiales calculadas con el programa de optimización SAS, utilizando Tezontle-Vermicompost de estiércol de bovino más desechos vegetales (TE-VC1). Montecillo, Texcoco. 2008.

	Mezcla		Variables			Costo
	TE	VC1	EPT	CA	MO	
	----- % volumen -----				% peso	\$ L ⁻¹
1	60	40	60.3	26.5	14.6	0.58
2	65	35	60.1	27.2	12.8	0.52
3	70	30	59.9	27.8	10.9	0.46
4	75	25	59.7	28.5	9.1	0.40
5	80	20	59.4	29.1	7.3	0.34
6	85	15	59.2	29.8	5.5	0.28

TE = tezontle; VC1 = vermicompost de estiércol bovino más desechos vegetales; EPT = espacio poroso total, CA = capacidad de aireación; MO = porcentaje de materia orgánica.

Cuadro 5. Mezclas de materiales calculadas con el programa de optimización SAS, utilizando Tezontle-Vermicompost de estiércol de bovino (TE-VC2). Montecillo, Texcoco. 2008.

	Mezcla		Variables			Costo
	TE	VC2	EPT	CA	MO	
	----- % volumen -----					\$L ⁻¹
1	65	35	58.4	24.4	11.9	0.94
2	70	30	58.4	25.4	10.2	0.82
3	75	25	58.5	26.5	8.5	0.70
4	80	20	58.5	27.5	6.8	0.58
5	85	15	58.5	28.6	5.1	0.46

TE = tezontle; VC2 = vermicompost de estiércol bovino; EPT = espacio poroso total, CA = capacidad de aireación; MO = porcentaje de materia orgánica.

Cuadro 6. Mezclas de materiales calculadas por el programa de optimización SAS, utilizando Tezontle-Vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café (TE-VC3). Montecillo, Texcoco. 2008.

	Mezcla		Variables			Costo
	TE	VC3	EPT	CA	MO	
	----- % volumen -----					\$ L ⁻¹
1	65	35	58.4	27.3	19.4	0.52
2	70	30	58.4	27.9	16.8	0.46
3	75	25	58.4	28.5	14.0	0.40
4	80	20	58.4	29.2	11.2	0.34
5	85	15	58.4	29.8	8.4	0.28

TE = tezontle; VC3 = vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café; EPT = espacio poroso total, CA = capacidad de aireación; MO = porcentaje de materia orgánica.

Las mezclas de menor costo contienen mayor proporción de TE, un material de menor costo (\$0.1 L⁻¹) que las vermicompost; por otra parte, el costo de las mezclas TE-VC2 son de mayor costo debido a que esta vermicompost tiene el mayor precio.

En la relación de mezclas se observó que el EPT es similar en las diferentes proporciones, mientras que CA es mayor a mayor proporción de TE, en tanto que la MO disminuye a menor proporción de vermicompost utilizada, lo cual repercute en el costo por unidad.

Las mezclas con proporción 65-35, 75-25 y 85-15 de las combinaciones TE-VC1, TE-VC2 y TE-VC3 fueron seleccionadas para reproducirlas y caracterizarlas en laboratorio, en las propiedades de EPT, CA y MO.

Estos valores experimentales se compararon entre las tres proporciones de los materiales dentro de cada combinación de materiales, a fin de observar si ellas mostraban alguna tendencia en los valores de las propiedades evaluadas, a la vez se compararon con los valores dados por el programa de optimización SAS.

En los resultados obtenidos en laboratorio se encontró diferencia del EPT entre las proporciones estudiadas de las tres combinaciones consideradas, notándose, en general, un incremento de éste a mayor proporción de TE para las combinaciones TE-VC2 y TE-VC3. Sin embargo, estas diferencias no son de gran magnitud (Cuadro 7). En el presente ensayo el TE tuvo un rango más amplio en el tamaño de partícula (2 a 10 mm) mientras que en las VC2 y VC3 el tamaño de partícula fue más homogéneo (0.5 a 5 mm), por tanto el incremento en la proporción de TE implicó un mayor número de partículas de tamaño más grande con respecto a la vermicompost, lo cual incrementó el EPT (Ansorena, 1994).

Los resultados de EPT contrastan con lo encontrado por Owen *et al.* (2008) en otros trabajos de mezclas de materiales tales como agregados minerales y corteza de pino en diferentes proporciones, ya que no se encontró efecto de estas sobre la porosidad total, aunque si en el volumen de aire, lo cual pueda deberse a la naturaleza de las partículas de los materiales utilizados.

En cuanto a CA los valores incrementaron significativamente conforme aumentó la cantidad de TE, así la proporción 85-15 obtuvo la mayor CA (Cuadro 7). Lo anterior se explica debido a que el TE

presentó la mayor CA (Cuadro 1), por tanto la CA aumenta al incrementar la cantidad de éste en la mezcla, lo cual coincide con lo encontrado por Verdonck y Demeyer (2004) quienes mencionan que al combinar turba con perlita con 10 y 20% de CA, respectivamente en varias proporciones, la CA incrementó conforme la proporción de perlita fue mayor.

Cuadro 7. Propiedades físicas y químicas obtenidas en laboratorio de las tres combinaciones Tezontle-vermicompost en las proporciones 65-35, 75-25 y 85-15. Montecillo, Texcoco. 2007.

Combinación, Proporción	Propiedades obtenidas en laboratorio		
	EPT	CA	MO
	----- % -----		
TE-VC1,65:35	61.4 a [†]	28.9 b	10.5 a
TE-VC1,75:25	55.8 c	24.9 c	8.2 b
TE-VC1,85:15	58.0 b	32.0 a	6.1 c
TE-VC2,65:35	53.7 b	23.5 b	9.7 a
TE-VC2,75:25	55.7 a	24.5 b	7.0 b
TE-VC2,85:15	56.2 a	30.3 a	2.9 c
TE-VC3,65:35	58.0 b	25.3 b	18.1 a
TE-VC3,75:25	58.3 ab	24.6 b	14.3 b
TE-VC3,85:15	60.0 a	32.0 a	6.1 c

[†]Medias con misma letra dentro de columnas son significativamente iguales, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). TE = tezontle; VC1 = vermicompost de estiércol bovino más desechos vegetales; VC2 = vermicompost de estiércol bovino; VC3 = vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café; EPT = espacio poroso total; CA = capacidad de aireación; MO = materia orgánica.

Para la MO, en las tres combinaciones, se observó una disminución significativa a medida que se redujo la proporción de vermicompost en la mezcla, lo cual resulta lógico, puesto que ésta es la que aporta dicho componente en la mezcla.

La comparación entre los datos obtenidos experimentalmente y los datos por el programa de optimización SAS, indica:

Para la combinación TE-VC1, un mayor valor del EPT en la proporción 75-25 con el programa SAS, e igual manera para la MO en las proporciones 65:35 y 75-25 (Cuadro 8).

Cuadro 8. Comparación de las propiedades físicas y químicas obtenidas en laboratorio y a través del programa SAS de las combinaciones TE-VC1, TE-VC2 y TE-VC3 en las proporciones 65-35, 75-25 y 85-15. Montecillo, Texcoco, 2008.

Combinación, proporción	EPT		Propiedades CA		MO	
	Laboratorio	Programa	Laboratorio	Programa	Laboratorio	Programa
----- % -----						
TE-VC1,65:35	61.4 a [†]	60.1 a	28.9 a	27.2 a	10.5 b	12.8 a
TE-VC1,75:25	55.8 b	59.7 a	24.9 a	28.5 a	8.2 b	9.1 a
TE-VC1,85:15	58.0 a	59.2 a	32.0 a	29.8 a	6.1 a	5.5 a
TE-VC2,65:35	53.8 b	58.4 a	23.5 a	24.4 a	9.7 b	11.9 a
TE-VC2,75:25	55.7 b	58.5 a	24.5 a	26.5 a	7.0 b	8.5 a
TE-VC2,85:15	56.2 a	58.5 a	30.3 a	28.6 a	2.9 b	5.1 a
TE-VC3,65:35	58.0 a	58.3 a	25.3 a	27.3 a	18.1 a	19.4 a
TE-VC3,75:25	58.3 a	58.4 a	24.6 a	28.5 a	14.3 a	14.0 a
TE-VC3,85:15	60.0 a	58.5 a	32.0 a	29.8 a	6.1 a	8.4 a

[†]Letras iguales dentro de hilera para la propiedad determinada en el laboratorio y dada por el programa SAS, indican valores estadísticamente iguales. TE = tezontle; VC1 = vermicompost de estiércol bovino más desechos vegetales; VC2 = vermicompost de estiércol bovino; VC3 = vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café; EPT = espacio poroso total; CA = capacidad de aireación; MO = materia orgánica.

Para la combinación TE-VC2, se encontró mayores valores de EPT en las proporciones 65-35 y 75-25 con el programa SAS, así como también para la MO en las mezclas 65-35, 75-25 y 85-15 (Cuadro 8).

En la combinación TE-VC3, no se observaron diferencias en las tres proporciones para ninguna de las tres variables (Cuadro 8).

Así, en relación a la comparación de los valores de EPT, CA y MO dados por el programa de optimización SAS y obtenidos experimentalmente, se observó que las diferencias no siguen alguna

tendencia en relación con las proporciones de los materiales dentro de la misma combinación; por ejemplo, el EPT tuvo diferencia en la proporción 75:25 pero no para 65:35 y 85:15, por lo que su origen pudo ser error experimental. Una de las causas pudo ser debido a que el tamaño de partículas de los materiales utilizados para las mezclas dificultó la toma de la muestra, sobre todo para la determinación de materia orgánica para la cual fue pequeña (5 g).

La variación de los datos obtenidos en laboratorio en relación a los encontrados por el programa de optimización SAS se comprenden si se considera que para poder hacer uso del programa se requiere de la utilización de datos tomados del sistema real, ya que todo proceso de obtención de datos está afectado por el error experimental (Baker y Curry, 1976).

Esta situación se observó durante la reproducción de las mezclas en laboratorio, la cual no fue 100% exacta entre una repetición y otra, debido a que durante la obtención de las variables de diseño se encontraron problemas como dificultad para saturar completamente la muestra, ya que quedaron espacios de aire que no pudieron llenarse de agua, además de la pérdida de material durante el drenado de la mezcla, situaciones que fueron congruentes con lo encontrado por Verdonck y Gabriels (1992). Por otra parte, entre repeticiones de una mezcla de materiales se encontró una variación aproximada de 5% en el peso, lo cual se atribuyó a la naturaleza de los materiales utilizados (orgánico e inorgánico).

Otro aspecto físico evaluado en las diferentes mezclas fueron las curvas de humedad que se muestran en las Figuras 1 y 2. En estas se observa que el contenido de agua fue mayor en la combinación TE-VC3 lo que se relacionó con el mayor contenido de MO que ésta contuvo.

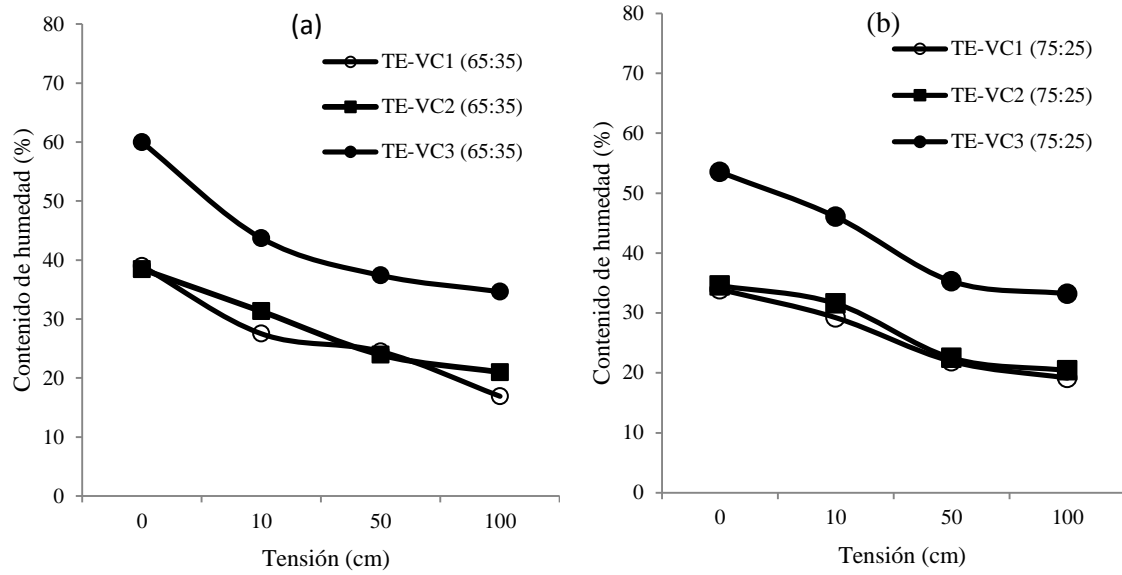


Figura 1. Curvas de humedad de las mezclas tezontle-vermicompost de estiércol de bovino más desechos vegetales (TE-VC1), vermicompost de estiércol bovino (TE-VC2) y tezontle-vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café (TE-VC3) para la proporciones a) 65-35 y b) 75-25.

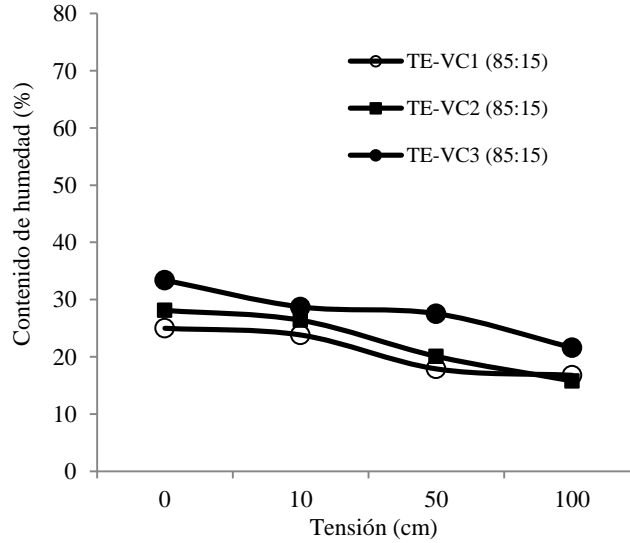


Figura 2. Curvas de humedad de las mezclas tezontle-vermicompost de estiércol de bovino más desechos vegetales (TE-VC1), vermicompost de estiércol bovino (TE-VC2) y tezontle-vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café (TE-VC3) para la proporción 85-15.

Así también, en las mezclas con mayor proporción de vermicompost (mayor MO) fue mayor el contenido de agua. Al respecto, Ndegwa *et al.* (2000) y Hashemimajd *et al.* (2004) señalan que las vermicompost incrementan la retención de agua, por lo que se usa en medios de crecimiento. No obstante, las proporciones 65-35 y 75-25 de las tres combinaciones de materiales (Figuras 1a y 1b) muestran contenidos de agua similares, mientras que en la proporción 85:15 el contenido de humedad fue menor (Figura 2).

También, se obtuvieron las propiedades químicas de las mezclas en laboratorio, como el pH, CE, CIC y N (Cuadro 9). El pH no varió en relación con la proporción de vermicompost en la mezcla; en cambio la CE, CIC y N disminuyeron conforme la proporción de vermicompost en la mezcla fue menor (Cuadro 9).

Cuadro 9. Propiedades químicas obtenidas en laboratorio de las combinaciones TE-VC1, TE-VC2 y TE-VC3 en las proporciones 65-35, 75-25 y 85-15. Montecillo, Texcoco. 2008.

Combinación, proporción	pH	Variables		
		CE	CIC	N
		mS cm ⁻¹	meq 100 g ⁻¹	g kg ⁻¹
TE-VC1,65-35	7.87 a	0.920 a	18.532 a	2.3 a
TE-VC1,75-25	7.87 a	0.686 b	12.635 b	1.9 b
TE-VC1,85-15	7.85 a	0.483 c	6.739 c	1.0 c
TE-VC2,65-35	7.74 a	0.486 a	20.638 a	3.2 a
TE-VC2,75-25	7.70 a	0.400 b	19.375 b	2.4 b
TE-VC2,85-15	7.62 a	0.170 c	13.550 c	0.7 c
TE-VC3,65-35	7.30 a	0.400 a	21.600 a	4.2 a
TE-VC3,75-25	7.25 a	0.313 b	20.217 b	3.3 b
TE-VC3,85-15	7.14 a	0.130 c	16.847 c	2.3 c

†Medias con misma letra dentro de mezcla y de columnas son significativamente iguales, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). TE = tezontle; VC1 = vermicompost de estiércol bovino más desechos vegetales; VC2 = vermicompost de estiércol bovino; VC3 = vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café.

