

**Universidad Zamorano**  
**Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria**  
**Ingeniería Agronómica**



**Universidad  
Zamorano®**

Proyecto Especial de Graduación  
**Evaluación de Tres Sustratos en el Cultivo de Tomate (*Solanum  
lycopersicum L.*) Bajo Estructura Protegida en Zamorano, Honduras**

Estudiantes

Luis Fernando Baca Palma

Nahun Fernando Maldonado Hércules

Asesores

Ricardo Lardizábal, M.Sc.

Orlin Velásquez, Ing. Agrónomo

Julio López, M.Sc.

Honduras, noviembre 2025

**Autoridades**

**KEITH L. ANDREWS**

Rector i.a.

**ANA M. MAIER ACOSTA**

Vicepresidenta y Decana Académica

**CELIA O. TREJO RAMOS**

Directora Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria

**JULIO NAVARRO**

Secretario General

### **Agradecimientos**

Agradecemos primeramente a Dios por darnos la fortaleza, sabiduría y oportunidad para ser parte del programa Student Research Fellowship Program de USAID – UC Davis – Zamorano y por concedernos la beca parcial que ha sido fundamental para nuestro crecimiento académico y profesional y al Ing Julio López por hacernos parte de este programa.

## Contenido

Agradecimientos .....	3
Índice de Cuadros.....	6
Índice de Figuras .....	8
Índice de Anexos .....	9
Resumen .....	10
Abstract.....	11
Introducción.....	12
Materiales y Métodos .....	15
Localización Geográfica.....	15
Descripción del Cultivo .....	16
Selección y Caracterización del Sustrato .....	16
Propiedades Físicas del Sustrato.....	16
Porosidad Total% (PT) .....	16
Retención de Humedad% (RH).....	16
Drenaje% (D): .....	17
Aireación% (A):.....	17
Tratamiento Suelo-Compost-Raquis de maíz Molido (S 0.5:C0.5: R1.5) .....	17
Tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S 1.5:C 1: R 1) .....	17
Tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S 1: C 1: F 1) .....	17
Testigo Suelo-Compost-Raquis molido (S 1: C 1:R 1).....	18
Mezcla y Pasteurización de los Sustratos .....	18
Manejo Agronómico .....	18
Riego y Fertilización .....	19
Tutoreo y Poda.....	20

Manejo de Plagas y Enfermedades.....	21
Variables Evaluadas .....	21
Altura de la Planta.....	21
Grosor del Tallo.....	21
Porcentaje de Drenaje .....	21
pH Y Conductividad Eléctrica .....	22
Peso y Longitud Radicular .....	22
Diseño Experimental y Análisis Estadístico .....	22
Resultados y Discusión.....	25
Altura de la Planta (cm) .....	26
Grosor del Tallo de la Planta (mm) .....	29
Porcentaje de Drenaje .....	32
pH.....	36
Conductividad Eléctrica (mS/cm).....	37
Longitud Radicular .....	39
Peso Radicular.....	41
Conclusiones .....	43
Recomendaciones.....	44
Referencias.....	45
Anexos.....	50

### Índice de Cuadros

Cuadro 1 Nutrientes utilizados en el programa de fertirrigación para el cultivo de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) var. Pony Express desde 0 a 45 días después de trasplante para un tanque de 400 Litros en el invernadero de baja tecnología, Universidad Zamorano.....	20
Cuadro 2 Nutrientes utilizados en el programa de fertirrigación para el cultivo de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) var. Pony Express desde 46 a 66 días después de trasplante para un tanque de 400 Litros en el invernadero de baja tecnología, Universidad Zamorano.....	20
Cuadro 3 Prueba de Shapiro-Wilk para las variables de longitud radicular(cm), peso radicular(g), conductividad eléctrica (EC), pH, porcentaje de drenaje, altura de la planta(cm) y grosor del tallo(mm) de tomate cultivado en estructura protegida de baja tecnología. ....	26
Cuadro 4 Efecto del sustrato en el crecimiento de altura en las plantas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) var. Pony Express en un invernadero de baja tecnología, Unidad de Olericultura Intensiva, Universidad Zamorano, junio-julio.....	26
Cuadro 5 Efecto del sustrato en el grosor del tallo en las plantas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) var. Pony Express en un invernadero de baja tecnología, Unidad de Olericultura Intensiva, Universidad Zamorano, junio-julio.....	32
Cuadro 6 Efecto de los sustratos en el porcentaje de drenaje final de acuerdo al volumen de solución nutritiva ofertado en plantas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) var. Pony Express en la Unidad de Olericultura Intensiva, Universidad Zamorano.....	35
Cuadro 7 pH del drenaje aforado de cada tratamiento en plantas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) var. Pony Express en un invernadero de baja tecnología, Unidad de Olericultura Intensiva, Universidad Zamorano.....	37
Cuadro 8 Conductividad eléctrica(mS/cm) del drenaje aforado por tratamiento plantas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) var. Pony Express en un invernadero de baja tecnología, Unidad de Olericultura Intensiva, Universidad Zamorano.....	38

Cuadro 9 Efecto del sustrato en la longitud radicular(cm) de las plantas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) var. Pony Express en un invernadero de baja tecnología, Unidad de Olericultura Intensiva, Universidad Zamorano. ....	40
Cuadro 10 Efecto del sustrato en el peso radicular(g) de las plantas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.) var. Pony Express en un invernadero de baja tecnología, Unidad de Olericultura Intensiva, Universidad Zamorano.....	42

### Índice de Figuras

Figura 1 Localización geográfica del invernadero de baja tecnología de la Unidad de Olericultura Intensiva de la Universidad Zamorano en donde se realizó la investigación. ....	15
Figura 2 Mapa de distribución de los tratamientos en el invernadero de baja tecnología de la Unidad de Olericultura Intensiva en la Universidad Zamorano. ....	24

### Índice de Anexos

Anexo A Análisis de pH realizado para cada sustrato en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Zamorano, Honduras, 2025. ....	50
Anexo B Análisis de agua del invernadero. ....	51
Anexo C Preparación de los sustratos. ....	52
Anexo D Pasteurización de los sustratos. ....	53
Anexo E Recipiente utilizado para la recolección del agua drenada. ....	54
Anexo F Toma de datos de pH y conductividad eléctrica. ....	55
Anexo G Tomas de datos de altura y grosor de tallo. ....	56
Anexo H Medición de peso y longitud del sistema radicular. ....	57

## Resumen

El sustrato es uno de los factores más determinantes en los sistemas semi-hidropónicos, ya que influye directamente en el desarrollo radicular, disponibilidad de agua y nutrientes. La elección adecuada de sustratos define la porosidad, retención de humedad y aireación en la rizosfera. El objetivo fue determinar la influencia de las propiedades físicas de los sustratos (porosidad, retención de humedad y aireación) en el crecimiento vegetativo y desarrollo radicular del cultivo de tomate bajo estructura protegida. Se utilizó un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos y 21 repeticiones, totalizando 84 unidades experimentales. Los sustratos evaluados fueron: 1 (suelo-compost-raquis de maíz molido, 0.5:0.5:1.5), 2 (suelo-compost-raquis de maíz molido, 1.5:1:1), 3 (suelo-compost-fibra de las hojas de palmera (*Roystonea regia* O.), (1:1:1) y 4 el testigo (suelo-compost-raquis molido, 1:1:1). Las propiedades físicas se determinaron a través de método columna de agua y el pH con análisis de laboratorio. Las variables evaluadas fueron: altura y grosor de planta, porcentaje de drenaje, pH y conductividad eléctrica del drenaje, longitud y peso radicular. Los resultados mostraron que los sustratos 2 y 3 superaron al testigo en variables clave, el sustrato 2 destacó en retención de humedad (66.6%), grosor de tallo (11.18 mm) y peso radicular (77.08 g), mientras que el 3 lo hizo en aireación (41.17%), altura de planta (121.19 cm) y longitud radicular (48.83 cm). El drenaje se mantuvo en rangos (10-25%), con pH (6.4-6.66) y EC (2.64-2.9 mS/cm) adecuados para la absorción nutricional. Se demostró que sustratos con equilibrio hídrico y oxigenación optimizan el vigor del cultivo, permitiendo identificar alternativas circulares basadas en residuos agrícolas.

*Palabras clave:* aireación, porosidad, retención de humedad, sistema semi-hidropónico, sustratos.

### Abstract

The substrate is one of the most determining factors in semi-hydroponic systems, as it directly influences root development, water supply, and nutrient availability. The appropriate selection of substrates defines porosity, moisture retention, and aeration in the rhizosphere, which in turn affects nutrient uptake and plant physiology. The objective was to determine the influence of the physical properties of substrates (porosity, moisture retention, and aeration) on vegetative growth and root development. A completely randomized design was used with four treatments and 21 replications, totaling 84 experimental units. The substrates evaluated were: 1 (soil-compost-ground corn rachis, 0.5:0.5:1.5), 2 (soil-compost-ground corn rachis, 1.5:1:1), 3 (soil-compost-palm fiber, 1:1:1), and 4 the control (soil-compost-ground corn rachis, 1:1:1). Physical properties were determined using the water column method, and pH was measured through laboratory analysis. The variables evaluated were plant height and stem thickness, drainage percentage, pH and electrical conductivity of the drainage, root length, and root weight. Results showed that the substrates 2 and 3 outperformed the control in key variables, 2 excelled in moisture retention (66.6%), stem thickness (11.18 mm), and root weight (77.08 g), while 3 showed superior aeration (41.17%), plant height (121.19 cm), and root length (48.83 cm). Drainage remained within the range of 10–25%, with pH (6.4–6.66) and EC (2.64–2.9 dS/m) appropriate for nutrient absorption. The study demonstrated that substrates with balanced water retention and aeration optimize crop vigor, allowing for identification of circular alternatives based on agricultural residues.

Keywords: aeration, porosity, moisture retention, semi-hydroponic system, substrates.

## Introducción

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una planta herbácea anual o bianual perteneciente a la familia Solanaceae. Es una de las hortalizas con mayor importancia en el mundo tanto por su valor nutritivo como por su impacto económico en el sector agropecuario. Estudios de la FAO indican que el tomate es la hortaliza de mayor importancia en el mundo, alcanzó 4,7 millones de hectáreas y una producción de 164 millones de toneladas en 2013 (Guzmán, 2017).