De acuerdo a Ndegwa *et al.* (2000) la vermicompost contiene compuestos que elevan la CIC, además se considera a ésta como uno de los abonos orgánicos que puede satisfacer la demanda nutritiva de los cultivos (Manjarrez *et al.*, 1999).

El programa de optimización con SAS calculó y desplegó una serie de mezclas de materiales en sus proporciones respectivas, las cuales se consideran adecuadas de acuerdo a las restricciones hechas. Sin embargo, para elegir entre una proporción u otra, los valores de EPT no señalan una en particular, pues los valores se mantuvieron en general sin variación; la CA mostró mayor valor en la proporción 85:15 aunque tampoco muestra una proporción en especial, pues las tres variaron poco entre sí y tuvieron valores cercanos al 30%; sin embargo, la MO indica que la proporción 65:35 es la más adecuada (Cuadro 7), reafirmado esto por la mayor CIC y concentración de N determinadas en laboratorio en esta misma (Cuadro 9), y en la alta correlación encontrada entre estas propiedades en los materiales simples (Cuadro 2). Esto es importante considerarlo dado que un objetivo del uso de la mezcla incluyendo vermicompost, en el cultivo de plantas, es reducir la utilización de fertilizantes químicos. En lo que respecta a la selección entre una combinación de materiales u otra en la proporción 65:35 es otra situación, en la que hay que considerar aspectos como el económico. En relación a esto la mezcla TE-VC2 resultó ser la de mayor costo por unidad, dado el mayor costo de la vermicompost. Por lo tanto, de acuerdo a lo anterior, la mezcla TE-VC3, 65:35 resultó ser la mejor opción, en función de EPT, CA, MO y costo.

En general la elección de una mezcla u otra en una proporción determinada para llevarla a la práctica dependerá del objetivo que se persiga, del requerimiento del cultivo, así como de la disponibilidad económica.

1.4 CONCLUSIONES

- El programa de optimización con SAS proporciona opciones de mezcla de materiales de menores costos dentro de los rangos de las propiedades físicas y química establecidos, pero el determinar la mejor mezcla, es criterio propio, ya que depende del costo, finalidad y cultivo a establecer.
- La caracterización física y química de los materiales (por separado) es necesaria, ya que sirve para justificar la mezcla o no de los mismos.
- El espacio poroso total, la capacidad de aireación y el porcentaje de materia orgánica, pueden ser utilizadas en la obtención de mezclas mediante un programa de optimización con SAS, ya que la variación de los valores de las variables obtenidos en laboratorio y por el programa fue aceptable.
- Considerar el costo de las mezclas es necesario, ya que dependiendo de la viabilidad de éste puede o no seleccionarse o descartarse una mezcla, además de considerar el cumplimiento de los valores establecidos para las propiedades físicas y químicas.
- La elección de mezclas mediante la exploración de los resultados desplegados por el programa de optimización con SAS reduce el trabajo de laboratorio y gastos.

1.5 LITERATURA CITADA

- Abad, B.M., P. Noguera M. y C. Carrión B. 2004. Los sustratos en el cultivo sin suelo. *In*: M. Urrestarazu G. (ed). pp. 113-158. Tratado de cultivo sin suelo. Mundi-Prensa. Almería, España.
- Aendekerk, G.L., H. Cevat, N. Dolmans, C. van Elderen, J.A. Kipp, C. de Kreij, C. Sonneveld, J.B.G.M. Verhagen, and G. Wever. 2000. International substrate manual. Elsevier International. The Netherlands. 94 p.
- Ansorena, M.J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Mundi-Prensa. Madrid, España. 171 p.
- Argo, W.R. 1998. Transplant, production and performance: root medium chemical properties. *HortTech*. 4: 486-494.
- Baker, C.H, Curry R.B. 1976. Structure of agricultural simulators: a philosophical view. *Agricultural Systems* 1: 201-218.
- Baumgarten, A. 2008. Analytical methods for growing media- challenges and perspectives. *Acta Hort*. 779: 97-104.
- Bollo, E. 1999. Lombricultura: una alternativa de reciclaje. Quito, Ecuador. 149 p.
- Bragg, N.C. and B.J. Chambers. 1988. Interpretation and advisory applications of compost air-filled porosity (AFP) measurements. *Acta Hort*. 221: 35-44.
- Bunt, A.C. 1976. Modern potting compost. George Allen. London, UK 278 p.
- Burés, S. 1997. Sustratos. Ediciones Agrotécnicas S.L. Madrid, España. 338 p.
- Burés, S., F.X. Martínez, and M. Llorca. 1988. Preliminary study of the application of parametric linear programming in formulation of substrate mixes. *Acta Hort*. 221: 141-152.
- Buyatti, M. 2000. Evaluación del comportamiento agronómico del aserrín de salicáceas compostado en mezcla con perlita para la producción de plantines florales. *Revista Horticultura Argentina* 19: 94.
- Cabrera, R.I. 1999. Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. *Revista Chapingo-Serie Horticultura* 5: 5-11.
- Caron, J. and V.K.N. Nkongolo. 1999. Aeration in growing media: recent developments. *Acta Hort*. 481: 545-551.
- De Boodt, M., O. Verdonck, and I. Cappaert. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Hort*. 37: 2054-2062.
- Durán, L. y C. Henríquez, 2007. Caracterización química, física y microbiológica de vermicompostes producidos a partir de cinco sustratos orgánicos. *Agronomía Costarricense* 31: 41-51.
- Gass, S.I. 1969. Programación lineal. Métodos y aplicaciones. Ed. Continental. México, D.F. 431 p.
- Hashemimajd, K., M. Kalbasi, A. Golchin, and H. Shariatmandari. 2004. Comparison of vermicomposting and compost as potting media for growth of tomatoes. *J. Plant Nutr*. 27:1107-1123.
- Kirk, P.J. 1950. Método de Kjeldahl para nitrógeno total. *Anal. Chem*. 22: 354-358
- Landis, T.D. 2000. Contenedores y medios de crecimiento. *In*: Manual de viveros para la producción de especies forestales en contenedor. Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. pp. 41-92.

- Lemaire, F., L.M. Riviere, S.Stievernad, O. Marfa y S. Gschwander. 1998. Consequences of organic biodegradability on the physical, chemical parameters of substrates. *Acta Hort.* 469: 121-138.
- Manjarrez M., M. J., R. Ferrera-Cerrato y M. C. González-Chávez. 1999. Efecto de la vermicompost y la micorriza arbuscular en el desarrollo y tasa fotosintética de chile serrano. *Terra* 17: 9-15.
- Marfa, O., R. Cáceres, S. Gschwander, F. Giuffrida, F. Lemaire, V. Guérin, L.M. Rivière, and S. Stievenard. 1999. Consequencies de la biodegradabilitat de la materia orgánica en les propietats físiques i químiques dels substrats. *Quaderns Agraris* 24: 5-15.
- Moreno-Álvarez, J.M. 2002. La material orgánica y la capacidad de retención de humedad en sustratos. *Agricultura Orgánica* 1: 23-25
- Ndegwa P. M, S. A. Thompson, and K. C. Dass. 2000. Effects of stocking density and feeding rate on vermicomposting of biosolids. *Bioresour. Technol.* 71: 5-112.
- Nelson, P.V. 1991. *Greenhouse operation and management*. 4 ed. Prentice-Hall. Wachington, D.C., USA. 612 p.
- Owen, J.S., L. Stuart W., T.E. Bilderback, and D.K. Cassel. 2008. Physical properties of pine bark substrate amended with industrial mineral aggregate. *Acta Hort.* 779: 131-138.
- Pastor S.J.N. 1999. Utilización de sustratos en viveros. *Terra* 17: 231-325.
- Quesada, R.G. y C. Méndez S. 2005. Análisis fisicoquímico de materiales y sustratos de uso potencial en almácigos de hortalizas. *Rev. Agri. Trop.* 35:1-13.
- Rivière, L. M y J. Caron. 2001. Research on substrates: state of the art and need for the coming 10 years. *Acta Hort.* 548:29-41.
- Sánchez-Hernández, R., V.M. Ordaz-Chaparro, D.J. Palma-López y J. Sánchez-Bolón. 2006. El vermicompostaje: elemento útil en la agricultura sustentable. Fundación Produce Tabasco, A.C. Villahermosa, Tabasco. 47 p.
- SAS Institute. 1982. *SAS User's guide: Statitics*. Cary, NC, USA. 584 p.
- Strojny, Z. and J.S. Nowak. 2001. Effect of different growing media on the growth of some bedding plants. *Acta Hort.* 548: 335-342.
- Vázquez-Alarcón, A. 1996. Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo. UACH. Chapingo, México. Pp. 1-30.
- Verdonck, O. and P. Demeyer. 2004. The influence of the particle sizes on the physical properties of growing media. *Acta Hort.* 644: 99-101.
- Verdonck, O. and R. Gabriëls. 1992. Reference method for determination of physical properties of plant substrates, *Acta Hort.* 302: 169-79.
- Verdonck, O., R. Penninck and M. De Boodt. 1983. The physical properties of different horticultural substrates. *Acta Hort.* 150: 155-160.
- Zamora-Morales, B.P., P. Sánchez-García, V. H. Volke-Haller, D. Espinosa-Victoria y A. Galvis-Spíndola. 2005. Formulación de mezclas de sustratos mediante programación lineal. *Interciencia* 30: 365-369.

CAPÍTULO II. MEZCLA TEZONTLE-VERMICOMPOST OBTENIDA POR PROGRAMACIÓN, Y FERTILIZACIÓN INORGÁNICA EN EL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE TOMATE EN INVERNADERO

Resumen

Se evaluaron las mezclas de tezontle con dos vermicompost en la proporción 65:35, obtenida mediante un programa de optimización en SAS, y la utilización de solución nutritiva de Steiner: 0, 50, 75 y 100%, en el cultivo de tomate Charleston bajo invernadero. Se consideró un diseño de tratamientos factorial 2 x 4, en un diseño experimental completamente al azar utilizando ocho repeticiones. Se encontró que la solución nutritiva al 50% fue la más eficiente al utilizar tezontle en mezcla con vermicompost, ya que el rendimiento no fue estadísticamente afectado en relación a cuando se utilizó solución al 75 y 100%, aunque la concentración de N, P, Mg, Fe, Cu y Mn, y de las variables área foliar, peso seco de hoja y altura de planta se encontró diferencia entre solución al 50 y 100%. En cambio, la concentración nutrimental, crecimiento y rendimiento se vio disminuido al no utilizar la vermicompost en el medio de crecimiento. No se encontró diferencia entre vermicompost en las diferentes variables evaluadas. Se concluyó que la mezcla tezontle-vermicompost 65:35, obtenida a través del programa de mezclas en SAS fue apta para el crecimiento de plantas de tomate Charleston, la cual permitió a su vez la disminución de la fertilización inorgánica.

Palabras clave: *sustratos, solución de Steiner, proporción, nutrimentos, SPAD.*

2.1 INTRODUCCIÓN

Una de las principales hortalizas en México es el tomate y su producción bajo invernadero con uso de sustratos diversos se está popularizando. Por otra parte, se ha visto la conveniencia de buscar sistemas de producción sustentables, que además de promover prácticas que preservan los recursos naturales y la biodiversidad, permitan eficientizar los residuos que se derivan del sector agropecuario y de otras actividades (Porter-Humpert, 2000).

La preocupación mundial por reducir la contaminación, el cuidado por la salud, la creciente demanda de productos orgánicos y la disminución de costos ha llevado a productores con sistema hidropónico, de diversos países, a adaptar prácticas orgánicas al cultivo sin suelo (Inden y Torres, 2005; Grigatti *et al.*, 2007). Actualmente, en los sistemas de cultivo sin suelo se hace uso de la vermicompost. Este producto generado a partir de estiércoles, ha dado resultados favorables sobre el crecimiento y rendimiento de diversas especies tal como tomate en invernadero (Herrera *et al.*, 2009; Singh *et al.*, 2008), ya que posee propiedades físicas, químicas y biológicas que mejoran el medio de crecimiento y aporta nutrimentos (Zaller, 2007).

Sin embargo, la mezcla de sustratos se ha llevado a cabo mediante propuestas aisladas no sistematizadas, por lo que existen algunos trabajos que han intentado la generación de mezcla de sustratos por programación (Zamora-Morales *et al.*, 2005). Por otra parte, la mayoría de las investigaciones sobre el uso de la vermicompost se han orientado a estudiar la germinación de semillas o efecto en plántula, y poco en el crecimiento, rendimiento de fruto, y en el contenido nutrimental en la planta. Por lo que, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la mezcla tezontle-vermicompost en la proporción 65:35, obtenida mediante el programa de optimización en SAS, en combinación con diferentes concentraciones de solución de Steiner, en la concentración nutrimental de la planta, crecimiento y rendimiento de tomate bajo invernadero.

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se realizó utilizando los resultados obtenidos en el trabajo titulado “Diseño de mezclas de sustratos a través de un programa de optimización con SAS, utilizando variables físicas y químicas”, que se ubica en el Capítulo I de la presente tesis. Este programa, con base en las propiedades de espacio poroso total, capacidad de aireación, materia orgánica y costo de los materiales considerados, desplegó un listado de mezclas. De éstas se concluyó que la mezcla de tezontle más vermicompost de estiércol bovino y pulpa de café (TE + VC3) en la proporción 65:35 fue la mejor en función de las propiedades antes mencionadas, seguida de la mezcla tezontle más vermicompost de estiércol bovino más desechos vegetales (TE + VC1) y por último la mezcla de tezontle más vermicompost de estiércol bovino (TE + VC2), en la misma proporción.

Se decidió evaluar en el cultivo de tomate en invernadero la mezcla TE + VC1 con diferentes concentraciones de solución de Steiner, dada la disponibilidad de la VC1 en la región, ya que la VC3 se elaboró en el estado de Veracruz. También, se evaluó la vermicompost de estiércol bovino más desechos de jardinería que se produce en el Colegio de Postgraduados, la cual sustituyó a la VC2, dado que ésta presentó un alto costo.

2.2.1 Producción en invernadero

La investigación se realizó en los invernaderos del Colegio de Postgraduados (CP), Montecillo estado de México, en los meses de agosto de 2008 a febrero de 2009. La temperatura media máxima y mínima fue de 31.52 y 4.7 °C con humedad relativa (HR) media máxima y mínima de 92 y 19.8%, respectivamente.

Se utilizó semilla de tomate tipo bola de crecimiento indeterminado híbrido Charleston. La siembra se realizó el 1 de agosto de 2008 en charola de unicel, utilizando como medio de crecimiento mezcla de agrolita más fibra de coco 50:50 (v/v). Se aplicó riego con solución de Steiner al 25% hasta el momento del trasplante, el cual se realizó 35 días después de la siembra, colocando una plántula por bolsa (maceta), la cual fue de polietileno negro de 40 x 43 cm con 18 L de capacidad. Las bolsas fueron llenadas con el sustrato correspondiente, los cuales fueron: mezclas de tezontle (TE), tamaño de partícula de entre 2 y 10 mm, más vermicompost de estiércol bovino y desechos vegetales (VCa), denominándose sustrato A (SA = TE + VCa); como sustrato B se utilizó TE más vermicompost de estiércol bovino y desechos de jardinería (VCb) por lo que SB = TE + VCb, ambas mezclas en la proporción 65:35. Las macetas tuvieron un acomodo en tresbolillo a una distancia de 30 cm de tallo a tallo y 1 m entre pasillos. La composición nutrimental y propiedades químicas de las vermicompost fueron determinadas (Cuadros 10 y 11).

Cuadro 10. Principales propiedades físicas y químicas de los materiales utilizados para la elaboración del sustrato. Montecillo, Texcoco. 2008.

Sustrato	EPT	CA	MO	pH	CE	CIC	C/N
	----% volumen ----		% peso		dS m ⁻¹	meq 100 g ⁻¹	
TE	58.6	31.7	0.0	7.1*	0.08	2.7	-
VCa	63.0	18.8	36.5	8.8	3.35	57.3	16
VCb	59.4	11.5	32.2	8.3	2.6	51.1	13

TE = tezontle VCa = vermicompost de estiércol bovino y desechos vegetales 1; VCb = vermicompost de estiércol bovino y desechos de jardinería; EPT = espacio poroso total; CA = capacidad de aireación; MO = materia orgánica. *Este valor fue determinado utilizando agua destilada, cuyo pH fue de 6.5.