En Honduras, el tomate es la hortaliza de mayor consumo y representa un rubro clave para la economía agrícola. Las principales zonas productoras están establecidas en: El Paraíso, Comayagua, Francisco Morazán, Choluteca, Olancho, Copán y Ocotepeque (Secretaría de agricultura y Ganadería, 2020).

Dada su importancia económica, resulta indispensable implementar técnicas de producción que sean eficientes, al mismo tiempo, adaptables a las características de cada zona y a la disponibilidad de recursos para mejorar a las condiciones adversas que enfrenta cada productor. Entre las innovaciones más relevantes destaca el uso de invernaderos, los cuales se definen como construcciones agrícolas con paredes y cubiertas traslúcidas de vidrio o distintos tipos de plásticos que permiten recrear o simular las condiciones climáticas más favorables para el crecimiento y desarrollo de los cultivos (López et al., 2016).

Dentro de las estructuras protegidas, uno de los sistemas de producción más utilizados es el semi-hidropónico. En este método, las plantas se desarrollan en materiales inertes o parcialmente orgánicos que sirven como soporte físico, mientras que el agua y los nutrientes se suministran de manera controlada a través del fertirriego (Vizcarra, 2018).

Además, los sustratos ofrecen un medio que favorece la retención de humedad, mejora la oxigenación radicular lo que permite un mejor desarrollo y mejores rendimientos del cultivo. Al no depender directamente del suelo, se minimizan los problemas relacionados con su degradación, la

presencia de patógenos y la transmisión de enfermedades comunes en sistemas tradicionales (Savvas y Gruda, 2018).

El compostaje surge como una opción viable en este contexto, ya que se define como un proceso biológico complejo en el cual diversos microorganismos, bajo condiciones aerobias, transforman la materia orgánica aprovechando el nitrógeno (N) y el carbono (C) disponibles para sintetizar biomasa (Nemet et al., 2021). Este material puede emplearse como componente de sustratos, aportando beneficios tanto físicos como biológicos al medio de cultivo.

El raquis de maíz molido, subproducto obtenido en el proceso de separación del grano de la mazorca, es uno de los residuos agrícolas que más abunda en la Universidad Zamorano y ha sido utilizado por años en la Unidad de Olericultura Intensiva. Se calcula que por cada tonelada de maíz se generan aproximadamente 170 kg de este material (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, 1995). En el 2023, se estimó que la producción mundial de residuos agrícolas alcanzó aproximadamente 1661 millones de toneladas, de las cuales el raquis de maíz representa alrededor del 27.2%. Este recurso se destina principalmente a la quema en campo o al vertido en vertederos, lo que limita su aprovechamiento para otras actividades (Zabed et al., 2023)

El empleo del raquis de maíz molido en invernaderos ha mostrado beneficios particulares, ya que favorece dando una buena infiltración y permeabilidad, esto ayuda a mantener temperaturas más uniformes en el sustrato, protegiendo al suelo de los efectos de la dispersión ocasionada por el riego. Durante su descomposición, este material libera grandes cantidades de dióxido de carbono, lo que enriquece la atmósfera interna del invernadero, siendo este uno de los aportes más significativos de su incorporación (Martínez et al., 2017).

Otro de los residuos que más abundan en la Universidad Zamorano, es la fibra de la hoja de palmera (*Roystonea regia* O.) que se recoge de los jardines. Estudios indican que una alta proporción de partículas mayores a 2 mm ( $\approx 82\%$ ) es capaz de generar: alta porosidad, drenaje y baja retención de agua. Además, se ha observado que en sustratos elaborados con fibras de hojas de palmera

*Roystonea regia* O.) y compost que algunas formulaciones alcanzan niveles altos de materia orgánica (OM), comparables o ligeramente inferiores a los de fibra de coco. Ciertos compuestos mostraron concentraciones adecuadas de nitrógeno y otros ion-residuales, indicando potencial nutricional (Gomis et al., 2022). También, en estudios con pimiento dulce, sustituyó parcialmente al rockwool, mostrando menor porcentaje de frutos con pudrición (BER) y mayor eficiencia en el uso del agua (Qaryouti et al., 2023).

Así que, la fibra de la hoja de palmera (*Roystonea regia* O.) representa una opción circular que puede combatir el problema de acumulación de desechos y ofrece un sustrato orgánico y biodegradable. Mejora la aireación, aporta materia orgánica, y constituye una alternativa ecológica frente a sustratos inertes tradicionales.

El objetivo de este estudio fue evaluar diferentes proporciones de materiales orgánicos y de bajo costo disponibles dentro de Universidad Zamorano, con el propósito de formular un sustrato eficiente que optimice el desarrollo y crecimiento del cultivo. Esta aproximación busca no solo maximizar la productividad bajo condiciones controladas, sino también promover alternativas sostenibles y accesibles que puedan ser replicadas en sistemas de producción similares en Honduras y la región.

## Materiales y Métodos

### Localización Geográfica

La investigación se realizó en la Universidad Zamorano, en un invernadero con baja tecnología de la Unidad de Olericultura Intensiva. El área se ubica específicamente en el municipio de San Antonio de Oriente, departamento de Francisco Morazán, Honduras (Figura 1). El clima predominante es cálido y moderadamente húmedo subtropical, con temperaturas que oscilaron entre 25-35 °C a lo largo del proyecto que comprende desde los meses de mayo-agosto. La precipitación anual promedio aproximada es de 1000 mm. La humedad relativa dentro de la estructura protegida se mantuvo entre 65-75%.

### Figura 1

*Localización geográfica del invernadero de baja tecnología de la Unidad de Olericultura Intensiva de la Universidad Zamorano, Honduras.*



### Descripción del Cultivo

Se usó la variedad de tomate Pony Express (un híbrido de hábito de crecimiento determinado, porte compacto, precocidad y resistencia a enfermedades como *Verticillium dahliae*, *Verticillium albo-atrum*, *Fusarium oxysporum f.sp. lycopersici* (Raza 1,2,3) (Solís y Tobar, 2023). La variedad produce frutos tipo “saladette” con una firmeza y 3.8 °brix mejores que otros híbridos, mostrando un desempeño competitivo en rendimiento y calidad (J. Hernández y Umazor, 2022). Esta variedad combina precocidad, uniformidad y calidad comercial importantes para medir rendimientos. Las plántulas usadas para este experimento fueron adquiridas en los Zorzales, Danlí, El Paraíso y fueron trasplantadas a los 21 días de germinación y 10 cm de altura promedio.

### Selección y Caracterización del Sustrato

Según Navarro et al. (2012) los sustratos usados en cultivos protegidos deben poseer buenas cualidades físicas como es la aireación y drenaje adecuados, además de una capacidad de retención de agua suficiente para evitar el déficit de agua, lo que, valida el uso de los cálculos de columna de agua, como los de porosidad, drenaje, retención y aireación. Para diseñar las proporciones, se tomaron en cuenta las características físicas de un buen sustrato que son retención de humedad mayor del 60%, aireación mayor a un 30% y porosidad mayor a un 85%.

### Propiedades Físicas del Sustrato

Para verificar si los sustratos poseían las características deseables, se determinó mediante un método de cálculos de columna de agua. Se usaron las fórmulas [1] a la [4] a continuación descritas.

#### **Porosidad Total% (PT)**

$$PT = \frac{(\text{Volumen de agua retenida} + \text{aireación } \%)}{\text{Volumen total del sustrato}} \times 100 \quad [1]$$

#### **Retención de Humedad% (RH)**

$$RH = \frac{\text{Volumen de agua retenida}}{\text{Volumen total del sustrato}} \times 100 \quad [2]$$

**Drenaje% (D):**

$$D = \frac{\text{Volumen de agua drenada}}{\text{Volumen de agua aplicada}} \times 100 \quad [3]$$

**Aireación% (A):**

$$A = \text{Drenaje \%} \quad [4]$$

**Tratamiento Suelo-Compost-Raquis de maíz Molido (S 0.5:C0.5: R1.5)**

Compuesto por suelo-compost-raquis de maíz molido en proporción 0.5:0.5:1.5. En esta combinación se aprovechó las propiedades físicas de la mezcla. Mediante la caracterización este demuestra una porosidad total del 63.5%, retención de humedad de un 62.6% y 37% de aireación.

**Tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S 1.5:C 1: R 1)**

Compuesto por suelo-compost-raquis de maíz molido en proporción 1.5:1:1. En este tratamiento por su proporción cuenta con una participación relativamente alta del suelo en comparación con el tratamiento uno. La caracterización del sustrato muestra una porosidad del 61.5%, retención de humedad del 66.6% y aireación del 33.3%.

**Tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S 1: C 1: F 1)**

Compuesto por suelo-compost-fibra de las hojas de palmera en proporción 1:1:1. Es una mezcla innovadora en donde se sustituye el uso de raquis de maíz por la fibra de las hojas de palmera de los jardines de Zamorano. La caracterización demuestra una porosidad de 68%, retención de humedad de 58.82% y una aireación de 41.17%.

**Testigo Suelo-Compost-Raquis molido (S 1: C 1:R 1)**

Mezcla estándar utilizada en la Unidad de Oleicultura Intensiva, está formado por suelo-compost-raquis de maíz molido en proporción 1:1:1. La caracterización muestra que el sustrato cuenta con una porosidad de 62%, retención de humedad de 56.6%, y una aireación de 43.4%.

**Mezcla y Pasteurización de los Sustratos**

Una vez caracterizados los sustratos, se prepararon las mezclas correspondientes a cada tratamiento. Las proporciones se establecieron mediante el método de volteo manual, empleando palas para garantizar la homogeneidad de los sustratos, el cual posteriormente se separaron en sacos.

Cada mezcla fue sometida a un proceso de pasteurización mediante la aplicación de vapor saturado, con el propósito de eliminar microorganismos patógenos y reducir la carga microbiana presente. El vapor, generado por una caldera, fue conducido a través de una manguera hacia un recipiente cerrado con capacidad adecuada para contener el sustrato. El tratamiento se efectuó durante siete horas, a 10 PSI de presión y a 90 °C, parámetros que aseguran la inactivación de agentes fitopatógenos sin comprometer las propiedades fisicoquímicas del sustrato.

Una vez los sustratos finalizaron el proceso de pasteurización, se tomaron pequeñas muestras de cada tratamiento para ser llevado al Laboratorio de Suelos de la Universidad Zamorano con el propósito de evaluar el pH (Anexo B).