Cuadro 11. Composición nutrimental de las vermicompost evaluadas. Montecillo, Texcoco. 2008.

Vermicompost	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Cu	Zn	Mn
	-----g kg ⁻¹ -----						-----mg kg ⁻¹ -----			
VCa	11.0	5.2	10.6	20.2	6.5	1.9	26.3	1.02	15.0	18.04
VCb	9.7	19.7	4.3	18.6	3.3	1.4	69.0	0.82	17.43	23.3

VCa = vermicompost de estiércol bovino y desechos vegetales; VCb = vermicompost de estiércol bovino y desechos de jardinería.

Después del trasplante se mantuvo el riego con sólo agua durante tres días, al cuarto día se inició el riego con la correspondiente solución de Steiner (0, 50, 75 y 100%, S0, S50, S75 y S100), que fue preparada a partir de nitrato de calcio, nitrato de potasio, sulfato de magnesio, sulfato de potasio más micronutrientes. El pH de la solución fue de 6. El riego fue por goteo y el requerimiento varió de 3 a 5 por día durante 15 minutos, con un rango de 182 a 198 mL. La densidad de plantación fue de 3.47 plantas m⁻² con una planta de un solo tallo por maceta.

El control fitosanitario fue preventivo realizando una aplicación de Previcur[®] al tallo y quincenalmente aplicación de Manzate[®] al follaje.

2.2.2 Diseño experimental

Los factores y sus niveles fueron dos vermicompost y cuatro concentraciones de la solución Steiner: 0, 50, 75 y 100%, los que se combinaron en un arreglo factorial 2 x 4, en un diseño completamente al azar con ocho repeticiones. La unidad experimental fue una planta.

También se incluyó un tratamiento con sólo tezontle regado con solución de Steiner al 100% (S100TE) con el objeto de tener una referencia sin la utilización de vermicompost. El análisis estadístico se realizó mediante un análisis de varianza con el programa SAS (SAS Institute, 1982) y prueba de comparación de medias por Tukey.

2.2.3 Variables evaluadas

Las variables evaluadas fueron contenido nutrimental en hojas (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn), lecturas SPAD, número de hojas, altura de planta, diámetro de tallo, área foliar, peso seco de hoja y rendimiento de fruto.

El contenido nutrimental se determinó en hojas completamente expandidas, muestreadas a los 70 días después de trasplante (ddt). La determinación de N total se hizo por el método Kjeldahl (Kirk, 1950); para las determinaciones de P, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn y Mn, se realizó la digestión húmeda del material seco y el extracto obtenido se leyó en el espectrofotómetro de emisión atómica de inducción con plasma acoplado (ICP-AES VARIANTM Liberty II) (Alcántar y Sandoval, 1999); el nutriente K se determinó utilizando el flamómetro, IL Autocal Flame Photometer 643. Las lecturas SPAD se leyeron a los 40 y 70 ddt (SPAD 502, Minolta LTD). Se contó el número de hojas; altura de planta, se midió con cinta métrica desde el nivel del sustrato; diámetro de tallo, se midió con vernier 10 cm arriba del nivel del sustrato; área foliar total por planta, conforme se podaron las hojas 1 a 8 se introdujeron en el integrador de área foliar Li-COR, Inc. Li-3100; peso seco de hoja, las hojas 1 a 8 se secaron a 70 °C por 72 h en estufa con circulación de aire y después se pesaron; rendimiento de fruto total planta⁻¹, el fruto fue cosechado en color rosa extendido desde la parte apical, abarcando de 10 a 30% de la superficie (Jones, 1999).

2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1 Concentración de nutrimentos

El efecto de solución nutritiva y sustrato fue altamente significativo para la concentración de N, K, Ca, y Mn, siendo sólo significativo para P, Mg, Fe, Cu y Zn (Anexo A-1). La interacción solución nutritiva y sustrato mostró efecto significativo sólo para P (Figura 3).

Por otra parte, no se observó diferencias entre sustratos para la concentración en hoja de N, K, Ca, Cu, Zn y Mn; en cambio la concentración en hoja fue mayor para Mg y menor para P y Fe en el SA (Cuadro 12).

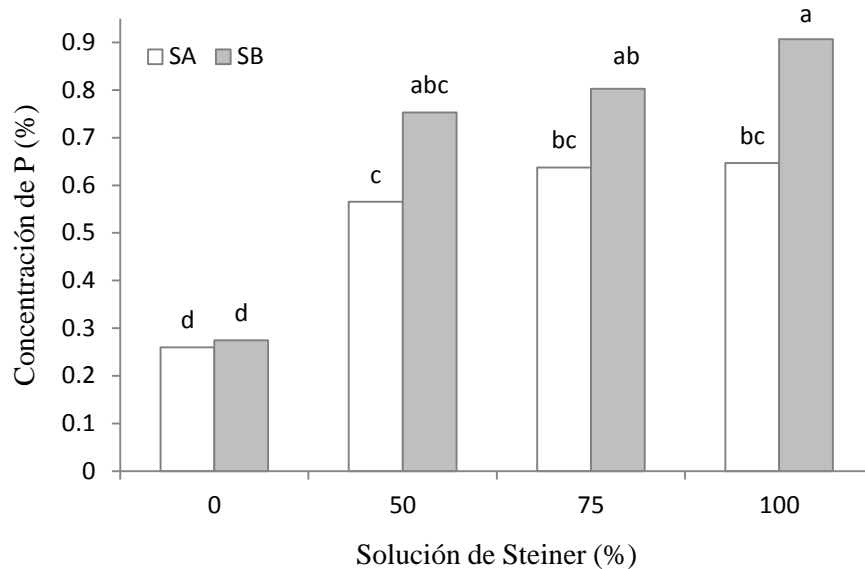


Figura 3. Interacción para la concentración de P en hojas de tomate bajo invernadero muestreadas a 70 días después de trasplante. SA = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos vegetales; SB = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos de jardinería.

Estos resultados guardaron relación con la concentración nutrimental de las vermicompost. Tognetti *et al.* (2005) indican que la riqueza nutrimental de los materiales compostados depende de los materiales de los cuales fueron elaborados, en este caso ambas vermicompost tuvieron en común el estiércol de bovino.

La concentración nutrimental en el tejido aumentó de 0 a 50% de concentración de la solución de Steiner para todos los nutrientes, no observándose diferencias entre 50 y 75% de concentración de la solución para N, P, K, Ca, Mg, Cu y Zn, aun cuando para N, P y Mg la concentración al 100% proporcionó valores ligeramente mayores que la concentración al 50%; para Fe las concentraciones 75 y 100% de la solución de Steiner dieron mayores valores que la concentración al 50%; para Cu la concentración 100% de la solución nutritiva mostró un mayor valor que las concentraciones 50 y 75%; para Mn la concentración aumentó conforme se incrementó la concentración de la solución Steiner (Cuadro 12).

Cuadro 12. Comparación de medias para la concentración de nutrimentos en hoja de tomate Charleston, a los 70 días después de trasplante bajo invernadero, en función de los sustratos y la concentración de la solución de Steiner. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.

Fuente de variación	Concentración macronutrimentos					Concentración micronutrimentos			
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn
	----- g kg ⁻¹ -----					----- mg kg ⁻¹ -----			
Solución									
S0	22 c [†]	2.7 c	19 b	23 b	4.9 c	422 c	5.1 c	53.4 b	29.4 d
S50	39 b	6.6 b	33 a	40 a	11.3 b	542 b	5.9 b	70.1 a	44.0 c
S75	40 ab	7.2 ab	34 a	43 a	11.6 ab	583 a	6.1 b	77.6 a	55.1 b
S100	42 a	7.8 a	36 a	46 a	13.8 a	601 a	6.5 a	71.6 a	75.4 a
Sustrato									
SA	36 a	5.3 b	31 a	39 a	11.1 a	524 b	5.8 a	69.7 a	50.2 a
SB	35 a	6.8 a	30 a	37 a	9.7 b	550 a	5.9 a	71.6 a	52.0 a

[†]Medias con misma letra dentro de columnas son significativamente iguales, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). S100 = solución de Steiner 100%; S75 = solución de Steiner 75%; S50 = solución de Steiner 50%; S0 = solución de Steiner al 0% (riego con agua); SA = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos vegetales; SB = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos de jardinería.

La concentración nutrimental de las plantas cultivadas con S0, puso en evidencia la presencia de nutrimentos en la vermicompost, por lo que es uno de los motivos por lo cual se han utilizado en el medio de crecimiento (Ao *et al.*, 2008; Márquez-Hernández *et al.*, 2008). Por otra parte, el poco incremento de la concentración nutrimental entre S50 y S100, pudo ser debido a que la necesidad nutrimental de macro y algunos micronutrimentos de la planta, quedó cubierta con la aplicación de la solución Steiner al 50% en combinación con la presencia de vermicompost en el medio de crecimiento. En el caso de Mn la concentración fue desigual con la aplicación de las diferentes soluciones (Cuadro 12), esto posiblemente a que este micronutriente se encontró en menor concentración en solución, ya que el trabajar con medios orgánicos, como fuente de fertilizantes, puede haber insuficiencia de algunos nutrimentos (Heeb *et al.*, 2005).

La concentración de macronutrimentos, encontrada en la presente tesis, coincide con otros estudios, mientras que para micronutrientes fueron contrastantes. Magdaleno-Villar *et al.* (2006) señala que plántulas de tomate de cáscara irrigadas con solución Steiner al 50% obtuvieron mayor contenido de

macronutrientes con respecto a las regadas con agua, no encontrando incremento a mayor concentración de ésta, en tanto que en el caso de micronutrientes no se encontró diferencia. En el mismo sentido, Preciado-Rangel *et al.* (2003), en plántulas de melón, no encontraron diferencias en el contenido de macronutrientes al disminuir el nivel de fertilizante inorgánico. Esta diferencia en el patrón de respuesta al variar el nivel de fertilización puede deberse a factores tales como la especie, variedad y estado fenológico de la planta, dado que en el presente trabajo el contenido nutrimental se evaluó 70 ddt.

Cuadro 13. Comparación de medias, entre tratamientos, para la concentración de macronutrientes en hoja de tomate Charleston a los 70 días después de trasplante, cultivado bajo invernadero. Montecillo, Texcoco. Ciclo otoño-invierno 2008.

Tratamiento	Concentración nutrimental				
	N	P	K	Ca	Mg
	-----g kg ⁻¹ -----				
S100SA	41.8 a [†]	6.5 bc	37.3 a	47.2 a	15.3 a
S100SB	41.9 a	9.1 a	35.1 a	45.3 a	12.4 ab
S75SA	40.4 ab	6.4 bc	34.5 a	44.4 a	12.2 ab
S75SB	39.7 ab	8.0 ab	33.6 a	41.5 a	19.0 b
S50SA	39.4 ab	5.7 cd	33.4 a	40.2 ab	12.0 ab
S50SB	38.0 bc	7.5 ab	33.2 a	40.1 ab	10.5 b
S0SA	23.5 d	2.6 e	21.0 b	23.9 c	5.0 c
S0SB	21.4 d	2.8 e	18.8 b	21.9 c	3.9 c
S100TE	35.5 c	4.5 d	23.3 b	30.4 bc	9.7 b

[†]Medias con misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$); S100 = solución de Steiner 100%; S75 = solución de Steiner 75%; S50 = solución de Steiner 50%; S0 = solución de Steiner al 0% (riego con agua); SA = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos vegetales; SB = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos de jardinería; TE = tezontle.

Por otra parte, en el Cuadro 13 se aprecia que S100TE fue el de menor concentración en macronutrientes, excepto Mg, en relación a los tratamientos que incluyeron vermicompost y solución Steiner al 50, 75 y 100%, pero superior a los dos tratamientos que fueron regados con sólo agua.

Además, S100TE fue igual al tratamiento S50SB para el caso de N, e igual a S50SA para el caso de P, lo cual pudo estar relacionado con el contenido de éstos en las vermicompost (Cuadro 11) ya que S100TE fue diferente de S50SA en el caso de N y de S50SB en el caso de P.

En cuanto a micronutrientes, en general el S100TE fue el de menor concentración en relación a los tratamientos con vermicompost y solución de Steiner a 50, 75 y 100%, pero a diferencia de macronutrientes, el S100TE tuvo igual concentración que los tratamientos sin solución nutritiva (Cuadro 14).

Cuadro 14. Comparación de medias entre tratamientos para la concentración de micronutrientes en hoja de tomate Charleston a los 70 días después de trasplante, cultivado bajo invernadero. Montecillo, Texcoco. Ciclo otoño-invierno 2008.

Tratamiento	Concentración nutrimental			
	Fe	Cu	Mn	Zn
	----- mg kg ⁻¹ -----			
S100SA	591.79 a [†]	6.42 ab	70.79 a	80.78 a
S100SB	610.40 a	6.60 a	79.94 a	82.47 a
S75SA	578.89 a	6.08 abc	56.07 b	77.18 ab
S75SB	586.29 a	6.12 abc	54.23 bc	78.05 a
S50SA	537.89 ab	5.71 c	43.75 c	68.10 abc
S50SB	545.83 ab	5.99 bc	44.05 c	72.00 abc
S0SA	387.25 c	5.03 d	30.07 d	52.72 c
S0SB	455.76 bc	5.08 d	28.82 d	64.01 bc
S100TE	375.45 c	4.89 d	25.60 d	54.59 bc

[†]Medias con misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$); S100 = solución de Steiner 100%; S75 = solución de Steiner 75%; S50 = solución de Steiner 50%; S0 = solución de Steiner al 0% (riego con agua); SA = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos vegetales; SB = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos de jardinería; TE = tezontle.

Lo anterior, puede explicarse debido a que la cantidad de agua por riego y el número de éstos fue igual para todos los tratamientos, pero en el S100TE el sustrato fue sólo tezontle, del cual se excluyeron partículas menores de 2 mm, por lo que en éste se tuvo una menor retención de agua dado que la presencia de partículas pequeñas la incrementa (Vendonck y Demeyer, 2004); como consecuencia de

una menor retención de agua hubo una menor disponibilidad de nutrientes en solución para la raíz. Contrario a esto, en los tratamientos con vermicompost la retención de agua fue mayor y también los nutrimentos cuando se utilizó solución de Steiner al 50, 75 y 100%, dado que la disponibilidad de estos depende de la cantidad total en el sustrato y de otros factores como la CIC, la cual fue alta en las vermicompost utilizadas (Heeb *et al.*, 2005; Hashemimajd *et al.*, 2004; Grigatti *et al.*, 2007a). Así, los resultados encontrados coincidieron con los de otros ensayos donde macro y micronutrimentos incrementaron en el tejido de la planta al adicionar material compostado en el medio de crecimiento, cuyo aumento estuvo en función del contenido nutrimental del material (Pérez-Murcia *et al.*, 2006; Grigatti *et al.*, 2007a).

De acuerdo con Jones (1999), la concentración de los macronutrimentos en hoja de los tratamientos que incluyeron vermicompost y riego con S50, S75 y S100 se ubicaron dentro del rango normal para cultivo de tomate. En tanto que, en los regados con agua, sólo el Ca se ubicó dentro del rango normal, mientras que con S100TE únicamente el K se ubicó fuera del rango adecuado (Cuadro 13). En relación a micronutrimentos, el Fe se ubicó sobre el nivel máximo del rango normal en todos los tratamientos, mientras que Zn se encontró dentro del rango normal. El Mn se ubicó fuera de la concentración normal en los tratamientos con agua y S100TE y Cu en el S100TE (Cuadro 14).

2.3.2 Lecturas SPAD

El análisis de varianza mostró para efecto de la solución nutritiva diferencias altamente significativas para ambas fechas de muestreo, mientras que para efecto por sustrato e interacción solución por sustrato fue no significativo (Anexo A-2).