**Manejo Agronómico**

Se realizaron una serie de actividades previas en el invernadero de baja tecnología como: tapar agujeros que pueden dar entrada a las plagas, sellado de las grietas de las entradas agregando mallas a través de costuras, nivelación del suelo para el experimento utilizando tablas, realización de los drenajes apoyándonos de plásticos colocados en el suelo para que el agua pueda drenarse de manera fácil sin que pueda causar algún daño al cultivo siendo este un atrayente de plagas.

Posteriormente a la caracterización, se realizó la preparación de las mezclas de cada sustrato con sus respectivas relaciones a través de un volteo manual hasta que la mezcla de todos los

ingredientes fuera homogénea. Se utilizaron bolsas plásticas bicolor con cara externa blanca y de cara interna negra, como contenedores para el cultivo de tomate con un tamaño adecuado que permitió un buen desarrollo del sistema radicular. Estas bolsas fueron llenadas de sustrato 7 días antes del trasplante.

Se trasplantó una plántula por cada bolsa, ya que, esto garantizó suficiente espacio en su crecimiento. La distancia entre bolsas fue de 40 cm lo cual facilitó el manejo y uso adecuado del espacio por planta en bolsa del invernadero.

### **Riego y Fertilización**

Para este proyecto se implementó un sistema de riego por goteo de tipo espagueti, con adaptadores de cuatro salidas y goteros autocompensados con caudal de 4 L/h localizados en cada uno de los sustratos. Garantizó una mayor eficiencia en el uso del agua y permitió humedecer el medio de manera uniforme en la zona radicular del cultivo. El sistema fue programado mediante un temporizador, en el cual se estableció una frecuencia de seis riegos diarios, ajustados de acuerdo con las necesidades hídricas y momento críticos de las condiciones ambientales del cultivo dentro del invernadero, con el fin de reducir estrés por déficit o exceso de humedad.

La fertilización se realizó a través de fertirriego. La solución nutritiva fue diseñada para satisfacer los requerimientos nutricionales de acuerdo con la fisiología del cultivo (Cuadro 1 y 2), en el cual se buscó garantizar un aporte balanceado de macro y micronutrientes en cada etapa del cultivo. Los fertilizantes que se utilizaron en el plan nutricional para el experimento: fosfato monopotásico ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), sulfato de potasio ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ), sulfato de magnesio ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) y nitrato de calcio ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ) como fuente de calcio. Adicionalmente, se incorporaron una mezcla de microelementos esenciales como hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobre (Cu) y boro (B) a una dosis de 40 mL por 400 L de agua que era la capacidad del tanque de fertirriego, el cual se preparaba cada vez que se llenaba el tanque.

**Cuadro 1**

*Nutrientes utilizados en el programa de fertirrigación para el cultivo de tomate (Solanum lycopersicum L.) var. Pony Express desde 0 a 45 días después de trasplante para un tanque de 400 Litros en el invernadero de baja tecnología, Universidad Zamorano.*

Nutrientes	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	KNO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	Mix de micronutrientes
Requerimiento (g/400L)	95	358	0	164	360	68.3	22

**Cuadro 2**

*Nutrientes utilizados en el programa de fertirrigación para el cultivo de tomate (Solanum lycopersicum L.) var. Pony Express desde 46 a 66 días después de trasplante para un tanque de 400 Litros en el invernadero de baja tecnología, Universidad Zamorano.*

Nutrientes	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	KNO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	MgSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	Mix de micronutrientes
Requerimiento (g/400L)	95	526	9	218	311	120	22

**Tutoreo y Poda**

A los 25 días después de trasplante, se implementó tutoreo de tipo español ya que era el que se adaptaba de mejor manera a la variedad Pony Express. Se utilizaron estacas de madera en los laterales y esquinas de cada fila, junto con una soga plástica que sirvió como soporte. Este tipo de tutoreo nos permitió mantener una estructura más ordenada, un mejor manejo y evitar el contacto de los frutos con el suelo.

De manera complementaria, se realizó una poda sanitaria la cual fue enfocada en eliminar las hojas bajas (las primeras 4 hojas) y la vez tener mejor aireación en la planta. Dicha práctica, se realizaba con tijeras de poda y se desinfectaba después de realizar la poda en cada planta.

## **Manejo de Plagas y Enfermedades**

El control fitosanitario que se llevó a cabo para el experimento fue con un enfoque integrado que combina monitoreo diario, métodos preventivos, aplicaciones de biológicos fúngicos y químicos las cuales fueron aplicadas una vez por semana tomando en cuenta que estas no afectaran a los biológicos aplicados desde los meses de mayo-agosto. Para lograr obtener detecciones tempranas de plagas. También, se colocaron trampas cromáticas de color amarillas dentro del invernadero, las cuales permitieron identificar incidencia mosca blanca (*Bemisia tabaci*) de manera temprana para su control.

Con base a la información recopilada del monitoreo diario, se realizaron aplicaciones dirigidas de producto químicos, empleando ingredientes activos de diferentes grupos que redujeron la probabilidad de resistencia ayudando también a mantener una incidencia baja de las distintas plagas. También, se realizó desinfección de herramientas y el uso de pediluvios en el acceso al invernadero para disminuir ingreso de patógenos.

## **Variables Evaluadas**

### ***Altura de la Planta***

Se midió la altura de todas las plantas a partir del día 14 después de trasplante. La toma de datos se realizó cada 7 días durante los meses de junio a julio. Esta medida fue tomada con una cinta métrica, midiendo desde la base del tallo hasta el ápice de la planta.

### ***Grosor del Tallo***

Se midió el grosor del tallo de cada planta a partir del día 14 después de trasplante. La toma de datos se realizó cada 7 días durante los meses de junio a julio. La medición se realizó con un pie de rey digital para aumentar la precisión de la toma de datos.

### ***Porcentaje de Drenaje***

A partir del inicio del experimento, se colocaron recipientes en 3 unidades experimentales de cada tratamiento con el fin de evaluar el volumen de agua drenado de cada sustrato. Todos los días,

se recolectó el agua drenada de cada unidad al completar todos los riegos programados para aforar con una probeta y calcular el porcentaje de drenaje con la fórmula [5].

$$Drenaje\% = \frac{\text{Volumen de agua drenado}}{\text{Volúmen de agua suministrado}} \times 100 \quad [5]$$

### ***pH Y Conductividad Eléctrica***

Estas variables se midieron con el uso de un potenciómetro calibrado durante los meses de mayo-agosto. La toma de datos fue diaria, se realizaba lectura del volumen de agua que se obtenía del aforo de agua drenado de las unidades experimentales que fueron seleccionadas para portar los recipientes.

### ***Peso y Longitud Radicular***

Se seleccionaron al azar 12 plantas por tratamiento, las cuales fueron extraídas cuidadosamente de la bolsa del cultivo para evitar daños a las raíces. Se cortó el tallo a 5 cm desde la base para estandarizar las muestras las raíces y se lavaron con agua para eliminar restos del sustrato. Las raíces lavadas se dejaron secar en el invernadero durante 24 horas. La medición de la longitud total de la raíz principal se realizó con una cinta métrica y para el peso se utilizó una balanza digital calibrada en gramos. Este procedimiento se le realizó cada una de las 12 unidades experimentales seleccionadas por cada tratamiento para asegurar homogeneidad y representatividad en el análisis.

### **Diseño Experimental y Análisis Estadístico**

Se utilizó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con cuatro tratamientos, cada uno con 21 repeticiones, totalizando 84 unidades experimentales, donde cada bolsa constituyó una unidad experimental independiente. Para elaborar el mapa de distribución de los tratamientos, se utilizó una fórmula para aleatorizar y determinar la ubicación de cada unidad experimental (Figura 2).

Para el análisis estadístico, se evaluó la normalidad de las variables mediante la prueba de Shapiro-Wilk, clasificándolas como paramétricas o no paramétricas. Para las variables paramétricas, se aplicó un Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía, seguido de la prueba post-hoc de Tukey. Para

las variables no paramétricas, se empleó la prueba de Kruskal-Wallis, complementada con la prueba post-hoc de Conover. Los análisis se realizaron en el software InfoStat (Versión 2020) con un nivel de significancia de  $p \leq 0.05$  garantizando la fiabilidad de las inferencias estadísticas.

**Figura 2**

*Mapa de distribución de los tratamientos en el invernadero de baja tecnología de la Unidad de Olericultura Intensiva en la Universidad Zamorano, Honduras.*



S = Suelo | R = Raquis molido | C = Compost | FP = Fibra de palma

## Resultados y Discusión

La variable de longitud radicular fue la única que resultó normal ( $p = 0.0605$ ) (Cuadro 3). Esto se atribuye a que las variables sin restricciones físicas tienden a tener mayor variabilidad y distribuciones no normales en estudios biológicos (Sokal y Rohlf, 1995). Es decir, la restricción física impuesta por el tamaño de las bolsas de cultivo limitó el crecimiento de la raíz principal, reduciendo la variabilidad (D.E = 10.90 cm) y evitando valores extremos, favoreciendo una distribución simétrica con un tamaño de muestra moderado ( $n = 48$ ). Esto permite el uso de un análisis paramétrico como el Análisis de varianza (ANDEVA).

Por otro lado, las variables correspondientes a peso radicular, conductividad eléctrica (EC), pH, porcentaje de drenaje, altura y grosor del tallo presentaron un comportamiento no paramétrico, es decir, no siguieron una distribución normal ( $p < 0.0001$ ) (Cuadro 3). Esta falta de normalidad puede explicarse por la naturaleza biológica de los organismos vegetales, en los que la variabilidad genética entre individuos genera respuestas heterogéneas en el crecimiento y desarrollo, incluso bajo condiciones controladas. Además, factores ambientales, como micro variaciones dentro del invernadero en cuanto a temperatura, humedad relativa, radiación incidente y distribución del riego, tienden a amplificar dichas diferencias, provocando la aparición de asimetrías y valores atípicos en las mediciones.

Según Zar (2010) en estudios biológicos las variables que miden características morfológicas o de crecimiento, suelen presentar distribuciones sesgadas, ya que la interacción entre la variabilidad genética y los factores ambientales produce respuestas no uniformes. Esto se observa con frecuencia en experimentos agronómicos, donde la respuesta diferencial de las plantas a los tratamientos conduce a la obtención de distribuciones no normales, lo que justifica la necesidad de aplicar un método estadístico no paramétrico como la prueba de Kruskal-Wallis.

### Cuadro 3

*Prueba de Shapiro-Wilk para las variables de longitud radicular(cm), peso radicular(g), conductividad eléctrica (EC), pH, porcentaje de drenaje, altura de la planta(cm) y grosor del tallo(mm) de tomate cultivado en estructura protegida de baja tecnología.*

Variable	n	Media	D.E	p
Longitud(cm)	48	42.7	10.9	0.061
Peso(g)	48	56.5	24.3	<0.0001
EC	696	2.7	0.8	<0.0001
pH	696	6.8	0.5	<0.0001
Drenaje%	696	17.5	7.9	<0.0001
Altura(cm)	672	72	30.9	<0.0001
Grosor(mm)	672	8.1	4.2	<0.0001

Nota. D.E: Desviación estándar, p: probabilidad.

### Altura de la Planta (cm)

Las primeras dos semanas del cultivo, que corresponden del 2 al 16 de junio (20-40 días post-trasplante), se definen como la fase inicial. Durante este período las alturas oscilaron entre 20.14 y 30.71 cm el 2 de junio, con incrementos semanales de aproximadamente 10-17 cm y con diferencias estadísticas significativas (Cuadro 4). Esta fase coincide con la etapa de establecimiento vegetativo temprano (BBCH 10-19), donde la división celular apical y el estiramiento intermodal dependen directamente de la disponibilidad inmediata de agua y nutrientes. La capacidad de mantener la turgencia celular es crítica en una variedad determinada como Pony Express, ya que su fisiología prioriza un rápido desarrollo apical después de trasplante para llegar lo antes posible a la floración.

### Cuadro 4

*Efecto del sustrato en el crecimiento de altura en las plantas de tomate (Solanum lycopersicum L.) var. Pony Express en un invernadero de baja tecnología, Unidad de Olericultura Intensiva, Universidad Zamorano, junio-julio.*

Tratamiento	Altura(cm)					
	14 DDT	21 DDT	35 DDT	42 DDT	56 DDT	63 DDT
(1suelo: 1compost: 1fibra de la hoja de palmera)	25.38b	38.10a	72.71a	87.14	108.38	121.19c
(1.5suelo: 1compost: 1raquis de maíz)	30.71b	47.52b	79.52b	87.76	104.90	117.95bc
(0.5suelo: 0.5compost: 1.5raquis de maíz)	24.33a	39.9a	75.76ab	88.48	101.33	110ab
(1suelo: 1compost: 1raquis de maíz)	20.14c	34.29a	71.48a	85.86	98.90	106.62a
P	<0.0001	0.001	0.0219	0.6914	0.0927	0.0006

Nota. <sup>abc</sup> Valores en la misma columna con letra distinta difieren entre sí, DDT: Días después de trasplante, p: probabilidad.

La mayor retención de humedad en el tratamiento de Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) (66.6%) permitió mantener un nivel óptimo de turgencia, lo que favoreció un elongamiento inicial más rápido. Esto se debe a que una alta retención de agua potencia la acumulación de auxinas y giberelinas, hormonas que regulan la expansión celular y la elongación del tallo en condiciones de humedad adecuada. En este sentido, estudios realizados en sustratos orgánicos (mezclas suelo-compost) en la variedad determinada Badro reportan que sustratos con retención de humedad >65% incrementaron la altura inicial de plántulas en un 15-18% (de 1.39 cm a 1.65 cm a 20 días postrasplante) en comparación con sustratos de menor retención (L. Ortega et al., 2010).

A diferencia de la menor retención de humedad en el testigo Suelo-Compost-Raquis molido (S1:C1:R1) (56.6%) limitó el vigor temprano, probablemente debido a episodios de estrés hídrico transitorio que redujeron la biosíntesis de giberelinas. Esta situación está documentada en estudios que muestran cómo sustratos con baja capacidad de retención retrasan el establecimiento en variedades determinadas. La alta significancia estadística observada en esta fase refleja claramente la sensibilidad de las plántulas a la retención de humedad. Si bien la aireación moderada (33.3-43.4%) en todos los tratamientos evitó problemas de anoxia radicular, no logró compensar completamente las diferencias provocadas por la disponibilidad de agua.

En las semanas comprendidas entre el 23 de junio y el 14 de julio, que conforman la fase intermedia (45-70 días postrasplante), no se observaron diferencias significativas en la mayoría de las fechas ( $p = 0.0219$  el 23 de junio,  $p > 0.05$  después). Esta etapa se asocia al crecimiento vegetativo pleno, donde predominan la expansión foliar y la acumulación de reservas fotosintéticas, lo que estabiliza el ritmo de elongación del tallo. Este patrón de estabilización se explica por la transición hacia un equilibrio fisiológico en el que el fotoperíodo, la temperatura en invernadero y la suplementación de micronutrientes optimizan la fotosíntesis y la eficiencia en la partición de carbohidratos.

Un estudio en la variedad determinada Badro muestra que el fertirriego balanceado con N, P, K y micronutrientes (Fe, Mn, Zn), combinado con un fotoperíodo de 12-14 horas de luz y temperaturas controladas de 20-30 °C, estabilizó el crecimiento vegetativo con tasas de elongación de 4-7 cm/semana y alturas finales de 70-90 cm a los 50-70 días postrasplante (L. Ortega et al., 2010). Las alturas encontradas en este estudio (71.48-108.38 cm) y las tasas de incremento (4-6 cm/semana) son muy similares a lo reportado.

Adicionalmente, la porosidad equilibrada (61.5-68%) de los sustratos favoreció una adecuada exploración radicular, reduciendo la compactación y estabilizando la altura del cultivo. Según Monge (2007), en la variedad determinada Hayd slip, los sustratos con porosidad >60% lograron mantener un crecimiento estable para esta etapa, alcanzando alturas de 70-90 cm a 50-70 días y con tasas de elongación de 4-6 cm/semana. Estos valores coinciden estrechamente con los de la presente investigación (71.48-108.38 cm).

Finalmente, para el 21 de julio, correspondiente a la fase final (~80 días postrasplante), las alturas oscilaron entre 106.62 y 121.19 cm, con diferencias significativas ( $p = 0.0006$ ). Esta etapa representa la madurez vegetativa tardía, donde se acelera la translocación de carbohidratos hacia el tallo debido a la inminente demanda reproductiva. La aireación superior en el tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1) (41.17%) y en el testigo Suelo-Compost-Raquis molido (S1:C1:R1) (43.4%) probablemente mejoró la respiración radicular y favoreció un mayor elongamiento, gracias a una síntesis más eficiente de giberelinas bajo condiciones de alta oxigenación. La fibra de las hojas de palmera utilizada en actuó como un medio que optimizó la oxigenación radicular, de manera similar a lo que ocurre en mezclas con vermiculita que incrementan la altura tardía en un 12-15% (L. Ortega et al., 2010).

En este sentido, otro estudio muestra que en la variedad Hayd slip, los sustratos con aireación >40% alcanzaron alturas de 90-92 cm a los 80 días postrasplante. La mayor aireación mejoró la respiración radicular, incrementando la altura tardía en un 10-13% en comparación con sustratos de

menor aireación (Monge, 2007). Los resultados aquí obtenidos (106.62-121.19 cm) superan los reportados para Hayd slip (90-92 cm), pero la aireación del tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1) (41.17%) coincide con el umbral de >40%. Además, el incremento de alrededor del 14% en dicho tratamiento es comparable al 10-13% descrito en la literatura.

### **Grosor del Tallo de la Planta (mm)**

Referente al cuadro 5, durante las primeras dos semanas de junio, correspondientes a la fase inicial (20-40 días postrasplante), se observaron grosores de tallo que oscilaron entre 3.90-4.74 mm (2 de junio) y 6.97-8.29 mm (16 de junio), evidenciando diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.0001$  el 2 de junio,  $p = 0.0239$  el 9 de junio,  $p = 0.1303$  el 16 de junio). La división celular y la turgencia en el tallo dependen principalmente de la disponibilidad de agua y nutrientes (Adams y Ho, 1993).

La elevada retención de humedad en el tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) (66.6%) favoreció un mayor grosor inicial (4.74 mm vs. 3.90 mm del testigo), lo que promovió la turgencia y la síntesis de auxinas necesarias para la expansión celular. (L. Ortega et al., 2010) señalan que sustratos con retención superior al 65% incrementan el grosor del tallo en 15-20% en la variedad Badro para esta etapa, lo que respalda los resultados observados. La significancia estadística obtenida refleja la sensibilidad de las plántulas a la retención de humedad, mientras que la convergencia parcial ( $p = 0.1303$  el 16 de junio) sugiere que la aireación (33.3-43.4%) empieza a equilibrar el crecimiento del tallo.

Chowdhury et al. (2024), reportaron que en variedades determinadas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), los sustratos orgánicos con retención de humedad superior al 65% (coir y fibra) permitieron alcanzar grosores de 4.5-5.5 mm a los 20 días y 6.5-8 mm a los 40 días post-trasplante, con incrementos semanales de 1-1.8 mm, atribuibles a un mejor turgencia y síntesis de auxinas. Los resultados obtenidos en nuestro estudio (3.90-4.74 mm a los 20 días y 6.97-8.29 mm a los 40 días) son similares, aunque la mayor retención de humedad en el tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz

Molido (S1.5:C1:R1) (66.6%) y el manejo intensivo en invernadero potencian un mayor grosor inicial en comparación con sustratos estándar como los descritos por (Chowdhury et al., 2024).

De manera semejante, Wang et al. (2024), demostraron que sustratos con paja y retención de humedad superior al 60% se pueden lograr grosores de 4-5 mm a los 20 días y 6-7.5 mm a los 40 días en variedades determinadas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), con incrementos de 0.8-1.5 mm por semana, debido a la alta disponibilidad de agua y nutrientes. Al contrastar estos datos con los nuestros, se observa que los valores obtenidos (6.97-8.29 mm a los 40 días) son ligeramente superiores, siendo el tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) (8.29 mm) el tratamiento con mejor desempeño, atribuible a la mayor retención de humedad.