En cuanto a la comparación de medias no se encontró diferencia entre sustratos en ambas fechas de muestreo. Sin embargo, las lecturas SPAD variaron por la concentración de la solución nutritiva, siendo mayores conforme aumentó la concentración de la solución de 0 a 75%; entre 75 y 100% no se

presentó incremento de las lecturas SPAD, comportamiento que fue similar en ambas fechas de muestreo (Cuadro 15). Esto muestra que el cultivo respondió a la fertilización inorgánica, dado que las lecturas SPAD mostraron igual comportamiento que la concentración de N, P y Mg. Al respecto, Fang-Lin *et al.* (2010) mencionan que las lecturas SPAD pueden ser utilizadas para monitorear el status de N en la hoja.

Cuadro 15. Comparación de medias para lecturas SPAD de hojas de cultivo de tomate Charleston a diferentes días después de transplante (ddt) bajo invernadero, en función de los sustratos y la concentración de la solución de Steiner. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.

Fuente de variación	Lecturas SPAD		Fuente de variación	Lecturas SPAD	
	40 ddt	70 ddt		40 ddt	70 ddt
Solución			Sustrato		
S0	44.65 c [†]	36.77 c	SA	52.91 a	47.57 a
S50	51.76 b	45.30 b	SB	51.93 a	47.03 a
S75	55.94 a	53.26 a			
S100	57.33 a	53.80 a			

[†]Medias con misma letra dentro de columnas son significativamente iguales, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). S100 = solución de Steiner 100%; S75 = solución de Steiner 75%; S50 = solución de Steiner 50%; S0 = solución de Steiner al 0% (riego con agua); SA = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos vegetales; SB = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos de jardinería.

También se observó que las lecturas SPAD disminuyeron conforme avanzó el desarrollo del cultivo, siendo consistente en todos los tratamientos (Cuadro 15). Esto coincide con otros trabajos como el realizado por Juárez-Rosete *et al.* (2006) en cultivo de fresa, quienes también emplearon diferentes concentraciones de solución Steiner.

Por otra parte, en el Cuadro 16 se muestra que las lecturas SPAD del tratamiento S100TE tanto a 40 como 70 ddt fueron diferentes con los tratamientos que implicaron S50, S75 y S100, con los valores más altos para éstos. Las lecturas SPAD de los tratamientos irrigados con agua registraron lecturas menores respecto de S100TE. Por lo tanto, podemos decir que la presencia de vermicompost en el

medio de crecimiento coadyuvó en el incremento de la concentración de N en la hoja y de la fotosíntesis cuando el medio de crecimiento fue regado con solución de Steiner al 50 y 75%, esto porque altas cantidades de N en estudios diversos se ha relacionado con incremento en la fotosíntesis (Siddiqui *et al.*, 2010).

Cuadro 16. Comparación de medias entre tratamientos de Lecturas SPAD de hojas de tomate Charleston, a diferentes días después de trasplante (ddt) bajo invernadero. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.

Tratamiento	Lecturas SPAD	
	40 ddt	70 ddt
S100SA	58.01 a [†]	53.61 a
S100SB	56.66 ab	54.00 a
S75SA	55.72 ab	53.48 a
S75SB	56.16 ab	53.05 a
S50SA	52.58 bc	45.44 b
S50SB	50.95 c	45.16 b
S0SA	45.33 d	37.75 c
S0SB	43.96 d	35.80 c
S100TE	44.71 d	35.18 c

[†]Medias con misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$); S100 = solución de Steiner 100%; S75 = solución de Steiner 75%; S50 = solución de Steiner 50%; S0 = solución de Steiner al 0% (riego con agua); SA = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos vegetales; SB = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos de jardinería; TE = tezontle.

2.3.3 Crecimiento

De acuerdo al análisis de varianza se encontró para efecto de solución nutritiva diferencias altamente significativas para NH, DT y AF; mientras que fueron significativas para AP, AF y PSH (Anexo A-3).

Por otra parte, la comparación de medias señala que todas las variables de crecimiento incrementaron su valor cuando la concentración de la solución nutritiva aumentó de 0 a 50%; no obstante, AP, AF al igual que PSH, también aumentaron cuando la solución nutritiva fue de 100% (Cuadro 17). Sin embargo, aunque hubo diferencia entre 50 y 100% de concentración de la solución para estas tres

últimas variables, se consideró que el crecimiento no fue representativo de la concentración de la solución. Esto debido a la acumulación de sales en el medio de crecimiento, ya que las vermicompost utilizadas presentaron una alta CE, esto aunado al 75 o 100% de la concentración de la solución pudo disminuir la absorción de agua y por lo tanto la de nutrientes (Siddiqui *et al.*, 2010). Esto pudo constatarse mediante la concentración de nutrientes en hoja, en particular los macronutrientes (Cuadro 12), ya que el comportamiento de la concentración de estos fue similar al de las variables de crecimiento. Al respecto, Raviv *et al.* (2005) y Siddiqui *et al.* (2008) comentan que el suministro de N incrementa N y K en el tejido, lo que a su vez incrementa el crecimiento (materia seca), dado que ambos son componentes de muchos compuestos metabólicos que juegan un papel importante en las funciones fisiológicas. En cuanto a los sustratos las variables de crecimiento fueron semejantes en ambos, lo cual coincidió con la concentración nutricional.

Cuadro 17. Comparación de medias de las variables de crecimiento y rendimiento de tomate Charleston, en función de los sustratos y la concentración de la solución de Steiner. Ciclo invierno 2008-2009.

Fuente de variación	Variables de crecimiento					Rendimiento g planta ⁻¹
	NH	AP	DT	AF	PSH	
		m	cm	cm ⁻²	g	
Solución						
S0	14.1 b [†]	1.56 c	1.36 b	1948 c	15.7 c	2727 b
S50	17.5 a	1.89 b	1.83 a	3198 b	27.5 b	4865 a
S75	18.7 a	1.94 ab	1.84 a	3418 ab	29.0 ab	4784 a
S100	18.4 a	1.98 a	1.84 a	3733 a	32.6 a	5110 a
Sustrato						
SA	17.3 a	1.86 a	1.72 a	3100 a	26.8 a	4395 a
SB	17.0 a	1.82 a	1.71 a	3048 a	25.6 a	4347 a

[†]Medias con misma letra dentro de columnas son significativamente iguales, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). S100 = solución de Steiner 100%; S75 = solución de Steiner 75%; S50 = solución de Steiner 50%; S0 = solución de Steiner al 0% (riego con agua); SA = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos vegetales; SB = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos de jardinería.

Por otra parte, el tratamiento S100TE obtuvo para AP, DT, AF y PSH valores intermedios a los obtenidos con los tratamientos que implicaron vermicompost más solución de Steiner (S50, S75 y

S100) y de los tratamientos con S0 (sin solución Steiner) (Cuadro 18). En cuanto al NH el S100TE produjo la misma cantidad que en los tratamientos con S50.

La diferencia en el crecimiento, principalmente AF y AP, se relacionó con el déficit de agua en el medio de crecimiento del tratamiento S100TE, y como consecuencia de ello una menor concentración nutrimental (por lixiviación de nutrientes por la menor retención hídrica, ya que se eliminaron partículas menores de 2 mm), ya que la expansión celular es uno de los procesos fisiológicos más sensibles al déficit hídrico (De Grazia *et al.*, 2004; Hong-Bo *et al.*, 2008).

Cuadro 18. Comparación de medias entre tratamientos de las variables de crecimiento y rendimiento de tomate Charleston cultivado bajo invernadero. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.

Tratamiento	Variables de crecimiento					Rendimiento
	NH	AP	DT	AF	PSH	
		m	cm	cm ⁻²	----- g planta ⁻¹ -----	
S100SA	18.5 a [†]	1.99 a	1.83 a	3843 a	34.05 a	5141 a
S100SB	18.3 ab	1.97 a	1.85 a	3623 a	31.16 a	5079 a
S75SA	18.8 a	1.95 a	1.86 a	3472 a	29.50 a	4713 a
S75SB	18.6 a	1.94 a	1.84 a	3363 a	27.93 a	4857 a
S50SA	17.5 ab	1.90 a	1.86 a	3302 a	27.79 a	4930 a
S50SB	17.5 ab	1.88 a	1.81 a	3093 a	27.12 a	4800 a
S0SA	14.3 c	1.60 c	1.35 b	1992 b	16.18 b	2799 bc
S0SB	14.0 c	1.52 c	1.38 b	1903 b	15.29 b	2656 c
S100TE	16.4 b	1.67 c	1.36 b	2268 b	19.09 b	3685 b

[†]Medias con misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$); S100 = solución de Steiner 100%; S75 = solución de Steiner 75%; S50 = solución de Steiner 50%; S0 = solución de Steiner al 0% (riego con agua); SA = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos vegetales; SB = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos de jardinería; TE = tezontle.

Los resultados de las diferentes variables de crecimiento encontrados en el presente trabajo coinciden con otras investigaciones donde se han probado tratamientos con y sin materiales compostados en diferentes cultivos (Moreno-Resendez *et al.*, 2005; Grigatti *et al.*, 2007a; Grigatti *et al.*, 2007b; Azarmi *et al.*, 2008; Bachman *et al.*, 2008; Azarmi *et al.*, 2009).

Se menciona que el efecto sobre el crecimiento no solo se atribuye a la disponibilidad nutrimental de las vermicompost, sino que también podría ser debido a la presencia de compuestos reguladores del crecimiento tal como hormonas y ácidos húmicos, incremento de la población de microorganismos benéficos y a las condiciones de crecimiento (Arancon *et al.*, 2004; Arancon *et al.*, 2008); esto no debe dejar de considerarse puesto que en el presente trabajo se obtuvo mayor EPT, CA, MO y CIC para la vermicompost VCa (Cuadro 10, 11), lo cual posiblemente influyó para obtener una tendencia a mayor AF y PSH en este sustrato.

2.3.4 Rendimiento

El análisis de varianza señala que el rendimiento de fruto no fue modificado por efecto del sustrato; sin embargo, por efecto de solución las diferencias fueron altamente significativas (Anexo A-3). Tampoco se encontró efecto por interacción solución por sustrato.

El rendimiento de fruto fue similar entre sustratos (Cuadro 17); sin embargo este fue afectado por la concentración de la solución nutritiva, donde los tratamientos sin solución de Steiner presentaron el menor rendimiento. Por otra parte, no se encontraron diferencias entre S50, S75 y S100 ni interacción solución por sustrato. Esto es coherente con lo encontrado en tomate por Rodríguez-Dimas *et al.* (2008); Cruz-Lázaro *et al.* (2009); De Grazia *et al.* (2006); Azarmi *et al.* (2008 y Azarmi *et al.* (2009). No obstante, aunque se observa que el rendimiento de S100 fue mayor en 4.79% respecto de S50, no fue significativo, contrario a lo encontrado con el contenido nutrimental de N, P, Mg, Fe, Cu y Mn. Sin embargo, en las variables de crecimiento AP, AF y PSH hubo diferencia entre S50 y S100, como ocurrió con la concentración de nutrimentos. Esta situación nos llevó a deducir que en los tratamientos con S75 y S100 respecto del S50 hubo mayor cantidad de nutrimentos en el sustrato que se destinó a un mayor crecimiento vegetativo, por lo que no se obtuvo un rendimiento representativo de la concentración nutrimental de los tratamientos en cuestión. Heeb *et al.* (2005) mencionan que después

de cierto nivel de nutrimentos, tal como N ya no incrementa el rendimiento de fruto de tomate pero si el de biomasa. Por su parte, Hong-Bo *et al.* (2008) reportan que la reducción en el área foliar causado por estrés hídrico es una causa importante de la reducción en el rendimiento ya que se disminuye fotosíntesis. Esto puede observarse en las lecturas SPAD las cuales fueron menores para los tratamientos S100TE, S0SA y S0SB, en cuyos tratamientos el rendimiento fue menor (Cuadro 18).

2.4 CONCLUSIONES

- La mezcla tezontle-vermicompost en proporción 65:35, en combinación con solución nutritiva al 50% fue el de mayor factibilidad económica, dado que la concentración nutrimental, lecturas SPAD, número de hojas, altura de planta, diámetro de tallo, aérea foliar, peso seco de hojas y rendimiento aumentaron en relación a las regadas sólo con agua; además, se alcanzó el mismo rendimiento que utilizando solución al 75 y 100%.
- La aplicación de solución Steiner al 100% utilizando como sustrato sólo al tezontle, y la mezcla tezontle-vermicompost en proporción 65:35 y riego con agua resultaron ser insuficientes para que las plantas de tomate alcanzaran los valores obtenidos en rendimiento y variables de crecimiento al cultivarlos en las mezclas de tezontle con vermicompost y solución Steiner al 50, 75 y 100%.
- La presencia de vermicompost en 35% del volumen del sustrato coadyuvó en reducir la fertilización inorgánica en un 50%, sin afectar estadísticamente el crecimiento y rendimiento.

2.5 LITERATURA CITADA

- Alcántar G., G. y M. Sandoval V. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación especial no. 10 de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. Chapingo, México. 156 p.
- Ao, Y., M. Sun, and Y. Li. 2008. Effect of organic substrates on available elemental contents in nutrient solution. *Bioresour. Technol.* 99: 5006-5010.
- Arancon, N.Q., C.A. Edwards, A. Bebenko, and J. Cannon. 2008. Influences of vermicompost, produce by earthworms and microorganisms from cattle manure, food waste and paper waste, on the germination, growth and flowering of petunias in the greenhouse. *Appl. Soil Ecol.* 39: 91-99.
- Arancon, N.Q., C.A. Edwards, R. Atiyeh, and J.D. Metzger. 2004. Effects of vermicompost produced from food waste on the growth and yields of greenhouse peppers. *Bioresour. Technol.* 93: 139-144.
- Azarimi, R., M. Torabi-Giglou, and B. Hajieghrari. 2009. The effect of sheep-manure vermicompost on quantitative properties of cucumber (*cucumis sativus* L.) grown in the greenhouse. *Afr. J. Biotechnol.* 8: 4953-4957.
- Azarimi, R., P. Sharifi-Ziveh, and M. Reza-Satari. 2008. Effect of vermicompost on growth, yield and nutrition status of tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Pak. J. Biol. Sci.* 11: 1797-1802.
- Bachman, G.R. and J.D. Metzger. 2008. Growth of bedding plants in commercial potting substrate amended with vermicompost. *Bioresour. Technol.* 99: 3155-3161.
- Cruz-Lázaro, E., M.A. Estrada-Botello, V. Robles-Torres, R. Osorio-Osorio, C. Márquez-Hernández y R. Sánchez-Hernández. 2009. Producción de tomate en invernadero con composta y vermicomposta como sustrato. *Universidad y Ciencia* 25: 59-67.
- De Gracia, J., P.A. Tittonell, and A. Chiesa. 2004. Growth and quality of sweet pepper (*Capsicum annum* L.) transplants as affected by substrate properties and irrigation frequency. *Adv. Hort. Scie.* 18: 181-187.
- De Grazia, J., P.A. Tittonell y A. Chiesa. 2006. Efecto de sustratos con compost y fertilización nitrogenada sobre la fotosíntesis, precocidad y rendimiento de pimiento (*Capsicum annum*). *Ciencia e Investigación Agraria* 34: 195-204.
- Fang-Lin, F., L. Feng-Qiu, J. Song-Deng, Y. Yuan-Shi, L. Su-Chen, and K. Wang. 2010. Investigation of SPAD meter-based indices for estimating rice nitrogen status. *Computers and Electronics in Agriculture* 715: 560-565.
- Grigatti, M., M.E. Giorgioni, and C. Ciavatta. 2007a. Compost-based growing media: influence on growth and nutrient use of bedding plants. *Bioresour. Technol.* 98: 3526-3534.
- Grigatti, M., M.A. Giorgioni, L. Cavani, and C. Ciavatta. 2007b. Vector analysis in the study of the nutritional status of *Philodendron* cultivated in compost-based media. *Scie. Hort.* 112: 448-455.
- Hashemimajd, K., M. Kalbasi, A. golchin, and H. Shariatmadari. 2004. Comparison of vermicompost and compost as potting media for growth of tomatoes. *J. Plant Nutr.* 27: 1107-1123.
- Heeb, A., B. Lundegardh, T. Ericsson, and G.P. Savage. 2005. Effects of nitrate, ammonium, and organic-nitrogen-based fertilizers on growth and yield of tomatoes. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168: 123-129.
- Herrera, F., J.E. Castillo, A.F. chica, and L. López-Bebillo. 2008. Use of municipal solid waste compost (MSWC) as a growing medium in the nursery production of tomato plants. *Bioresour. Technol.* 99: 287-296.