Durante el período del 23 de junio al 14 de julio, correspondiente a la fase intermedia (~45-70 días postrasplante), los grosores se ubicaron entre 7.72-8.86 mm (23 de junio) y 9.32-10.69 mm (14 de julio), con diferencias marginales en significancia ( $p = 0.0579$  el 23 de junio,  $p < 0.05$  el 30 de junio,  $p = 0.0054$  el 14 de julio). En esta etapa predominó la acumulación de biomasa foliar y la estabilización estructural del tallo. La adecuada disponibilidad de micronutrientes y las condiciones de invernadero optimizaron la fotosíntesis, lo que favoreció la partición de carbohidratos hacia el tallo. Además, la elevada porosidad (61.5-68%) en todos los sustratos facilitó la exploración radicular, redujo la compactación y estabilizó el grosor, destacando el tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) (10.69 mm el 14 de julio) por su mayor retención de humedad (66.6%).

Olubango y Alade (2018) encontraron que en sustratos con porosidad superior al 60% en variedades determinadas de tomate alcanzaron grosores de 7.5-9.5 mm a los 60 días, con incrementos de 0.4-0.7 mm por semana, gracias a una mejor exploración radicular. En nuestro estudio, los grosores observados (7.72-10.69 mm) superan esos valores, lo que podría deberse a la presencia de fibra de las hojas de palmera en el tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1) y a las proporciones de suelo en el tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1).

Otro estudio señala que sustratos orgánicos con porosidad superior al 60% lograron grosores de 8-10 mm a los 50-70 días, con incrementos de 0.5-0.9 mm por semana, debido a la reducción de compactación y a la mayor oxigenación radicular (Chowdhury et al., 2024). Nuestros datos son consistentes con este hallazgo, destacando el tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) con 10.69 mm. La convergencia estadística ( $p > 0.05$  entre el 16 y el 30 de junio) coincide con el estudio de referencia, donde el manejo intensivo contribuye a uniformizar el crecimiento.

Finalmente, en la última semana del 21 de julio, correspondiente a la fase final (~80 días post-trasplante), se alcanzaron grosores finales de 10.51-11.18 mm, con diferencias significativas ( $p = 0.0006$ ). En esta etapa, la translocación de carbohidratos hacia el tallo se intensifica debido a la demanda reproductiva característica de variedades determinadas. La aireación elevada en el tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1) (41.17%) mejoró la respiración radicular, aumentando la eficiencia fotosintética y la síntesis de giberelinas, lo que promovió un mayor grosor (T3:10.51 mm; T2:11.18 mm). (Aydi et al., 2023) confirman que sustratos con aireación superior al 40% incrementan el grosor del tallo entre 10-15% para esta etapa, debido a la mejor oxigenación radicular.

Olubango y Alade (2018) reportaron grosores de 8-10 mm para esta etapa en variedades determinadas de tomate cultivadas en sustratos sin suelo (fibra de coco, perlita, lana de roca) con aireación cercana al 30-40%, atribuyéndolo a una mejor respiración radicular y a la síntesis de giberelinas en la etapa previa a la floración. Dicho manejo incluyó fertirriego estándar ajustado semanalmente y poda sanitaria. De igual forma, Aydi et al. (2023) encontraron grosores de 9-11 mm a los 80 días postrasplante en variedades determinadas en sustratos con aireación superior al 40% (compost de residuos orgánicos), con incrementos del 10-12% respecto al suelo estándar.

Los datos de nuestro estudio (10.51-11.18 mm) se ubican en el rango superior de referencia. La significancia observada junto con la aireación del tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de

Palmera (S1:C1:F1) (41.17%) y del testigo (43.4%), respaldan el mecanismo de oxigenación radicular descrito.

En este sentido, la fibra de las hojas de palmera en el tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1) ofrece condiciones comparables a las de una aireación superior al 40%.

Wang et al. (2024) reportaron grosores de 8-10 mm a los 80 días en variedades determinadas cultivadas en sustratos de paja con aireación superior al 40%, observando incrementos del 10-13% respecto a sustratos con menor aireación. En comparación, los valores de nuestro estudio (10.51-11.18 mm) superan los rangos de referencia, lo que puede atribuirse a que la fibra de las hojas de palmera, el raquis molido y el suelo ofrecen una mayor estabilidad física que la paja, optimizando la oxigenación y favoreciendo el engrosamiento del tallo.

#### Cuadro 5

*Efecto del sustrato en el grosor del tallo en las plantas de tomate (Solanum lycopersicum L.) var.*

*Pony Express en un invernadero de baja tecnología, Unidad de Olericultura Intensiva, Universidad Zamorano, junio-julio.*

Tratamiento	Grosor(mm)					
	14 DDT	21 DDT	35 DDT	42 DDT	56 DDT	63 DDT
(1suelo: 1compost: 1fibra de la hoja de palmera)	4.07a	6.00	7.72	8.56a	9.32a	10.51a
(1.5suelo: 1compost: 1raquis de maíz)	4.74b	6.37	8.86	9.60b	10.69b	11.18b
(0.5suelo: 0.5compost: 1.5raquis de maíz)	4.15a	5.60	8.55	9.44b	10.40b	10.83ab
(1suelo: 1compost: 1raquis de maíz)	3.90b	5.78	8.55	9.40b	10.21b	10.54a
P	<0.0001	0.239	0.0579	<0.05	0.0054	0.0006

*Nota.* <sup>abc</sup> Valores en la misma columna con letra distinta difieren entre sí, *DDT: Días después de trasplante. p: probabilidad.*

#### Porcentaje de Drenaje

Los 1200 ml de solución nutritiva ofertado para cada tratamiento en el cuadro 6, abarcan desde el establecimiento vegetativo (BBCH 13-19, 18-28 de mayo, altura ~10-20 cm, grosor ~3-4 mm) hasta la floración (BBCH 50-59, ~20-29 de junio). La falta de diferencias significativas ( $p = 0.2304$ ) refleja la baja demanda hídrica en estas etapas, donde los sustratos no se saturan completamente, resultando en drenajes similares (~22-25%). En esta fase, los microporos cumplen un papel clave, ya

que almacenan suficiente humedad para las plántulas, mientras los macroporos garantizan oxigenación radicular.

Investigación realizada por Dyško et al. (2008) indica drenajes de 18-22% en sustratos orgánicos con retención >65% en BBCH 10-29. Otro estudio realizado por Wang et al. (2024) indica drenajes de 15-22% en sustratos de paja con porosidad >60% en BBCH 20-39. Aydi et al. (2023), reportan drenajes de 15-20% en sustratos con retención >60% en BBCH 10-29. Por lo que, los drenajes de 21.95-25.26% son óptimos para BBCH 13-59, evitando lixiviación excesiva (>30%). Estos valores muestran que los tratamientos, aunque con diferentes niveles de retención y porosidad, mantuvieron un equilibrio dentro del rango recomendado.

Tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) (21.95%) muestra el menor porcentaje de drenaje en el cuadro 6, gracias a su alta retención de humedad (66.6%), optimizando la hidratación para turgencia celular y la división apical, crucial en plántulas de 21 días trasplantadas (~BBCH 13-15). Esto indica un predominio de microporos, que aseguran agua disponible y reducen pérdidas. Tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1) (25.26%) y testigo Suelo-Compost-Raquis molido (S1:C1:R1) (25.04%) tienen mayor drenaje debido a su menor retención (58.82%, 56.6%) y alta porosidad (68%, 62%), que favorecen el flujo de agua libre. En estos casos, el predominio de macroporos facilita el porcentaje de drenaje, pero reduce la eficiencia en la conservación de agua. Las D.E. altas (6.85-9.39) indican variabilidad por la adaptación radicular inicial, especialmente en el testigo (D.E. 9.39).

Los 2000 ml de solución nutritiva ofertado para cada tratamiento en el cuadro 6 abarca desde 30 de junio - 20 de julio, ~43-63 días postrasplante, BBCH 60-69: Desarrollo del Fruto. Este volumen corresponde al desarrollo del fruto con alta demanda hídrica por la partición de carbohidratos a los frutos. En esta fase, los macroporos juegan un papel importante porque facilitan un mayor flujo de agua que acompaña el incremento en la transpiración y transporte de nutrientes.

Dyśko et al. (2008), reportan drenajes de 15-20% en volúmenes intermedios (~2 L) para BBCH 60-69. El tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) (13.55%) posee un menor porcentaje de drenaje y T1/TST (16.97-17.85%) coinciden, pero el tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1) (22.31%) es superior. Aydi et al. (2023), reportan drenajes de 10-15% en sustratos con aireación >40% en BBCH 70-79. El tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) (10.26%) y el testigo Suelo-Compost-Raquis molido (S1:C1:R1) (10.90%) coinciden, pero el tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1) (16.06%) es mayor.

Las diferencias significativas ( $p < 0.0001$ ) reflejan las propiedades de los sustratos: tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) (13.55%, D.E. 5.53) minimiza drenaje por su alta retención (66.6%), optimizando la absorción de agua y nutrientes. Este comportamiento muestra una mayor proporción de microporos, que sostienen la disponibilidad hídrica. El tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1) (22.31%) tiene el mayor porcentaje de drenaje por su retención de humedad (58.82%) y alta porosidad (68%), que favorece el flujo de agua para evitar encharcamiento, evidenciando un predominio de macroporos. Tratamiento Suelo-Compost-Raquis de maíz Molido (S0.5:C0.5:R1.5) (16.97%) y testigo Suelo-Compost-Raquis molido (S1:C1:R1) (17.85%) ocupan un rango intermedio, beneficiándose de su balance de retención y aireación.

Los 3600 ml de solución nutritiva ofertado para cada tratamiento en el cuadro 6 abarca desde 21 de julio - 10 de agosto, ~64-84 días postrasplante, BBCH 70-79: Maduración del Fruto. Este volumen corresponde a la maduración del fruto con máxima demanda hídrica por la acumulación de azúcares y sólidos en los frutos. En esta fase, el equilibrio entre retención y aireación es crucial para sostener la carga de frutos sin comprometer el sistema radicular.

Las diferencias significativas ( $p < 0.0001$ ) reflejan las propiedades de los sustratos: tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) (10.26%) y testigo Suelo-Compost-Raquis molido (S1:C1:R1) (10.90%) minimizan drenaje por su balance de retención (66.6%, 56.6%) y aireación (35.4%, 43.4%), optimizando la eficiencia de agua y nutrientes para las 8 cosechas. Tratamiento Suelo-

Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1) (16.06%) tiene mayor drenaje por su alta porosidad (68%) y baja retención (58.82%), evitando encharcamiento. Tratamiento Suelo-Compost-Raquis de maíz Molido (S 0.5:C0.5:R1.5) (13.32%) es intermedio.