- Hong-Bo, S., C. Li-Ye, A.J. Cheruth, and Z. Chang-Xing. 2008. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *C. R. Biologies* 331: 215-225.
- Inden, H. and A. Torres. 2005. Comparison of four substrates on the growth and quality of tomatoes. *Acta Hort.* 644: 205-210.
- Jones, J.B. 1999. Tomato plant culture: In the field, greenhouse and home garden. CRC Press LLCork. New York, NY, USA. 199 p.
- Juárez-Rosete, C.R., M. Sandoval-Villa y A. Muratalla-Lúa. 2007. Comparación de tres sistemas de producción de fresa en invernadero. *Terra* 25: 17-23.
- Kirk, P.J. 1950. Método de Kjeldahl para nitrógeno total. *Anal. Chem.* 22: 354-358.
- Magdaleno-Villar, J.J., A. Peña-Lomelí, R. Castro-Brindis, A.M. Castillo-González, A. Galvis-Spidola, F. Ramírez-Pérez y B. Hernández-Hernández. 2006. Efecto de soluciones nutritivas sobre el desarrollo de plántulas de tomate de cáscara. *Revista Chapingo* 12: 223-229.
- Márquez-Hernández, C., P. Cano-Ríos y N. Rodríguez-Dimas. 2008. Uso de sustratos orgánicos para la producción de tomate en invernadero. *Agric. Téc. Méx.* 34:69-74.
- Moreno-Resendez, A., M.T. Valdez-Perezgasga y T. Zarate-López. 2005. Desarrollo de tomate en sustratos de vermicompost/arena bajo condiciones de invernadero. *Agric. Téc. Méx.* 65: 26-34.
- Pérez-Murcia, M.D., R. Moral, J. Moreno-Caselles, and A. Pérez-Espinosa. 2006. Use of composted sewage sludge in growth media for broccoli. *Bioresour. Technol.* 97: 123–130.
- Porter-Humpert, C. 2000. New trends in sustainable farming build compost use. *ByoCycle* 41: 30-35.
- Preciado-Rangel, P., G.A. Baca-Castillo, J.L. Tirado-Torres, J. Kohashi-Shibata, L.Tijerina-chávez y A. Martínez-Garza. 2003. Presión osmótica de la solución nutritiva y la producción de plántulas de melón. *Terra* 21: 461-470.
- Raviv, M., Y. Oka, J. Katan, Y. Hadar, A. Yogev, S. Medina, A. Krasnovsky, and H. Ziadna. 2005. High-nitrogen compost as a médium for organic container-grown crops. *Bioresour. Technol.* 96: 419-427.
- Rodríguez-Dimas, N., P. Cano-Ríos, U. Figueroa-Viramontes, A. Palomo-Gil, E. Favela-Chávez, V. Álvarez-Reyna, C. Márquez-Hernández y A. Moreno-Reséndez. 2008. Producción de tomate en invernadero con humus de lombriz como sustrato. *Rev. Fitotec. Mex.* 31: 265-272.
- SAS Institute Inc. 1982. SAS User's guide: Statitics. Cary, NC, USA. 584 p.
- Siddiqui, M.H., F. Mohammad, M.N. Khan, M.H. Al-Whaibi, and A.H.A. Bahkali. 2010. Nitrogen in relation to photosynthetic capacity and accumulation of osmoprotectant and nutrients in *Brassica* genotypes grown under salt stress. *Agric. Sci. China* 9: 671-680.
- Siddiqui, M.H., F. Mohammed, M.N. Khan, and M.M .A. Khan. 2008. Cumulative effect of soil and foliar application of nitrogen, phosphorus, and sulfuro on growth, physico-biochemical parameters, yield attributes, and fatty acid composition in oil of erucic acid-free rapessed-mustard genotypes. *J. Plant Nutr.* 31: 1284-1298.
- Singh, R., R.R. Sharma, S. Kumar, R.K. Gupta, and R.T. Patil. 2008. Vermicompost substitution influences growth, physiological disorders, fruit yield and quality of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Bioresour. Technol.* 99: 8507-8511.

- Tognetti, C., F. Laos, M.J. Mazzarino, and M.T. Hernández. 2005. Composting vs vermicomposting: a comparison of end product quality. *Compost Scie. Util.* 13: 6-13.
- Verdonck, O. and P. Demeyer. 2004. The influence of the particle sizes on the physical properties of growing media. *Acta Hort.* 644: 99-101.
- Zaller, J.G. 2007. Vermicompost as a substitute for peat in potting media: effects on germination, biomass allocation, yields and fruit quality of three tomato varieties. *Scie. Hort.* 112: 191-199.
- Zamora-Morales, B.P., P. Sánchez-García, V.H. Volke-Haller, D. Espinosa-Victoria y A. Galvis-Spinola. 2005. Formulación de mezclas de sustratos mediante programación lineal. *Interiencia* 30: 365-369.

CAPÍTULO III. CALIDAD DE TOMATE CULTIVADO BAJO INVERNADERO EN MEZCLA DE TEZONTLE:VERMICOMPOST, OBTENIDA POR PROGRAMACIÓN, Y FERTILIZACIÓN QUÍMICA

Resumen

El objetivo del presente estudio fue evaluar la calidad en frutos de tomate Charleston cultivados en mezcla de tezontle con dos vermicompost en la proporción 65:35 y regados con solución de Steiner a 0, 50, 75 y 100% bajo invernadero en un diseño completamente al azar con ocho repeticiones y con arreglo factorial 2 x 4. También, se evaluó tezontle regado con solución de Steiner al 100%. Se determinó pH, sólidos solubles totales, acidez titulable, color (L, hue, croma), firmeza, pérdidas de peso y vida de anaquel. Se encontró efecto de la solución nutritiva en la mayoría de las variables, excepto para pH, el cual varió de 4.12 a 4.2. Los mayores valores en sólidos solubles totales (5.79 °Brix), firmeza (0.63 kg cm⁻²), las menores pérdidas de peso, mejor color (hue) y la mayor vida de anaquel (15.62 días) se obtuvieron con la aplicación de la solución Steiner al 50%, a mayor concentración de ésta no se encontraron respuestas favorables. Tampoco se obtuvieron diferencias entre las vermicompost utilizadas, excepto para acidez. Además, los tratamientos de vermicompost-tezontle regados con agua en la mayoría de las variables fueron similares al tratamiento tezontle más solución Steiner al 100%.

Palabras clave: color, firmeza, vida de anaquel, sólidos solubles totales, pérdidas de peso.

3.1 INTRODUCCIÓN

El tomate es la principal hortaliza cultivada a nivel mundial y tiene amplia variedad de usos, tal como el consumo en fresco o industrializado y se cultiva tanto a cielo abierto como en condiciones protegidas (Flores *et al.*, 2007).

En la producción de hortalizas bajo invernadero la utilización de sustratos orgánicos como las vermicompost ha representado una mejora a las prácticas agrícolas, ya que su uso ha llevado al aprovechamiento de desechos provenientes de diversas actividades y ha permitido la reducción del uso de fertilizante sintético sin efecto negativo en la producción (Rodríguez-Dimas *et al.*, 2009; Fortis-Hernández *et al.*, 2009; Moreno-Reséndez *et al.*, 2008).

No obstante, el uso de los diferentes sustratos han mostrado efecto en la calidad del fruto de tomate (Inden y Torres, 2004). La calidad de frutos, en general, implica varias propiedades o características (dependiendo del uso al que se vaya a destinar el producto), tal como sabor (dado por azúcares y ácidos), color (pigmentos), contenido nutricional, firmeza, apariencia, defectos, vida de anaquel y resistencia en pre y post cosecha a patógenos (Tu *et al.*, 2007; Brummell *et al.*, 2002). En tomate los criterios de calidad considerados más importantes son: firmeza, color (Batu, 2004) sólidos solubles totales y acidez (Jones, 1999). No obstante, en muchos trabajos donde se ha llevado a cabo el estudio del uso de vermicompost como sustrato, la calidad se ha evaluado en términos sólo de sólidos solubles totales y acidez.

Por lo anterior, en la presente investigación el objetivo fue evaluar la calidad, en términos de sólidos solubles totales, acidez, pH, firmeza de frutos, pérdidas de peso en el tiempo, color de fruto y vida de anaquel de frutos de tomate Charleston cultivados en mezcla de tezontle:vermicompost en la

proporción 65:35, obtenida mediante programación en SAS, en combinación con diferentes concentraciones de solución de Steiner.

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se llevó a cabo la evaluación de la calidad de fruto de tomate Charleston que se obtuvo del trabajo titulado “Mezcla tezontle-vermicompost obtenida por programación, y fertilización inorgánica en el crecimiento y rendimiento de tomate en invernadero” que se ubica en el Capítulo II de la presente tesis.

3.2.1 Producción en invernadero

La investigación se realizó en los invernaderos del Colegio de Postgraduados (CP), Montecillo estado de México, en los meses de agosto de 2008 a febrero de 2009. La temperatura media máxima y mínima fue de 31.52 y 4.7 °C con humedad relativa (HR) media máxima y mínima de 92 y 19.8%, respectivamente.

Se utilizó semilla de tomate tipo bola de crecimiento indeterminado híbrido Charleston. La siembra se realizó el 1 de agosto de 2008 en charola de unicel, utilizando como medio de crecimiento mezcla de agrolita más fibra de coco 50:50 (v/v). Se aplicó riego con solución de Steiner al 25% hasta el momento del trasplante, el cual se realizó 35 días después de la siembra, colocando una plántula por bolsa (maceta), la cual fue de polietileno negro de 40 x 43 cm con 18 L de capacidad. Las bolsas fueron llenadas con el sustrato correspondiente, los cuales fueron: mezclas de tezontle (TE), tamaño de partícula de entre 2 y 10 mm, más vermicompost de estiércol bovino y desechos vegetales (VCa), denominándose sustrato A ($SA = TE + VCa$); como sustrato B se utilizó TE más vermicompost de estiércol bovino y desechos de jardinería (VCb) por lo que $SB = TE + VCb$, ambas mezclas en la proporción 65:35. Las macetas tuvieron un acomodo en tresbolillo a una distancia de 30 cm de tallo a

tallo y 1 m entre pasillos. La composición nutrimental y propiedades químicas de las vermicompost fueron determinadas (Cuadros 19 y 20).

Después del trasplante se mantuvo el riego con sólo agua durante tres días, al cuarto día se inició el riego con la correspondiente solución de Steiner (0, 50, 75 y 100%, S0, S50, S75 y S100), que fue preparada a partir de nitrato de calcio, nitrato de potasio, sulfato de magnesio, sulfato de potasio más micronutrientes. El pH de la solución fue de 6. El riego fue por goteo y el requerimiento varió de 3 a 5 por día durante 15 minutos, con un rango de 182 a 198 mL. La densidad de plantación fue de 3.47 plantas m⁻² con una planta de un solo tallo por maceta.

Cuadro 19. Principales propiedades físicas y químicas de los materiales utilizados para la elaboración del sustrato. Montecillo, Texcoco. 2008.

Material	EPT	CA	MO	pH	CE	CIC	C/N
	----% volumen	----	% peso		dS m ⁻¹	meq 100 g ⁻¹	
TE	58.6	31.7	0.0	7.1*	0.08	2.7	-
VCa	63.0	18.8	36.5	8.8	3.35	57.3	16
VCb	59.4	11.5	32.2	8.3	2.6	51.1	13

TE = tezontle VCa = vermicompost de estiércol bovino y desechos vegetales 1; VCb = vermicompost de estiércol bovino y desechos de jardinería; EPT = espacio poroso total; CA = capacidad de aireación; MO = materia orgánica. *Este valor fue determinado utilizando agua destilada, cuyo pH fue de 6.5.

Cuadro 20. Composición nutrimental de las vermicompost evaluadas. Montecillo, Texcoco. 2008.

Vermicompost	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Cu	Zn	Mn
	-----g kg ⁻¹ -----						-----mg kg ⁻¹ -----			
VCa	11.0	5.2	10.6	20.2	6.5	1.9	26.3	1.02	15.0	18.04
VCb	9.7	19.7	4.3	18.6	3.3	1.4	69.0	0.82	17.43	23.3

VCa = vermicompost de estiércol bovino y desechos vegetales; VCb = vermicompost de estiércol bovino y desechos de jardinería.

El control fitosanitario fue preventivo realizando una aplicación de Previcur® al tallo y quincenalmente aplicación de Manzate® al follaje.

3.2.2 Diseño experimental

Los factores de estudio y sus niveles fueron dos vermicompost y cuatro concentraciones de la solución de Steiner : 0, 50, 75 y 100%, los que se combinaron en un arreglo factorial 2 x 4, en un diseño completamente al azar con ocho repeticiones. La unidad experimental fue un fruto.

También se incluyó un tratamiento con sólo tezontle regado con solución de Steiner al 100% (S100TE) con la finalidad de tener referencia del comportamiento del cultivo de tomate sin utilizar la vermicompost. El análisis estadístico se realizó mediante un análisis de varianza con el programa SAS (SAS Institute, 1982) y prueba de comparación de medias por Tukey.

3.2.3 Variables evaluadas

Las variables evaluadas fueron pH de la pulpa, sólidos solubles totales (SST), acidez titulable, firmeza, pérdidas de peso, vida de anaquel y color.

El pH de la pulpa, SST, acidez titulable y firmeza se determinaron en frutos del primer y cuarto racimo cuando estos presentaron 100% coloración roja, pero cosechados cuando mostraron superficie con coloración rosada en más del 10 y menos del 30%.

Para el pH de la pulpa, se empleó el potenciómetro Corning 12, donde 10 g de pulpa se licuaron en 50 mL de agua destilada; sólidos solubles totales (°Brix), se utilizó el refractómetro digital ATAGO (palette) mod PR-100 (0-32%); acidez titulable, se llevó a cabo por el método de la AOAC (1990) utilizando 10 g de fruto. Para la firmeza se usó el texturómetro Chantillon, mod. FDV-30 con puntal cóncavo de 0.5 cm de diámetro para lo cual se tomaron lecturas en los lados opuestos del fruto que se expresaron en kg cm^{-2} . Las pérdidas de peso y vida de anaquel se evaluaron en frutos del segundo racimo, cosechados en coloración rosa en más del 10% pero menos del 30% de la superficie. Los frutos fueron expuestos a condiciones ambientales en laboratorio. La pérdida de peso se determinó en una

balanza electrónica y se expresó en porcentaje acumulado, con respecto al peso inicial. Las evaluaciones empezaron desde el momento de la cosecha llevando un registro diario del peso. La vida de anaquel fue evaluada en los mismos frutos para pérdida de peso, se consideró término de vida de anaquel cuando el fruto presentó 7% de pérdida de peso, esto de acuerdo a Ballesteros (2001).

El color de fruto se midió a partir del momento de la cosecha cada tercer día en frutos del primer racimo, cosechados cuando estos presentaron color rosa en más del 10%, pero no más del 30% de la superficie. Se registraron de los lados opuestos del fruto lecturas de los parámetros L (luminosidad), a (registra tonalidades correspondientes de color verde al rojo) y b (registra tonalidades del amarillo al azul) por medio del colorímetro HunterLab D25-PC2. Con estos parámetros se calculó el ángulo hue = $\tan^{-1} b/a$ (que mide los cambios de color) y el croma o índice de saturación $(a^2+b^2)^{1/2}$ (mide la intensidad del color).

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo al análisis de varianza se encontró para la solución nutritiva diferencias significativas para sólidos solubles totales, acidez, firmeza y vida de anaquel; para el caso de efecto por sustrato solo se encontró diferencias significativas para acidez (Anexo A-4). Por otra parte, no se encontró efecto de la interacción solución por sustrato para ninguna de las variables de calidad.

3.3.1 pH de la pulpa

De acuerdo a la comparación de medias los tratamientos fueron iguales por efecto de solución de Steiner y por sustrato. Los valores de pH variaron entre 4.15 a 4.20 (Cuadro 21).

Cuadro 21. Comparación de medias de pH, sólidos solubles totales (SST) y acidez titulable de frutos de tomate Charleston cultivado bajo invernadero, en función de los sustratos y la concentración de la solución de Steiner. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.

Fuente de variación	pH		SST		Acidez titulable	
	1er. racimo	4to. racimo	1er. racimo	4to. racimo	1er. racimo	4to. racimo
			-----°Brix-----		% ácido cítrico	
Solución						
S0	4.15 a [†]	4.16 a	4.86 b	4.70 b	0.345 a	0.347 b
S50	4.12 a	4.13 a	5.74 a	5.79 a	0.357 a	0.348 b
S75	4.20 a	4.16 a	5.68 a	5.73 a	0.364 a	0.355 ab
S100	4.13 a	4.12 a	5.62 a	5.60 a	0.372 a	0.383 a
Sustrato						
SA	4.09 a	4.09 a	5.49 a	5.45 a	0.375 a	0.368 a
SB	4.15 a	4.20 a	5.46a	5.46 a	0.344 b	0.349 b

[†]Medias con misma letra dentro de columnas son significativamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). S100 = solución de Steiner 100%; S75 = solución de Steiner 75%; S50 = solución de Steiner 50%; S0 = solución de Steiner al 0% (riego con agua); SA = mezcla de tezontle y vermicompost de estiércol bovino más desechos vegetales; SB = tezontle y vermicompost de estiércol bovino más desechos de jardinería.

Por otra parte, el tratamiento S100TE con pH de 4.11 y de 4.16 en el primer y segundo racimo, respectivamente, no fue diferente del resto de los tratamientos (Cuadro 22). Estos valores resultaron ser mayores a los reportados por Toor *et al.* (2006), quienes obtuvieron en frutos de tomate un pH de 3.77 en tratamientos con fuente orgánica (gallinaza) y con tratamientos con fuente donde predominó el NH_4^+ ; sin embargo cuando predominó el NO_3^- el pH fue significativamente mayor. Esta situación sugiere que tal vez en el sustrato la proporción de nitratos fue mayor respecto a amonio, ya que la fuente de N utilizada para la solución de Steiner fue nitrato de calcio; no obstante, hubiera sido conveniente la determinación de las formas de nitrógeno en el medio de crecimiento.

Al respecto, Azarmi *et al.* (2009) comentan que al adicionar vermicompost en combinación con fertilización inorgánica el pH del fruto de pepino incrementa, situación que no sucedió en esta investigación. Esto pudo tener relación con la composición nutrimental de la vermicompost (tal vez nitratos) con el manejo de la misma, así como con la especie.

Cuadro 22. Comparación de medias, entre tratamientos, de pH, sólidos solubles totales (SST) y acidez titulable de tomate Charleston, cultivado bajo invernadero. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.

Tratamiento	pH		SST		Acidez titulable	
	1er. racimo	4to. racimo	1er. racimo	4to. racimo	1er. racimo	4to. racimo
			(°Brix)		(% ácido cítrico)	
S100SA	4.04 a	4.02 a	5.56 a	5.56 a	0.341 a	0.341 a
S100SB	4.23 a	4.23 a	5.65 a	5.65 a	0.374 a	0.373 a
S75SA	4.01 a	4.11 a	5.67 a	5.70 a	0.354 a	0.354 a
S75SB	4.14 a	4.22 a	5.70 a	5.70 a	0.389 a	0.389 a
S50SA	4.07 a	4.10 a	5.75 a	5.80 a	0.345 a	0.345 a
S50SB	4.18 a	4.18 a	5.73 a	5.77 a	0.383 a	0.383 a
S0SA	4.07 a	4.13 a	4.93 bc	4.76 c	0.333 a	0.333 a
S0SB	4.24 a	4.19 a	4.78 c	4.64 c	0.356 a	0.355 a
S100TE	4.11 a	4.16 a	5.11 b	5.15 b	0.336 a	0.336 a

†Medias con misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$); S100 = solución de Steiner 100%; S75 = solución de Steiner 75%; S50 = solución de Steiner 50%; S0 = solución de Steiner al 0% (riego con agua); SA = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos vegetales; SB = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos de jardinería; TE = tezontle.

De acuerdo con Jones (1999) el rango de pH para el jugo del fruto de tomate se ubica entre 4.0 y 4.5, por lo que el pH del tomate en el presente trabajo se consideró normal. Esto indica que los tratamientos no influyeron sobre el pH de la pulpa del fruto.

3.3.2 Sólidos solubles totales (SST)

Para SST (°Brix) se observó que fueron afectados por la concentración de la solución nutritiva, los cuales variaron desde 4.86 a 5.74 y de 4.70 a 5.79 °Brix en el primer y cuarto racimo, respectivamente (Cuadro 21). Los tratamientos con S50 presentaron 5.74 y 5.79 °Brix, lo que significó un incremento de 15.33 y 18.83% en el primer y cuarto racimo, con respecto a los tratamientos con agua. En los tratamientos con solución al 75 y 100% no se detectó diferencia respecto de S50. En relación a esto se han encontrado resultados contradictorios: González-Raya *et al.* (2005) mencionan que la concentración de N en la solución nutritiva, no afectó la concentración de sólidos en tomate, aunque

no reportó el efecto de cero a mayor concentración de N. En cambio, Claussen *et al.* (2006) señalan efecto de la concentración de N en solución sobre la concentración de SST.

Para el tratamiento S100TE se logró un contenido de 5.11 y 5.15 de °Brix, en primer y cuarto racimo respectivamente, valores que fueron iguales a los obtenidos a los tratamientos con S0 en ambos racimos y diferentes del resto de los tratamientos (Cuadro 22). El menor contenido de °Brix en S100TE pudo deberse a la baja retención de humedad en el tezontle por su porosidad, aunado a una baja CIC y en el caso de los tratamientos con S0 por el bajo contenido nutrimental, ya que solo fueron regada con agua. Son diversos los factores que influyen en la composición química de las hortalizas tal como la fertilización y sistema de producción. En este sentido, Heeb *et al.* (2005) comentan que el suministro de N en tomate en forma reducida (NH_4^+ o N orgánico) mejora el sabor, dado que estos incrementan el dulzor en el fruto y acidez en comparación cuando sólo se suministra NO_3^- . Gutiérrez-Miceli *et al.* (2007) y Rodríguez-Dimas *et al.* (2008) indican que frutos de plantas de tomate obtuvieron valores más altos de SST cuando fueron cultivados con enmienda de vermicompost, en comparación cuando no se utilizó. Por otro lado, Márquez-Hernández *et al.* (2008) encontraron que el contenido de SST en tomate fue igual cuando se usó materiales compostados regados sólo con agua que cuando fueron fertirrigados utilizando un sustrato inerte. Estos resultados fueron semejantes a lo encontrado en la presente investigación, reforzando que la mezcla de vermicompost en combinación con fertilización inorgánica elevó los SST, posiblemente por la combinación de las formas del N.

De acuerdo a Wu *et al.* (2004), Claussen *et al.* (2006) y Krauss *et al.* (2006) el incremento de la concentración de nutrientes en solución trae consigo un incremento en la CE, la cual en distintos cultivos incrementó los SST al igual que el suministro de vermicompost en el medio de crecimiento, dado el alto contenido de sales en éstas (Gutiérrez-Miceli *et al.*, 2007). Esta situación también pudo haber ocurrido en el presente trabajo por la utilización de solución de Steiner a 50, 75 y 100% en combinación con la vermicompost, ya que los SST aumentaron de tal forma que rebasaron el valor

superior de SST que se señala como adecuado para procesado y consumo en fresco, cuyo rango se ubica entre 4.5 a 5.5 (Diez, 2001). Wu y Kubota (2008) aclaran que el aumento de los SST es el resultado de flujo limitado de agua a los frutos, debido al efecto osmótico de la alta CE.

3.3.3 Acidez titulable

Para esta variable se encontró efecto de la solución nutritiva en el cuarto racimo, donde los tratamientos S0 y S50 presentaron la menor acidez en 11.22% en comparación con el tratamiento S100 (Cuadro 21). Por otra parte, los valores de esta variable oscilaron entre 0.34 y 0.38%, los cuales son similares a los obtenidos en otros trabajos con tomate (Dobričević *et al.*, 2008). Entre sustratos también se observaron diferencias donde el SB presentó la menor acidez; no obstante, no se encontró interacción entre el sustrato y la solución nutritiva. Se puede observar que la aplicación de fertilizante inorgánico en concentración a 75 y 100% en solución incrementó la acidez titulable en los frutos. Esto resulta congruente con Claussen *et al.* (2006) quienes refieren que el incremento de N incrementa la acidez titulable, lo cual pudo haber sucedido en el presente trabajo.

Por otra parte, en el tratamiento S100TE se determinó 0.33% de acidez, la cual fue igual a la obtenida en los demás tratamientos (Cuadro 22). En los diferentes reportes científicos se han encontrado resultados contrastantes en torno a la acidez titulable de frutos por el uso de materiales compostados. Al respecto, Azarmi *et al.* (2009) y Gutiérrez-Miceli *et al.* (2007) señalan que la aplicación de vermicompost, disminuyó la acidez de los frutos de tomate. Por otra parte, Heeb *et al.* (2005) mencionan que el uso de materiales orgánicos aumenta la acidez del fruto. Magán *et al.* (2008) refieren que una mayor CE o concentración de sales, trae consigo mayor acidez titulable.

No obstante, los valores de acidez encontrados en todos tratamientos se consideran adecuados pues son menores al 2%, ya que un bajo nivel de acidez titulable y un alto contenido de sólidos solubles

determinan un buen sabor en tomate (Tando *et al.*, 2003). En el presente trabajo los tratamientos con la más baja acidez obtuvieron mayor contenido de SST, por lo que hay posibilidad de que los tratamientos con S0 y S50 obtuvieron un mejor sabor.

3.3.4 Firmeza

Se observó que la aplicación de la solución nutritiva al 50% tuvo efecto en la firmeza, la cual resultó ser mayor en relación a S0. Entre S75 y S100 no se encontró diferencia, pero la firmeza tendió a ser menor respecto de S50 (Cuadro 23). No se observó efecto por sustrato, por lo que no se encontró interacción sustrato por solución.

Por su parte, el tratamiento S100TE mostró valores similares a los obtenidos en los tratamientos con S0 y menores de los tratamientos que implicaron S50, S75 y S100 (Cuadro 24).

Cuadro 23. Comparación de medias de firmeza y vida de anaquel de frutos de tomate Charleston cultivado bajo invernadero, en función de los sustratos y la concentración de la solución de Steiner. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.

Fuente de variación	Firmeza		Vida de anaquel Días
	1er. racimo ----- kg cm ⁻²	4to. racimo -----	
Solución			
S0	0.447 b [†]	0.423 b	8.12 c
S50	0.635 a	0.637 a	15.62 a
S75	0.612 a	0.609 a	14.62 ab
S100	0.581 a	0.590 a	12.31 b
Sustrato			Ns
SA	0.575 a	0.577 a	13.34 a
SB	0.561 a	0.556 a	12.00 a

[†]Medias con misma letra dentro de columnas son significativamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$). S100 = solución de Steiner 100%; S75 = solución de Steiner 75%; S50 = solución de Steiner 50%; S0 = solución de Steiner al 0% (riego con agua); SA = mezcla de tezontle y vermicompost de estiércol bovino más desechos vegetales; SB = tezontle y vermicompost de estiércol bovino más desechos de jardinería.

Cuadro 24. Comparación de medias, entre tratamientos, de firmeza y vida de anaquel de tomate Charleston cultivado bajo invernadero. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.

Tratamiento	Firmeza		Vida de anaquel
	1er. racimo	4to. racimo	
	----- kg cm ⁻² -----		----- Días -----
S100SA	0.58 ab	0.59 a	13.00 abcd
S100SB	0.57 ab	0.59 a	11.62 bcd
S75SA	0.63 a	0.62 a	14.87 ab
S75SB	0.59 ab	0.60 a	14.37 ab
S50SA	0.65 a	0.66 a	17.25 a
S50SB	0.62 ab	0.61 a	14.00 abc
S0SA	0.45 c	0.43 b	8.25 d
S0SB	0.44 c	0.42 b	8.00 d
S100TE	0.50 bc	0.48 b	9.12 cd

Medias con misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$); S100 = solución de Steiner 100%; S75 = solución de Steiner 75%; S50 = solución de Steiner 50%; S0 = solución de Steiner al 0% (riego con agua); SA = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos vegetales; SB = tezontle más vermicompost de estiércol bovino y desechos de jardinería; TE = tezontle.

La mayor firmeza en los tratamientos con S50 se atribuyó a la vermicompost, la cual con aplicación de solución nutritiva al 50% contribuyó a una mayor disponibilidad de nutrimentos, dada la capacidad de retención de humedad y capacidad de intercambio catiónico. Zaller (2007a) y Zaller (2007b) mencionan que la aplicación de vermicompost incrementó firmeza, aunque depende de la variedad, así como de la cantidad aplicada de esta en el medio de crecimiento, ya que a determinada proporción la firmeza disminuye lo que puede estar relacionado con la disponibilidad de nutrimentos. Varios autores describen el efecto de los nutrimentos en la firmeza tal como Sams (1999) y Chapagain y Wiesman (2004) quienes comentan que altos niveles de N en tomate resultaron en mayor firmeza, aunque en exceso el N la disminuye al igual que un bajo nivel de Ca, K y P (Villareal-Romero *et al.*, 2002; Neilsen *et al.*, 2009; Rico *et al.*, 2007; Chapagain y Wiesman, 2004).

Singh *et al.* (2008), en trabajo con fresa, obtuvieron un incremento de la firmeza cuando la aplicación de fertilizante inorgánico se acompañó de la aplicación de vermicompost, aunque a dosis mayores a 7.5

Mg ha⁻¹ la firmeza disminuyó. Situación similar se manifestó en el presente trabajo con aplicación de solución nutritiva mayor al 50%, lo cual pudo deberse a la mayor concentración nutrimental.

3.3.5 Pérdidas de peso y Vida de anaquel

Se encontró que los tratamientos que implicaron S50 y S75 presentaron menores pérdidas de peso, en referencia a S0 y S100, lo cual fue consistente desde el inicio de la evaluación hasta el término de ésta (Figura 4). Las pérdidas de peso en el fruto incrementaron conforme transcurrió el tiempo y son aproximadas a las que se reportan en tomate por Javanmardi y Kubota (2006) excepto para el tratamiento S0 (riego con agua) donde las pérdidas de peso fueron mayores.

Para el caso S100TE se observó pérdidas de peso similares a los tratamientos S0 y S100 (datos no presentados), lo cual pudo deberse a la relación área superficial/volumen, dado que los frutos de los tratamientos en mención fueron más pequeños (5.62 cm de diámetro ecuatorial) respecto de los frutos con S50 y S75 (7.46 cm de diámetro ecuatorial).

Las pérdidas de agua y peso reducen la turgencia de los tejidos y es un factor en el ablandamiento de los frutos, afectando la calidad de frutas y hortalizas (Pérez *et al.*, 2003; Saladié *et al.*, 2007).

En el presente ensayo se encontró relación entre pérdidas de peso del fruto con la firmeza de éstos, ya que los tratamientos con las menores pérdidas de peso tendieron a mayor firmeza del fruto.

En cuanto a la vida de anaquel se obtuvo un mayor tiempo (15.62 días) con S50 en relación a S0 y S100 (Cuadro 23), no encontrando diferencias entre sustratos, ni interacción sustrato por solución. El tratamiento S100TE logró 9.12 días, el cual fue igual a los tratamientos que implicaron S0 y S100 (Cuadro 24).