Dyśko et al. (2008), reportan drenajes de 10-15% en volúmenes altos (~3-4 L) para BBCH 70-79. El porcentaje de drenaje en tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) (10.26%) y testigo Suelo-Compost-Raquis molido (S1:C1:R1) (10.90%) coinciden, y tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1) (16.06%) es ligeramente superior. Chowdhury et al. (2024), indican drenajes de 10-15% en sustratos orgánicos con aireación >40% en BBCH 70-79. El porcentaje en el tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) (10.26%) y testigo Suelo-Compost-Raquis molido (S1:C1:R1) (10.90%) coinciden, pero tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1) (16.06%) es mayor. Wang et al. (2024), Indican porcentajes de drenaje de 10-15% en sustratos de paja con porosidad >60%. El tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) (10.26%, D.E. 2.74) coincide, con estabilidad superior.

Los drenajes de 10.26-16.06% son óptimos para BBCH 70-79, dentro del rango recomendado de 10-15%, evitando lixiviación excesiva (>15%), encharcamiento y superando drenajes en sustratos comerciales. Estos resultados evidencian que un sustrato con adecuada retención de agua (microporos) y buena aireación (macroporos) favorece la eficiencia en el uso de agua y nutrientes ya que la proporción entre ambos parámetros determina si el drenaje será limitado, balanceado u excesivo.

## Cuadro 6

*Efecto de los sustratos en el porcentaje de drenaje final de acuerdo con el volumen de solución nutritiva ofertado en plantas de tomate (Solanum lycopersicum L.) var. Pony Express en la Unidad de Olericultura Intensiva, Universidad Zamorano.*

Tratamiento	Drenaje %					
	1200 mL	D.E	2000 mL	D.E	3600 mL	D.E
(1suelo: 1compost: 1fibra de la hoja de palmera)	25.26	8.33	22.31c	5.32	16.06d	3.36
(1.5suelo: 1compost: 1raquis de maíz)	21.95	6.85	13.55a	5.53	10.26a	2.74

Tratamiento	Drenaje %					
	1200 mL	D.E	2000 mL	D.E	3600 mL	D.E
(0.5suelo: 0.5compost: 1.5raquis de maíz)	22.87	8.63	16.97b	4.41	13.32c	3.85
(1suelo: 1compost: 1raquis de maíz)	25.04	9.39	17.85b	6.5	10.90b	4.54
p	0.2304		<0.0001		<0.0001	

*Nota.* <sup>abc</sup> Valores en la misma columna con letra distinta difieren entre sí, D.E: Deviación estándar, p: probabilidad.

## pH

De acuerdo con el cuadro 7, el pH observado en los tratamientos evaluados para la variedad de tomate pera tipo saladette variedad Pony Express demostró variabilidad significativa, con valores entre 6.4 y 6.6, indicando que las condiciones del medio van desde acidez leve a neutra, adecuadas para la absorción de nutrientes esenciales. En sistemas de cultivo en sustrato, mantener un pH entre 5.5 y 6.5 es fundamental para asegurar la máxima disponibilidad y solubilidad de macro y micronutrientes. La ligera fluctuación de pH durante el desarrollo fenológico puede explicarse por un equilibrio dinámico entre el consumo de nutrientes, procesos de lixiviación y cambios en el microbiota del sustrato, como lo menciona (Montenegro et al., 2014).

Comparando con los resultados obtenidos por Villavicencio (2005), quien menciona que el pH del agua drenada de los sustratos que evaluó en tomate fue de 5 y 6, coincidiendo con la tendencia de estabilización que se presenta conforme el cultivo avanza. Además, estudios en invernaderos con sistemas semi hidropónicos, como los realizados por (Guzmán, 2017; Vásquez, 2009) indican que la adecuada aireación y retención hídrica del sustrato, junto con un manejo preciso del riego y fertilización, permiten mantener el pH estable alrededor de 6 a 6.5.

Esto contrasta con los valores más variados en campo abierto, donde Márquez et al. (2007), observaron un pH promedio de 6.9, influenciado por factores ambientales externos que impactan la química del suelo y su microbiota. Es decir que el control ambiental y manejo agronómico en invernaderos con el uso de sustratos proporcionan condiciones más homogéneas y favorables para la nutrición balanceada y rendimiento del tomate Pony Express manteniendo rangos de pH adecuados.

La diferencia estadística indicadas por los valores p (<0.0001) y los errores estándar (0.14-0.22), sugieren en que la composición del sustrato y su interacción con el agua de riego desempeñan

un papel crucial. Por ejemplo, el tratamiento Suelo-Compost-Raquis de maíz Molido (S 0.5:C0.5:R1.5) (pH 6.4) con proporción de raquis molido más alto presenta un pH más bajo, posiblemente debido a una mayor contribución de este ingrediente que tiene a acidificar ligeramente el medio. En contraste, el tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1) (pH 6.66), muestra un pH más alto lo que podría deberse a una mayor actividad microbiana del compost en el medio.

El tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) (pH 6.42) y el tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1) (pH 6.47) reflejan variaciones que podrían estar relacionadas con la diferente composición orgánica y su interacción con la humedad y aireación.

Los resultados de laboratorio que se muestran en el anexo A refuerzan que las propiedades físicas de los sustratos influyen en la dinámica del pH. Sánchez (2023), sostiene que la aireación excesiva en sustratos orgánicos podría reducir la retención de humedad crítica para la actividad microbiana que afecta al pH.

### Cuadro 7

*pH del drenaje aforado de cada tratamiento en plantas de tomate (Solanum lycopersicum L.) var.*

*Pony Express en un invernadero de baja tecnología, Unidad de Olericultura Intensiva, Universidad Zamorano.*

Tratamiento	pH	D.E
(1suelo: 1compost: 1fibra de la hoja de palmera)	6.66c	0.22
(1.5suelo: 1compost: 1raquis de maíz)	6.42ab	0.14
(0.5suelo: 0.5compost: 1.5raquis de maíz)	6.4a	0.15
(1suelo: 1compost: 1raquis de maíz)	6.47b	0.2
P	<0.0001	

*Nota.* <sup>abc</sup> Valores en la misma columna con letra distinta difieren entre sí, D.E: Deviación estándar, p: probabilidad.

### Conductividad Eléctrica (mS/cm)

La conductividad eléctrica es una variable clave para evaluar la salinidad y concentración de nutrientes en el sustrato o solución nutritiva en cultivos protegidos de tomate. Valores óptimos de EC son críticos para maximizar la absorción de nutrientes y evitar estrés por salinidad que puede limitar el crecimiento vegetal. En cultivos de tomate en invernadero bajo sistemas semi hidropónicos, se ha

reportado que mantener una EC en un rango de 1.5 a 3.5 mS/cm favorece una adecuada disponibilidad y absorción nutricional (Magán, 2005).

De acuerdo con el cuadro 8, los tratamientos evaluados, con valores de EC entre 2.64 y 2.90 mS/cm, se encuentran dentro del rango considerado para el cultivo en sistema semi hidropónico. Esto está relacionado a lo mencionado por Colimba (2022), quien encontró que EC óptima para el tomate en invernadero es de 1.26 a 2.50 mS/cm para expresar el máximo potencial productivo, lo que coincide con los valores obtenidos. Zamora (2016) indica que en la etapa de maduración deben estar entre 1.5 mS/cm y 2.9 mS/cm es adecuado y que por encima de 4.7 mS/cm puede iniciar estrés por salinidad. Esta ligera variabilidad en EC se da por la composición y manejo nutricional del sustrato, incluyendo frecuencia de riego y el aporte del fertilizante.

Zeledon (2004), destaca que el control del pH y la conductividad eléctrica en solución nutritiva para el cultivo de tomate es fundamental evitar daños por salinidad y mantener crecimiento óptimo, Bravo y Torres (2013), indican que la correcta regulación de EC permite un desarrollo radicular y un rendimiento máximo en cultivos protegidos.

En condiciones similares, Vásquez (2009) en un sistema semi-hidropónico reporta mejoras en la producción vinculadas al manejo adecuado de la solución nutritiva y control constante de EC, evitando el estrés osmótico. Estudios como los de (Navarro et al., 2012; Sánchez, 2023) demuestran que la regulación de EC en solución nutritiva, en conjunto con variables ambientales se vinculan directamente al crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo.

### **Cuadro 8**

*Conductividad eléctrica(mS/cm) del drenaje aforado por tratamiento plantas de tomate (Solanum lycopersicum L.) var. Pony Express en un invernadero de baja tecnología, Unidad de Olericultura Intensiva, Universidad Zamorano.*

Tratamiento	EC (mS/cm)	D.E
(1suelo: 1compost: 1fibra de la hoja de palmera)	2.90c	0.85
(1.5suelo: 1compost: 1raquis de maíz)	2.64a	0.73
(0.5suelo: 0.5compost: 1.5raquis de maíz)	2.75ab	0.79

Tratamiento	EC (mS/cm)	D.E
(1suelo: 1compost: 1raquis de maíz)	2.86bc	0.87
P	<0.0001	

*Nota.* <sup>abc</sup> Valores en la misma columna con letra distinta difieren entre sí, D.E: Deviación estándar, p: probabilidad. EC: Conductividad eléctrica.

### Longitud Radicular

Los resultados obtenidos por la prueba estadística ANDEVA en el cuadro 9, mostraron diferencias significativas en la longitud del sistema radicular de las plantas entre los tratamientos evaluados, destacándose los tratamientos Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) y Tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1) como superiores en longitud radicular. Esta variabilidad puede explicarse desde las características fisicoquímicas de los sustratos utilizados en el experimento.

En el tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1), donde se sustituyó raquis por fibra de las hojas de palmera, la alta porosidad y buena aireación favorecen a la oxigenación radicular y el mantenimiento hídrico, creando un ambiente adecuado para el crecimiento efectivo de raíces. Esto coincide con lo mencionado por Martínez et al. (2017), quienes señalan que sustratos con estas mismas características pueden ayudar a la mejora del sistema radicular. Ramírez (2016), menciona que la raíz principal puede alcanzar de 40-55 cm durante etapas tempranas del cultivo y resalta la influencia directa de la calidad del sustrato y manejo hídrico en el crecimiento radicular. Estos valores concuerdan con las longitudes obtenidas en tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) y tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1) 53.75 y 48.83 cm.