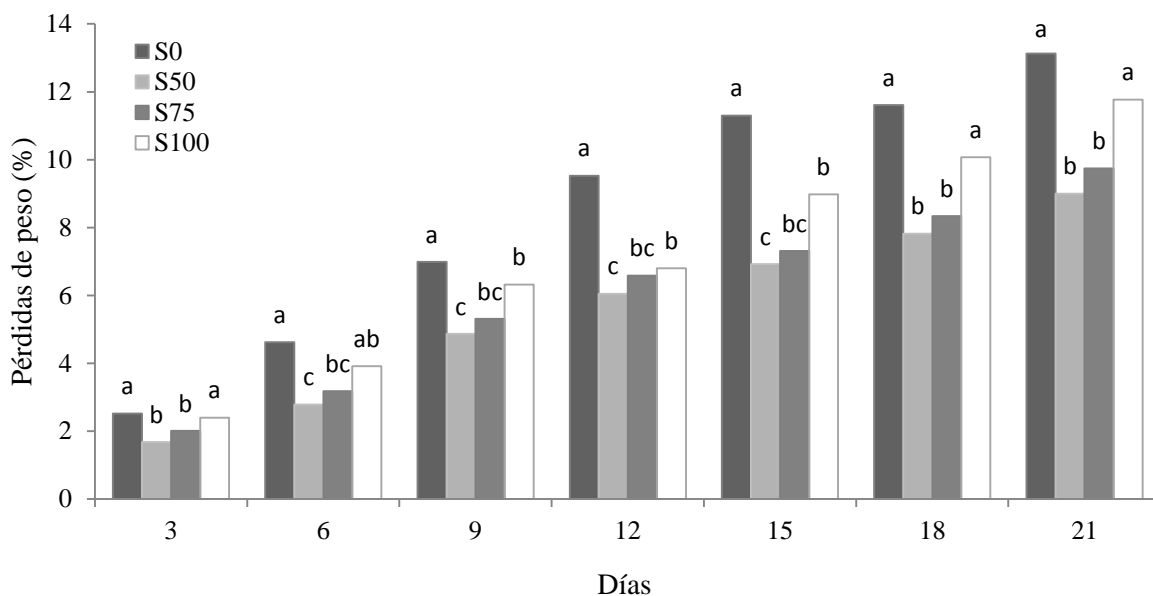


Figura 4. Pérdidas de peso de frutos de tomate Charleston cultivados en mezcla de tezontle:vermicompost 65:35 y regados con diferentes soluciones nutritivas bajo invernadero, en el ciclo otoño-invierno 2008. S100 = solución de Steiner 100%; S75 = solución de Steiner 75%; S50 = solución de Steiner 50%; S0 = solución de Steiner al 0% (riego con agua).

La apariencia del fruto fue congruente con el término de vida de anaquel y ablandamiento notorio, característica fundamental que determina la aceptabilidad y la decisión de compra de frutas y hortalizas (Toivonen y Brummell, 2008; Saladi'e *et al.*, 2007). Los resultados del presente trabajo resultaron lógicos de acuerdo a Bett-Garber *et al.* (2005), quienes indican que las condiciones de crecimiento, en este caso el uso exclusivo de tezontle como sustrato o en mezcla con vermicompost y uso de la fertilización inorgánica, afectan la vida de anaquel.

3.3.6 Color

Se observó que la luminosidad del fruto disminuyó con el tiempo sin diferencias entre los tratamientos con las diferentes concentraciones de la solución nutritiva; el ángulo hue también disminuyó en el tiempo, con diferencias a los 9 días después de iniciar la evaluación de color. Esto indicó que los

frutos con los tratamientos que incluyeron sólo agua fueron más verdes en comparación con lo demás (Cuadro 25).

Cuadro 25. Comparación de medias de luminosidad, hue y croma de frutos de tomate Charleston cultivados bajo invernadero, en función de los sustratos y la concentración de la solución de Steiner. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.

Fuente de variación	días	Luminosidad	Hue	Croma
Solución	0 días			
S0		46.62 a [†]	116.63 a	19.33 a
S50		46.90 a	116.45 a	20.32 a
S75		47.17 a	116.92 a	19.33 a
S100		47.00 a	116.67 a	19.77 a
Sustrato				
SA		46.70 a	116.75 a	19.57 a
SB		47.14 a	116.54 a	20.06 a
Solución	9 días			
S0		42.75 a	85.08 a	22.43 a
S50		42.28 a	61.80 b	22.11 a
S75		39.57 a	58.00 b	21.86 a
S100		40.94 a	62.95 b	21.94 a
Sustrato				
SA		41.01 a	66.37 a	22.35 a
SB		41.76 a	67.54 a	21.82 a
Solución	15 días			
S0		42.11 a	75.42 a	22.68 a
S50		38.82 a	57.17 b	22.50 a
S75		37.72 a	56.83 b	22.58 a
S100		40.11 a	55.04 b	22.78 a
Sustrato				
SA		38.32 a	61.78 a	22.90 a
SB		39.51 a	60.78 a	22.76 a

[†]Medias con misma letra dentro de columnas son significativamente iguales (Tukey, $P \leq 0.05$) S100 = solución de Steiner 100%; S75 = solución de Steiner 75%; S50 = solución de Steiner 50%; S0 = solución de Steiner al 0% (riego con agua); SA = mezcla de tezontle y vermicompost de estiércol bovino más desechos vegetales; SB = tezontle y vermicompost de estiércol bovino más desechos de jardinería.

Se encontró que los frutos tratados con S0 presentaron el mayor ángulo hue con diferencias respecto de los demás tratamientos.

Los valores de croma fueron iguales entre tratamientos, por lo que podemos decir que la intensidad del color rojo (pureza del color) fue similar (Cuadro 25).

Por otra parte, los valores de luminosidad y croma de frutos del tratamiento S100TE no presentaron diferencias respecto de los demás; el hue de los frutos de S100TE fue igual a los de S0 (datos no presentados). De acuerdo a esto podemos señalar a los tratamientos que implicaron solución nutritiva al 50, 75 y 100% más vermicompost como aquellos cuyo fruto presentó el mejor color. En trabajo realizado por Angelis *et al.* (2001) en cultivo de tomate no se encontraron diferencias en las características del color, al utilizar como medio de crecimiento diferentes sustratos tal como perlita, lana de roca y tierra. Sin embargo, Singh *et al.* (2008) reportaron que la vermicompost incorporada al suelo, más fertilizante inorgánico, resultó en frutos de mejor color en comparación con los fertilizados químicamente. Esto concuerda con el presente trabajo donde utilizamos mezclas de vermicompost con tezontle y aplicación de fertilizante inorgánico, situación que lo llevó a una mejor nutrición del cultivo y por lo tanto a un mejor desarrollo de color. Simonne *et al.* (2007) en frutos de tomate encontró mejor color debido a la mayor concentración de carotenoides cuando concentración moderada de N fue utilizada. Así también, la mayor CE y la forma de N influyeron en la concentración de carotenoides (licopeno), donde el N orgánico incrementó éstos, al igual que la mayor concentración de P, K y Ca (Dorais *et al.*, 2007).

3.4 CONCLUSIONES

- La calidad de frutos de tomate Charleston fue mayor con la utilización de la mezcla tezontle:vermicompost en la proporción 65:35, obtenida por programación en SAS y en combinación con solución Steiner al 50, 75 y 100%, ya que ésta incrementó la concentración de sólidos solubles totales (SST), no afectó la acidez titulable y pH de la pulpa, incrementó firmeza de frutos, obtuvo mejor color y menores pérdidas de peso, así como la mayor vida de anaquel en comparación al testigo.
- La utilización de solución Steiner al 50%, en combinación con la mezcla tezontle:vermicompost 65:35, fue la más viable para la calidad de fruto, dado que con esta concentración se obtuvo calidad de fruto aceptable al igual que con concentración de la solución nutritiva al 75 y 100%.
- La ausencia de solución Steiner en el cultivo de tomate Charleston, en presencia de vermicompost, disminuyó calidad de frutos en términos de sólidos solubles totales, firmeza, vida de anaquel y pérdidas de peso.
- La utilización de vermicompost en el medio de crecimiento permitió la reducción de la fertilización química hasta en un 50% sin afectar calidad de frutos, lo cual se considera una mejora en lo que se refiere a fertilización y sustratos en los sistemas de producción convencional bajo invernadero.
- En términos generales, las vermicompost utilizadas ejercieron el mismo efecto sobre las diferentes variables de calidad, a excepción de acidez, donde la vermicompost a base de estiércol y desechos vegetales obtuvo la mayor acidez titulable.

3.5 LITERATURA CITADA

- A.R. Fernie, A. Lytovchenko, M.A. O'Neill, C.B. Watkins, and J.K.C. Rose. 2007. A re-evaluation of the key factors that influence tomato fruit softening and integrity. *Plant Physiol.* 144: 1012–1028.
- Angelis, G., N. Papadantonakis, T. Spano, and C. Petrakis. 2001. Effect of substrate and genetic variation on fruit quality in greenhouse tomatoes: Preliminary results. *Acta Hort.* 548: 497-502.
- AOAC, 1995. Official methods of analysis. Association of Oficial Analytical Chemists. Washington, DC, USA.
- Azarmi, R., M.T. Giglou, and B. Hajieghrari. 2009. The effect of sheep-manure vermicompost on quantitative and qualitative properties of cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in the greenhouse. *Afr. J. Biotechnol.* 8: 4953-4957.
- Ballesteros, F.R. 2001. Postcosecha del tomate para consumo en fresco. *In:* 589-623. El cultivo de tomate. Nuez, F. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Batu, A. 2004. Determination of acceptable firmness and colour values of tomatoes. *J. Food Eng.* 61:471-475.
- Bett-Garber, K.L., O. Lamikanra, G.E. Lester, D.A. Ingram, and M.A. Watson. 2005. Influence of soil type and storage conditions on sensory qualities of fresh-cut cantaloupe (*Cucumis melo*). *J. Sci. Food Agric.* 85: 825–830.
- Brummell, D.A., W.J. Howie, and C.M.P. Dunsmuir. 2002. Postharvest fruit quality of transgenic tomatoes suppressed in expression of a ripening-related expansion. *Postharvest Biol. Technol.* 25: 209–220.
- Chapagain, B.P. and Z. Wiesman. 2004. Effect of Nutri-Vant-PeaK foliar spray on plant development, yield, and fruit quality in greenhouse tomatoes. *Sci. Hort.* 102: 177–188.
- Claussen, W., B. Brückner, A. Krumbein, and F. Lenz. 2006. Long-term response of tomato plants to changing nutrient concentration in the root environment—the role of proline as an indicator of sensory fruit quality. *Plant Sci.* 171: 323–331.
- Diez, J.M. 2001. Tipos varietales. *In:* El cultivo del tomate. Nuez, F. (ed). Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. Pp: 95-129.
- Dobričević, N., S. Voća, J. Borošić, and B. Novak. 2008. Effects of substrate on tomato quality. *Acta Hort.* 779: 485-498.
- Dorais, M. 2007. Effect of cultural management on tomato fruit health qualities. *Acta Hort.* 744: 279-294.
- Flores, J., W. Ojeda-Bustamante, I. López, A. Rojano y I. Salazar. 2007. Requerimientos de riego para tomate de invernadero. *Terra* 25: 127-134.
- Fortis-Hernández, M, J.A. Leos-Rodríguez, P. Preciado-Rangel, I. Orona-Castillo, J.A. García-Salazar, J.L. García-Hernández y J.A. Orozco-Vidal. Aplicación de abonos orgánicos en la producción de maíz forrajero con riego por goteo. *Terra* 27: 324-336.
- González-Raya, E., A. Benavides-Mendoza, H. Ramírez, V. Robledo-Torres, R. Maiti, A. Reyes-López, A.F. Aguilera-Carbo, L.O. Fuentes-Lara y R.E.M. Hernández-Valencia. 2005. Crecimiento de jitomate y calidad de frutos con diferentes concentraciones de nitrato. *Terra* 23: 105-111.
- Gutiérrez-Miceli, F., J. Santiago-Borraz, J.A. Montes-Molina, C. Carlos-Nafate, M. Abud-Archila, M.A. Oliva-Llaven, R. Rincón-Rosales, and L. Dendooven. 2007. Vermicompost as a soil supplement to improve growth, yield and fruit quality of tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Bioresour. Technol.* 98: 2781-2786.

- Heeb, A., B. Lundegardh, T. Ericsson and G.P. Savage. 2005. Effects of nitrate-, ammonium, and organic-nitrogen-based fertilizers on growth and yield of tomatoes. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168: 123-129.
- Inden, H. and A. Torres. 2004. Comparison of four substrates on the growth and quality of tomatoes. *Acta Hort.* 644: 205-210.
- Javanmardi, J. and C. Kubota. 2006. Variation of lycopene, antioxidant activity, total soluble solids and weight loss of tomato during postharvest store. *Postharvest Biol. Technol.* 41: 151-155.
- Jones, J.B. 1999. *Tomato plant culture*. Ed. CRC Press. Boca Raton, FL, USA. 199 p.
- Krauss, S., W.H. Schnitzler, J. Grassmann, and M. Woitke. 2006. The influence of different electrical conductivity values in a simplified recirculating soilless system on inner and outer fruit quality characteristics of tomato. *J. Agric. Food Chem.* 54: 441-448.
- Magán, J.J., M. Gallardo, R.B. Thompson, and P. Lorenzo. 2008. Effects of salinity on fruit yield and quality of tomato grown in soil-less culture in greenhouses in Mediterranean climatic conditions. *Agric. Water Manag.* 95: 1041 – 1055.
- Márquez-Hernández, C., P. Cano-Ríos y N. Rodríguez-Dimas. 2008. Uso de sustratos orgánicos para la producción de tomate en invernadero. *Agric. Téc. Méx.* 34:69-74.
- Moreno-Reséndez, A, L. Gómez-Fuentes, P. Cano-Ríos, V. Martínez-Cueto, J.L. Reyes-Carrillo, J.L. Puente-Manríquez y N. Rodríguez-Dimas. Genotipos de tomate en mezclas de vermicompost:arena en invernadero. *Terra* 26: 103-109.
- Neilsen, G. H., D. Neilsen, and L. Herbert. 2009. Nitrogen fertigation concentration and timing of application affect nitrogen nutrition, yield, firmness, and color of apples grown at high density. *HortScience* 44: 1425-1431.
- Pérez, K., J. Mercado, and H. Soto-Valdez. 2003. Effect of storage temperature on the shelf life of Hass avocado. *Food Sci. Tech. Int.* 10: 73-77.
- Rico, D., A.B. Martín-Diana, J.M. Frias, J.M. Barat, G.T.M. Henehan, and C. Barry-Ryan. 2007. Improvement in texture using calcium lactate and heat-shock treatments for stored ready-to-eat carrots. *J. Food Eng.* 79: 1196-1206.
- Rodríguez-Dimas, N., P. Cano-Ríos, U. Figueroa-Viramontes, E. Favela-Chávez, A. Moreno-Reséndez, C. Márquez-Hernández, E. Ochoa-Martínez y P. Preciado-Rangel. 2009. Uso de abonos orgánicos en la producción de tomate en invernadero. *Terra* 27: 319-327.
- Rodríguez-Dimas, N., P. Cano-Ríos, U. Figueroa-Viramonte, A. Palomo-gil, E. Favela-Chávez, V. Álvarez-Reyna, C. Márquez-Hernández y A. Moreno-Reséndez. 2008. Producción de tomate en invernadero con humus de lombriz como sustrato. *Rev. Fitotec. Mex.* 31: 265-272.
- Saladié, M., A.J. Matas, T. Isaacson, M.A. Jenks, S.M. Goodwin, K.J. Niklas, R. Xiaolin, J.M. Labavitch, K.A. Shackle, Sams, C.E. 1999. Preharvest factors affecting postharvest texture. *Postharvest Biol. Technol.* 15: 49-254.
- SAS Institute Inc. 1982. *SAS User's guide: Statistics*. Cary, NC, USA. 584 p.
- Simonne, A. H., J.M. Fuzere, E. Simonne, R.C. Hochmuth, and M.R. Marshall. 2007. Effects of nitrogen rates on chemical composition of yellow grape tomato grown in a subtropical climate. *J. Plant Nutr.* 30: 927-935.
- Singh, R., R.R. Sharma, S. Kumar, R.K. Gupta, and R.T. Patil. 2008. Vermicompost substitution influences growth, physiological disorders, fruit yield and quality of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Bioresour. Technol.* 99: 8507-8511.