En cambio, el sustrato Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) con un promedio de 53.75 cm de longitud con mayor proporción de suelo y compost, mostró retención de humedad más adecuada y una alta aireación, que favorecen al intercambio gaseoso y para la prevención de condiciones anaeróbicas que pueden limitar el crecimiento radicular. D. Ortega et al. (2016), resaltan que la calidad del sustrato, en cuanto a su capacidad para retener humedad y airear simultáneamente, es un factor determinante para la productividad y vigor del sistema radicular en el cultivo de tomate.

Controlando de manera rigurosa las variables como pH, conductividad eléctrica y propiedades física, conducirá a una mayor uniformidad y longitud radicular.

Lo resultados del tratamiento coinciden con lo mencionado por Pineda (2024), que en sustratos bajo invernaderos con buena retención hídrica y aireación adecuada las longitudes radiculares en promedio son superiores a 50 cm similar a lo observados en el tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1).

Los sustratos Suelo-Compost-Raquis de maíz Molido (S 0.5:C0.5:R1.5) y Suelo-Compost-Raquis molido (S1:C1:R1), que presentaron longitudes inferiores de 36.42 y 31.92 cm, se debió a que son medios con menor porosidad y retención hídrica baja limitando la aireación y el intercambio gaseoso radicular. Esto afecta la respiración de las raíces y su desarrollo, como lo menciona Caballero et al. (2020), quienes señalan que sustratos con porosidad reducida y pobre aireación disminuyen significativamente la longitud radicular. Es decir, la diferencia en la longitud del sistema radicular observada entre tratamientos se explica por las características del sustrato y el manejo integral del medio radicular que se logra en los sistemas protegidos.

### Cuadro 9

*Efecto del sustrato en la longitud radicular(cm) de las plantas de tomate (Solanum lycopersicum L.) var. Pony Express en un invernadero de baja tecnología, Unidad de Olericultura Intensiva, Universidad Zamorano.*

Tratamiento	Longitud (cm)
(1suelo: 1compost: 1fibra de la hoja de palmera)	53.75a
(1.5suelo: 1compost: 1raquis de maíz)	48.83a
(0.5suelo: 0.5compost: 1.5raquis de maíz)	36.42b
(1suelo: 1compost: 1raquis de maíz)	31.92b
P	<0.0001
CV	5.8

*Nota.* <sup>abc</sup> Valores en la misma columna con letra distinta difieren entre sí, D.E: Deviación estándar.. p: probabilidad, CV: Coeficiente de variación.

### **Peso Radicular**

El cuadro 10 muestra que el tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) presentó mayor peso radicular con 77.08 g, significativamente superior al tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1) (60.42 g), tratamiento Suelo-Compost-Raquis de maíz Molido (S 0.5:C0.5:R1.5) (48.33 g) y el testigo Suelo-Compost-Raquis molido (S1:C1:R1) con (40.42 g). La diferencia significativa refleja que el tipo y composición del sustrato tiene un impacto directo con el desarrollo radicular. Estos resultados coinciden con Magallanes (2022), quien observó pesos radiculares de hasta 75 g en el cultivo de tomate bajo invernadero con sustratos de alta aireación y retención hídrica, similares a los valores de tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1).

Ramírez (2016), también reportó un peso radicular promedio de 50 y 70 g en cultivos protegidos con sustratos optimizados, estableciendo una relación positiva entre peso y longitud radicular, señalando que raíces más largas permiten mayor absorción y almacenamiento de biomasa.

En cuanto a la relación peso y longitud radicular, M. Hernández et al. (2018), demostraron que a mayor peso radicular correlaciona significativamente con longitudes superiores a 50 cm, lo que coincide con los valores de longitud y peso de este estudio para tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) y tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1). Según Saravia (2004), esta relación es crucial para optimizar la absorción de nutrientes y agua, mejorando el rendimiento vegetativo y productivo.

D. Ortega et al. (2016), concluyeron que un manejo adecuado del sustrato que mantiene condiciones de humedad y aireación adecuadas disminuyen el estrés hídrico y mejora el desarrollo radicular, incrementando tanto como el peso como longitud. Esto refuerza lo obtenido por los datos, que las raíces pesadas y largas de tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) y tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1) se deben a un ambiente radicular ideal generado por dichos sustratos.

Flores et al. (2017), en su investigación obtuvieron resultados similares al de nuestro experimento con pesos radiculares entre 50 a 90 g, lo cual destaca que el peso es un indicador claro de equilibrio hídrico y de oxigenación en el sustrato. Argumenta que en un ambiente del medio con adecuada humedad y aireación como las del tratamiento Suelo-Compost-Raquis de Maíz Molido (S1.5:C1:R1) y tratamiento Suelo-Compost-Fibra de la Hoja de Palmera (S1:C1:F1) favorecen a un sistema radicular pesado y vigoroso, mientras que condiciones limitantes como las del testigo Suelo-Compost-Raquis molido (S1:C1:R1), restringen esta capacidad, afectando negativamente el desarrollo radicular y, en consecuencia, la producción.

### **Cuadro 10**

*Efecto del sustrato en el peso radicular(g) de las plantas de tomate (Solanum lycopersicum L.) var.*

*Pony Express en un invernadero de baja tecnología, Unidad de Olericultura Intensiva, Universidad*

*Zamorano.*

Tratamiento	Peso(g)	D.E
(1suelo: 1compost: 1fibra de la hoja de palmera)	77.08c	29.27
(1.5suelo: 1compost: 1raquis de maíz)	60.42bc	22.71
(0.5suelo: 0.5compost: 1.5raquis de maíz)	48.33ab	15.57
(1suelo: 1compost: 1raquis de maíz)	40.42a	8.11
p	0.001	

*Nota.* <sup>abc</sup> Valores en la misma columna con letra distinta difieren entre sí, *D.E:* *Desviación estándar.* *p:* *probabilidad,* *CV:* *Coefficiente de variación.*

### Conclusiones

Dos de tres tratamientos (suelo-compost-raquis proporción 1.5:1:1 y suelo-compost-fibra de hojas de palmera proporción 1:1:1), tienen mejor desempeño en comparación al testigo usado en la unidad de O. intensiva, mostrando mejores características fenotípicas del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) var. Pony Express.

El tratamiento suelo-compost-raquis proporción 1.5:1:1 evidencia una fisiología vegetal superior al optimizar la retención de humedad y el equilibrio en el drenaje. Esta eficiencia genera un impacto positivo en la reducción del uso de recursos hídricos, promoviendo un manejo agrícola sostenible que minimiza el estrés ambiental, ideal para regiones con limitaciones en el acceso al agua.

El tratamiento suelo-compost-fibra de hojas de palmera proporción 1:1:1 demuestra una mayor capacidad para potenciar la oxigenación radicular, lo que resulta en un cultivo más resiliente con un crecimiento vegetativo acelerado y un sistema radicular extenso. Esta configuración no solo optimiza la absorción de nutrientes en condiciones protegidas, sino que también contribuye a una mayor tolerancia a variaciones ambientales.

### Recomendaciones

Se recomienda implementar los sustratos con mejor desempeño (suelo-compost-raquis de maíz molido (S1.5:C1:R1) y suelo-compost-fibra de la hoja de palmera (S1:C1:F1)), en las unidades de producción para cuantificar los rendimientos a través del ciclo completo productivo, de la misma forma llevar los sustratos a variedades de crecimiento determinado e indeterminado.

Medir otras variables productivas como el peso total de frutos por planta y el número de cosechas para confirmar las tendencias observadas en los sustratos prometedores.

Analizar la relación carbono-nitrógeno del raquis de maíz molido y la fibra de hojas de palmera, ya que una alta proporción de carbono podría inmovilizar nitrógeno, limitando el desarrollo del tomate.

Realizar un análisis detallado del compost y el suelo en los sustratos, incluyendo su composición nutricional. Esto permitirá identificar variaciones en la calidad del compost y el suelo, optimizando su uso en futuros experimentos y asegurando consistencia en sistemas semi-hidropónicos.

Probar diferentes tamaños de las partículas de raquis molido de maíz y fibra de la hoja de palmera (*Roystonea regia* O.) utilizados en los sustratos (suelo, compost, raquis molido y fibra de palma) en ensayos futuros, variando las relaciones más allá de las evaluadas en este estudio.

Incorporar un análisis económico y de sostenibilidad para comparar los sustratos, calculando costos de producción.

## Referencias

- Adams, P. y Ho, L. (1993). Effects of environment on the uptake and distribution of calcium in tomato and on the incidence of blossom-end rot. *Plant and Soil*, 154(1), 583–588. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-2496-8\\_90](https://doi.org/10.1007/978-94-017-2496-8_90)
- Aydi, S., Sassi Aydi, S., Marsit, A., El Abed, N., Rahmani, R., Bouajila, J., Merah, O. y Abdelly, C. (2023). Optimizing Alternative Substrate for Tomato Production in Arid Zone: Lesson from Growth, Water Relations, Chlorophyll Fluorescence, and Photosynthesis. *Plants*, 12(7), 1457. <https://doi.org/10.3390/plants12071457>
- Bravo, A. y Torres, R. (2013). *Efecto de la maceta y bolsa con fibra de coco en la producción de tomate (Lycopersicum esculentum) variedad 7513 en hidroponía bajo invernadero* [Proyecto Especial de Graduación, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras]. [bdigital.zamorano.edu](https://bdigital.zamorano.edu). <https://bdigital.zamorano.edu/items/ed29ac89-82b7-4bd1-b8da-921540a865c1>
- Caballero, J., Ovando, S., Núñez, E. y Aguilar, F. (2020). Sustratos alternativos para la producción de plántulas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) en Chiapas. *Siembra*, 7(2), 14–21. <https://doi.org/10.29166/siembra.v7i2.1916>
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. (1995). *Manejo de los ensayos e informe de los datos para el Programa de Ensayos Internacionales de Maíz del CIMMYT*. CIMMYT. <https://repository.cimmyt.org/entities/publication/0f668808-af67-420a-b321-4db7869c5b4f/full>
- Chowdhury, M., Espinoza-Ayala, A., Samarakoon, U., Altland, J. y Yang, T. (2024). Substrate Comparison for Tomato Propagation under Different Fertigation Protocols. *Agriculture*, 14(3), 382. <https://doi.org/10.3390/agriculture14030382>
- Colimba, J. (2022). *Eficiencia en el uso del agua en el cultivo de Tomate bajo invernadero en Natabuela, Ecuador* [Tesis Doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Dyśko, J., Kaniszewski, S. y Kowalczyk, W. (2008). The effect of nutrient solution PH on phosphorus availability in soilless culture of tomato. *Journal of Elementology*, 13(2), 189–198. [https://www.researchgate.net/publication/286886438\\_The\\_effect\\_of\\_nutrient\\_solution\\_P H\\_on\\_phosphorus\\_availability\\_in\\_soilless\\_culture\\_of\\_tomato](https://www.researchgate.net/publication/286886438_The_effect_of_nutrient_solution_PH_on_phosphorus_availability_in_soilless_culture_of_tomato)
- Flores, J., Murillo, Y., Oporta, R., Flores Pacheco, C. y Alemán, Y. (2017). Producción hidropónica de tomate (*Solanum lycopersicum*) y chiltoma (*Capsicum annuum*) con sustratos inertes. *Revista Científica De FAREM-Estelí*(20), 73–81. <https://doi.org/10.5377/farem.v0i20.3069>
- Gomis, M. P., Pérez-Murcia, M., Barber, X., Martínez-Sabater, E., Moral, R. y Bustamante, M. (2022). Development and Validation of Alternative Palm-Derived Substrates for Seedling Production. *Agronomy*, 12(6), 1377. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061377>