- Tando, K.S., E.A. Baldwin, J.W. Scott, and R.L. Schewfelt. 2003. Linking sensory descriptors to volatile and non-volatile components of fresh tomato flavor. *J. Food Sci.* 68: 2366-2371.
- Toivonen, P.M.A. and D. A. Brummell. 2008. Biochemical bases of appearance and texture changes in fresh-cut fruit and vegetables. *Postharvest Biol. Technol.* 48: 1-14.
- Toor, R.K., G.P. Savage and A. Heeb. 2006. Influence of different types of fertilizers on the major antioxidant components of tomatoes. *J. Food Comp. Anal.* 19: 20-27.
- Tu, S.S., J. C. Young, J.M. Michael, and K. L. McCarthy. 2007. Tomato quality evaluation by peak force and NMR spin-spin relaxation time. *Postharvest Biol. Technol.* 44: 157-164.
- Villareal-Romero, M., R.S. García-Estrada, T. Osuna-Enciso y A.D. Armenta-Bojorquez. 2002. Efecto de dosis y fuente de nitrógeno en rendimiento y calidad postcosecha de tomate en fertirriego. *Terra* 20: 311-320.
- Wu, M. and C. Kubota. 2008. Effects of high electrical conductivity of nutrient solution and its application timing on lycopene, chlorophyll and sugar concentrations of hydroponic tomatoes during ripening. *Sci. Hort.* 116: 122-129.
- Wu, M., M. Johann, S. Buck, and C. Kubota. 2004. Effects of nutrient solution EC, plant microclimate and cultivars on fruit quality and yield of hydroponic tomatoes (*Lycopersicon esculentum*). *Acta Hort.* 659: 541-549.
- Zaller, J.G. 2007a. Vermicompost as a substitute for peat in potting media: Effects on germination, biomass allocation, yields and fruit quality of three tomato varieties. *Sci. Hort.* 112: 191-199.
- Zaller, J.G. 2007b. Vermicompost in seedling potting media can affect germination, biomass allocation, yield and fruit quality of three tomato varieties. *E. J. Soil Biol.* 43: 5332-5336.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

1. Discusión General

Actualmente se tiene la necesidad, en el cultivo de plantas, de buscar materiales que proporcionen la mejores condiciones de crecimiento y consideren la disminución del impacto ambiental (Riviére y Caron, 2001).

Por ésto en la primera parte de la presente tesis se realizaron los estudios para la creación del programa de optimización en SAS para la obtención de mezclas de sustratos. Para esto se realizó la caracterización en espacio poroso total (EPT), capacidad de aireación (CA) y materia orgánica (MO) de cada uno de los materiales: Tezontle (TE) y tres vermicompost (VC1, VC2 y VC3). El EPT de los materiales varió significativamente entre 58 y 63%, cuyos valores se encontraron inferiores al considerado óptimo por Ansorena (1994). En el caso de CA, el TE obtuvo el mayor valor (32%) el cual fue superior al óptimo (Ansorena, 1994), mientras que en la vermicompost los valores se ubicaron entre 10.8 y 19%. Por último, la MO varió de 34 a 56% en las tres vermicompost con el mayor valor para la VC3, valores inferiores al valor óptimo reportado por Ansorena (1994).

Por otra parte, el pH de las VC1 y VC2 presentaron pH alcalino (8.8); mientras que la mayor CE la manifestó la VC1 (3.35 mS cm^{-1}) y el mayor contenido de N fue para VC3 con el 2.1%. Por lo anterior, se consideró que la mezcla de TE con alguna de las vermicompost mejoraría: a) las propiedades físicas, las cuales se busca obtengan los valores más altos una vez colocados en el contenedor o maceta, ya que con el tiempo tienden a disminuir; y b) las propiedades químicas (MO), dado que uno de los objetivos al incorporar materiales orgánicos en el medio de crecimiento es reducir la fertilización química en el cultivo de plantas (Caron y Nkongolo, 1999).

Por lo tanto, las propiedades consideradas para el diseño de mezclas mediante el programa de optimización con SAS fueron: EPT, CA y MO. Esto considerado lo señalado por autores como: Zamora-Morales *et al.* (2005) quienes mencionan que el EPT y la CA deben ser incluidos como variables de diseño en la generación de mezclas por programación lineal. Por su parte, Bunt (1976), Bragg y Chambers (1988) y Pastor (1999) mencionan que la fase gaseosa y líquida de un medio de crecimiento la constituye el espacio ocupado por aire (CA) y agua, es decir, el EPT y éste constituye la propiedad física más importante en los sustratos. Burés (1997) y Marfa *et al.* (1999) señalan que la MO es la fracción importante de la fase sólida y que influye en las propiedades físicas y químicas del sustrato. Esto último confirmado mediante correlación significativa de MO con N, CIC, pH y CA.

El programa de optimización se aplicó para la combinación de dos materiales, las cuales fueron: tezontle-vermicompost de estiércol bovino más desechos vegetales (TE-VC1), tezontle-vermicompost de estiércol bovino (TE-VC2) y tezontle-vermicompost de estiércol bovino más pulpa de café (TE-VC3). Los resultados del programa para la combinación TE-VC1 fueron seis mezclas de proporciones diferente, para la combinación TE-VC2 al igual que para TE-VC3 fueron cinco mezclas, las cuales fueron las de menor costo.

Posteriormente, de cada combinación se seleccionaron tres mezclas, de las cuales se determinó EPT, CA y MO en laboratorio. Aquí se observó que el EPT incrementó a mayor proporción de TE para las combinaciones TE-VC2 y TE-VC3, esto contrastó con lo señalado por Owen *et al.* (2008) quienes encontraron que el EPT no varió al mezclar materiales de diferente naturaleza. En cambio, la CA aumentó al aumentar la proporción de TE, esto debido a la mayor CA del TE (Verdonck y Demeyer, 2004). En tanto que la MO disminuyó por la mayor proporción de TE.

Los valores experimentales se compararon con los obtenidos por el programa, así se observó para la combinación TE-VC1, un mayor valor del EPT en la proporción 75-25 con el programa SAS, e igual manera para la MO en las proporciones 65-35, y 75-25; para la combinación TE-VC2, se encontró mayores valores de EPT en las proporciones 65-35 y 75-25 con el programa SAS, así como también para la MO en las mezclas 65-35, 75-25 y 85-15; en la combinación TE-VC3, no se observaron diferencias en las tres proporciones para ninguna de las tres variables.

Así, en relación a la comparación de los valores de EPT, CA y MO dados por el programa de optimización SAS y obtenidos experimentalmente, se observó que las diferencias no siguieron alguna tendencia en relación con las proporciones de los materiales dentro de la misma combinación; por ejemplo, el EPT tuvo diferencia en la proporción 75-25 pero no para 65-35 y 85-15, por lo que su origen pudo ser error experimental, ya que para hacer uso del programa se requiere del uso de datos del sistema real (Baker y Curry, 1976).

Por otra parte, las curvas de humedad mostraron mayor contenido de agua, para la combinación TE-VC3, lo cual se debió a la presencia de vermicompost (Hashemimajd *et al.*, 2004). Así también, el CIC y concentración de N fue mayor en esta.

El programa de optimización con SAS calculó y desplegó una serie de mezclas de materiales en sus proporciones respectivas, las cuales se consideran adecuadas de acuerdo a las restricciones hechas. Sin embargo, para elegir entre una proporción u otra, los valores de EPT no señalan una en particular, pues los valores se mantuvieron en general sin variación; la CA mostró mayor valor en la proporción 85:15 aunque tampoco muestra una proporción en especial, pues las tres variaron poco entre sí y tuvieron valores cercanos al 30%; sin embargo, la MO indica que la proporción 65:35 es la más

adecuada, reafirmado esto por la mayor CIC y concentración de N determinadas en laboratorio en esta misma, y en la alta correlación encontrada entre estas propiedades en los materiales simples.

En lo que respecta a la selección entre una combinación de materiales u otra en la proporción 65:35 es otra situación, en la que hay que considerar aspectos como el económico. Por lo tanto, de acuerdo a lo anterior, la mezcla TE-VC3, 65:35 resultó ser la mejor opción, en función de EPT, CA, MO y costo.

La segunda fase de la presente tesis consistió en seleccionar las mejores mezclas obtenidas por medio del programa de optimización en SAS y llevarlas a experimentación con cultivo de tomate charleston bajo invernadero y aplicación de solución Steiner a diferentes concentraciones. Las mezclas fueron: TE-VC1, TE-VC2 y TE-VC3 en proporción 65:35. Sin embargo, por motivos de disponibilidad sólo se trabajó con TE-VC1 (65:35) a la que se denominó SA y la TE-VC2 se sustituyó por la mezcla de tezontle con vermicompost de estiércol y desechos de jardinería, denominado a esta mezcla SB.

Se observaron diferencias en concentración de macro y micronutrientes por efecto de la concentración de solución Steiner, donde al 50% de solución en relación a 0% se encontraron los mayores valores. No se observaron diferencias entre 50 y 75 % de solución Steiner para N, P, K Ca, Mg, Cu y Zn. Lo anterior concordó con lo mencionado por Magdaleno-Villar *et al.* (2006). Para el caso Fe y Cu Mn se notó su deficiencia en los materiales orgánicos ya que se encontraron diferencias al aumentar la concentración de la solución al 100%, lo que coincidió con Heeb *et al.* (2005).

Por otra parte, el mínimo incremento del contenido nutrimental en el tejido de tomate por la aplicación de solución a más del 50% puso en evidencia la riqueza nutrimental de las vermicompost en mezcla, principalmente macronutrientes (Ao *et al.*, 2008). También, la presencia de vermicompost en el medio de crecimiento implicó una mayor disponibilidad nutrimental por la mayor retención de agua y mayor CIC (Vendonck y Demeyer, 2004; Hashemimajd *et al.*, 2004). Entre sustratos se observaron

diferencias en el contenido nutrimental de P con mayor valor para el SB, para Mg con mayor valor el SA y para Fe con mayor valor para SB. En cuanto a interacción solución por sustrato se encontró sólo para el P.

Por otra parte, se comparó un tratamiento que sólo incluyó tezontle regado con solución Steiner al 100% (S100TE). Se encontró que el S100TE presentó en general el menor contenido de macro y micronutrientes en relación a los tratamientos con solución de Steiner al 50, 75 y 100% más vermicompost; sin embargo fue superior sólo en los tratamientos que fueron regados sólo con agua en N, P y Mg. Lo anterior se atribuyó a la poca retención de agua en el medio de crecimiento, ya que se eliminaron partículas menores de 2 mm (Vendonck y Demeyer, 2004).

Las variables de crecimiento y lecturas SPAD, en general, tuvieron un comportamiento similar al obtenido a la concentración nutrimental, dado que éstas incrementaron significativamente en los tratamientos que implicaron 50% de solución Steiner respecto de los regados sólo con agua; entre 50 y 75% de concentración de la solución no se encontró diferencia; no obstante, entre 50 y 100% hubo respuesta favorable en el crecimiento, aunque este se consideró no representativo de acuerdo al incremento en la concentración. Esto se vio reflejado en el rendimiento por planta, el cual incremento favorablemente de 0 a 50% de solución Steiner, no encontrando diferencias entre 50, 75 y 100%. Estos resultados en las variables de crecimiento y rendimiento se atribuyeron a la acumulación de sales en el sustrato (por presencia de vermicompost y aplicación de solución nutritiva), que pudo disminuir la absorción de agua y nutrientes (Siddiqui *et al.*, 2010). No se encontró diferencias entre sustratos, tampoco interacción solución por sustrato.

Por otra parte, el tratamiento S100TE presentó menores lecturas SPAD, menor altura de planta, diámetro de tallo, área foliar, peso seco de hoja y rendimiento en relación a los tratamientos con

vermicompost en el medio de crecimiento y regados con solución de Steiner al 50, 75 y 100%, lo cual se atribuyó también a la falta de retención de agua y por tanto a una menor disponibilidad de nutrimentos.

En la tercera fase de trabajo se evaluó la calidad de los frutos de tomate charleston, obtenidos de la fase dos, donde se utilizó mezcla de tezontle con dos vermicompost, denominándose sustrato A (SA) y sustrato B (SB), y en la proporción 65:35 y regados con solución de Steiner a 0, 50, 75 y 100%. Se encontró efecto de la solución nutritiva, no encontrando efecto por sustratos (excepto para acidez) ni interacción solución por sustrato. A 50% de concentración se obtuvo mayor sólidos solubles totales, firmeza, menores pérdidas de peso, mejor color y mayor vida de anaquel en relación a 0%.

Los sólidos solubles totales (SST) aumentaron de 4.86 a 5.74 y de 4.70 a 5.79 en el primer y cuarto racimo. En relación a esto se han encontrado resultados contradictorios; sin embargo, se consideró que el incremento de los SST se pudo ser por la mayor CE o las formas de nitrógeno (NO_3^- y NH_4^+) (Márquez-Hernández *et al.*, 2008; Krauss *et al.*, 2006). En cuanto a la acidez se encontró que esta fue mayor a 75 y 100% de solución de Steiner lo que resultó congruente con Claussen *et al.* (2006) quienes refieren que el incremento de N incrementa la acidez titulable. El incremento de la firmeza de los frutos se atribuyó a la presencia de vermicompost y solución al 50% de solución de Steiner por la disponibilidad de nutrimentos, ya que a altos niveles de N se han relacionado con mayor firmeza, aunque a determinados niveles la firmeza disminuye (Chapagain y Wiesman, 2004). El pH fue igual en todos los tratamientos y varió entre 4.12 a 4.20, contrastando a lo encontrado por Azarmi *et al.* (2009) lo que se atribuyó a la composición nutricional de las vermicompost utilizadas. En cuanto a pérdidas de peso se obtuvieron las menores pérdidas con la aplicación de Solución al 50 y 75% y, lo cual guardó relación con la mayor firmeza de frutos y la mayor vida de anaquel, lo cual coincidió con lo mencionado por Bett-Garber *et al.* (2005).

En cuanto al tratamiento S100TE se encontró, en general, que obtuvo menores valores para las diferentes variables de calidad en comparación a los obtenidos con los tratamientos que contuvieron a la vez vermicompost y solución de Steiner al 50, 75 y 100%; por otra parte, para algunas las variables color, pérdidas de peso, vida de anaquel y firmeza fue significativamente igual que el tratamiento donde sólo se aplicó agua.

2. CONCLUSIONES GENERALES

Con base en los experimentos realizados durante los años 2008 y 2009 utilizando el híbrido Charleston y bajo las condiciones descritas en materiales y métodos se concluye, en general, lo siguiente:

1. El programa de optimización en SAS resultó conveniente para la obtención de mezclas de sustratos para la producción de cultivo de tomate bajo invernadero con costos menores y dentro de los rangos ideales de las propiedades físicas y químicas.
2. El uso de mezclas de vermicompost de subproductos agropecuarios con tezontle, en la proporción 65-35 y la aplicación simultánea de solución de Steiner al 50%, coadyuvó en la reducción de la fertilización inorgánica para cultivo de tomate Charleston bajo invernadero, sin afectar estadísticamente el crecimiento y rendimiento.
3. La utilización de solución Steiner al 50%, en combinación con la mezcla tezontle-vermicompost 65-35, fue la más viable para la calidad de fruto, dado que con esta concentración de vermicompost se obtuvo calidad de fruto aceptable al igual que con concentración de la solución nutritiva al 75 y 100%.

ANEXOS

Cuadros de Análisis de Varianza

Cuadro A-1. Análisis de varianza de la concentración de nutrientes en hoja de tomate Charleston a los 70 días después de trasplante bajo invernadero. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.

Fuente de variación	GL	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn
Solución	4	**	*	**	**	*	*	*	*	**
Sustrato	2	ns	**	ns	ns	*	*	ns	ns	ns
Solución X sustrato	8	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns = no significativo; * = significancia estadística a 5%; ** = significancia estadística a 1%; GL = grados de libertad.

Cuadro A-2. Análisis de varianza de lecturas SPAD de tomate Charleston a los 40 y 70 días después de trasplante (ddt) bajo invernadero. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.

Fuente de variación	GL	40 ddt	70 ddt
Solución	4	**	**
Sustrato	2	ns	ns
Solución X sustrato	8	ns	ns

ns = no significativo; * = significancia estadística a 5%; ** = significancia estadística a 1%; GL = grados de libertad.

Cuadro A-3. Análisis de varianza de las variables de crecimiento y rendimiento de tomate Charleston cultivado bajo invernadero. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.

Fuente de variación	GL	NH	AP	DT	AF	PSH	Rendimiento
Solución	4	**	*	**	*	*	**
Sustrato	2	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Solución X sustrato	8	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns = no significativo; * = significancia estadística a 5%; ** = significancia estadística a 1%; GL = grados de libertad. NH = número de hojas, AP = altura de planta, DT = diámetro de tallo, AF = área foliar, PSH = peso seco de hoja.

Cuadro A-4. Análisis de varianza de las variables de calidad de tomate Charleston cultivado bajo invernadero. Montecillo, Texcoco. Ciclo invierno 2008-2009.

Fuente de variación	GL	pH	SST	Acidez		Firmeza	Vida de anaquel
				1er R	2do R		
Solución	4	ns	*	ns	*	*	*
Sustrato	2	ns	ns	*	*	ns	ns
Solución X sustrato	8	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns = no significativo; * = significancia estadística a 5%; ** = significancia estadística a 1%; GL = grados de libertad. SST = sólidos solubles totales, R = racimo.