- Guzmán, J. (2017). *Evaluación de sustratos en el comportamiento agronómico y rendimiento de tomate (Solanum lycopersicum L.) en condiciones de invernadero* [Tesis de Pregrado, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México]. repositorio.uaaan.mx. <https://repositorio.uaaan.mx/xmlui/handle/123456789/42884>
- Hernández, J. y Umazor, M. (2022). *Producción y calidad poscosecha de híbridos de tomate Saladette en campo abierto de Zamorano* [Proyecto Especial de Graduación, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras]. bdigital.zamorano.edu. <https://bdigital.zamorano.edu/items/320b6f18-4a5f-4c94-b208-91353439f55c>
- Hernández, M., Ponce, M., Álvarez, S. y Armas, M. (2018). Profundidad, peso y volumen del sistema radical del tomate (*Solanum lycopersicon*) cv. Pedro en condiciones de invernadero. *Agrisost*, 24(2), 124–129. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10402469>
- López, L., Pérez, J. y Romero, R. (2016). *Automatización de invernadero para cultivos hidropónicos en El Salvador* [Tesis]. Escuela Especializada En Ingeniería, El Salvador. <https://core.ac.uk/download/80296586.pdf>
- Magallanes, M. (2022). *Evaluación productiva del cultivo de tomate (solanum lycopersicum l.) en dos sustratos sólidos bajo un sistema hidropónico nft* [Tesis]. Ecuador <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/MAGALLANES%20MAGALLANES%20MIGUEL%20ANGEL.pdf>
- Magán, J. (2005). *Respuestas a la salinidad del tomate larga vida en cultivo sin suelo recirculante en el sureste español* [Tesis, Universidad de Almería, España]. dialnet.unirioja.es. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=222693>
- Márquez, C., Cano, P. y Rodríguez, N. (2007). Uso de sustratos orgánicos para la producción de tomate en invernadero. *Agric. Téc. Méx*, 34, Artículo 1. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0568-25172008000100008](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172008000100008)
- Martínez, O., Can, Á., Cruz, E. y García, J. (2017). Influencia del riego y sustrato en el rendimiento y calidad de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(1), 53–65. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i1.71>
- Monge, A. (2007). *Evaluación del crecimiento y desarrollo de plántulas de tomate (Lycopersicon esculentum) Mill y Chile dulce (Capsicum annuum) Linn, mediante la utilización de seis sustratos y tres métodos de fertilización en el cantón de San Carlos, Costa Rica* [Tesis, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica]. repositoriotec.tec.ac.cr. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/5871>
- Montenegro, G., Úbeda, D. y Zeas, S. (2014). *Efecto del manejo agronómico sobre el rendimiento productivo en dos variedades de Solanum lycopersicum mill* [Tesis]. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León, Nicaragua. <http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/handle/123456789/3265>

- Navarro, E., Nieto, R., Corrales, J., Del García, M. y Ramírez, A. (2012). Calidad poscosecha en frutos de tomate hidropónico producidos con agua residual y de pozo. *Rev. Chapingo*, 18, 263–277. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1027-152X2012000300001](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2012000300001)
- Nemet, F., Perić, K. y Lončarić, Z. (2021). Microbiological activities in the composting process : A review. *COLUMELLA – Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 8(2), 41–53. <https://doi.org/10.18380/SZIE.COLUM.2021.8.2.41>
- Olubanjo, O. y Alade, A. (2018). Growth and Yield Response of Tomato Plants Grown Under Different Substrates Culture. *Journal of Sustainable Technology*, 9(2), 110–123. [https://www.researchgate.net/publication/330729395\\_Growth\\_and\\_Yield\\_Response\\_of\\_Tomato\\_Plants\\_Grown\\_Under\\_Different\\_Substrates\\_Culture](https://www.researchgate.net/publication/330729395_Growth_and_Yield_Response_of_Tomato_Plants_Grown_Under_Different_Substrates_Culture)
- Ortega, D., Martínez, C., Ocampo, J., Sandoval, E. y Pérez, B. (2016). Eficiencia de sustratos en el sistema hidropónico y de suelo para la producción de tomate en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(3), 643–653. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342016000300643&script=sci\\_arttext\\_plus](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342016000300643&script=sci_arttext_plus)
- Ortega, L., Olarte, J., Ruiz, R. y Mendoza, J. (2010). Efecto de diferentes sustratos en el crecimiento de plántulas de tomate (*lycopersicum esculentum mill*). *Ra Ximhai*, 6(3), 365–372. <https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=46116015005>
- Pineda, L. (2024). *Determinar la mezcla optima de vermicompost en la producción de plántula de melón (cucumis melo l.) en diferentes genotipos* [Tesis, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México]. [repositorio.uaaan.mx. http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/50041](http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/50041)
- Qaryouti, M., Osman, M., Alharbi, A., Voogt, W. y Abdelaziz, M. (2023). Using Date Palm Waste as an Alternative for Rockwool: Sweet Pepper Performance under Both Soilless Culture Substrates. *Plants*, 13(1), 44. <https://doi.org/10.3390/plants13010044>
- Ramírez, M. (2016). *Variabilidad natural de caracteres morfológicos y fisiológicos de la raíz de tomate: implicaciones en la mejora de la eficiencia del uso del agua* [Tesis doctoral, Universidad de Málaga, España]. [riuma.uma.es. https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/13819](https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/13819)
- Sánchez, M. (2023). *Interacción entre el déficit de presión de vapor y la conductividad eléctrica de la solución nutritiva en la fisiología, rendimiento y calidad de tomate de invernadero* [Tesis, Universidad Autónoma Chapingo, México]. [repositorio.chapingo.edu.mx. https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/0a0f6a34-666c-41fe-96da-f5ee6a843fd9](https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/0a0f6a34-666c-41fe-96da-f5ee6a843fd9)
- Saravia, F. (2004). *Elaboración de curvas de absorción de nutrientes para la variedad de tomate (Lycopersicon esculentum Mill) Alboran bajo condiciones de invernadero en Zamorano, Honduras* [Proyecto Especial de Graduación, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras]. [bdigital.zamorano.edu. https://bdigital.zamorano.edu/items/c6ed2539-1015-4031-af92-819520de63f9](https://bdigital.zamorano.edu/items/c6ed2539-1015-4031-af92-819520de63f9)

- Savvas, D. y Gruda, N. (2018). Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry – A review. *European Journal of Horticultural Science*, 83(5), Artículo 2, 280–293. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.2>
- Secretaría de agricultura y Ganadería. (2020). *Tomate: Análisis de Coyuntura*. Secretaría de agricultura y Ganadería. <https://www.ueg.sag.gob.hn/wp-content/uploads/2022/03/AC-TOMATE-V20.4.pdf>
- Sokal, R. y Rohlf, F. (1995). *Biometry: The principles and practice of statistics in biological research* (3rd ed.). W.H. Freeman.
- Solis, A. y Tobar, A. (2023). *Efecto de un esquema combinado de incorporación de enmiendas orgánicas y fertilización convencional en la microbiota del suelo y el rendimiento del tomate (Solanum lycopersicum var. Pony express)* [Proyecto Especial de Graduación, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras]. [bdigital.zamorano.edu](https://bdigital.zamorano.edu). <https://bdigital.zamorano.edu/items/40e53f70-7abf-4a0b-95df-32ce166a7930>
- Vásquez, F. (2009). *Evaluación del Consumo de Agua del Cultivo de Tomate (Lycopersicon esculentum Mill.) con el Método del Balance Hídrico y su Relación con el Rendimiento, en un Sistema Semi-Hidropónico* [Tesis, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México]. [repositorio.uaaan.mx](https://repositorio.uaaan.mx). <https://repositorio.uaaan.mx/xmlui/handle/123456789/5591>
- Villavicencio, C. (2005). *Comparación de tres programas de nutrición en tomate (Lycopersicon esculentum) bajo invernadero en Zamorano, Honduras* [Proyecto Especial de Graduación, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras]. [bdigital.zamorano.edu](https://bdigital.zamorano.edu). <https://bdigital.zamorano.edu/items/be065e9b-b434-4411-a71b-d0e7a9da9873>
- Vizcarra, S. (2018). *Producción semihidropónica de Lechuga Lactuca sativa L var. Starfighter bajo cubierta Plástica en la Unidad Agronómica del Centro de Investigaciones Biológicas y Acuícolas de Cuemanco (CIBAC)* [Tesis de pregrado]. Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, México. <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/bitstream/123456789/25087/1/cbs1972416.pdf>
- Wang, Y., Zhang, X., Du, X., Zhang, Z. y He, Z. (2024). Effects of different straw breeding substrates on the growth of tomato seedlings and transcriptome analysis. *Scientific Reports*, 14(1), 22181. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73135-y>
- Zabed, H., Akter, S., Yun, J., Zhang, G., Zhao, M., Mofijur, M., Awasthi, M., Kalam, M., Ragauskas, A. y Qi, X. (2023). Towards the sustainable conversion of corn stover into bioenergy and bioproducts through biochemical route: Technical, economic and strategic perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 400(2), 136–150. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136699>
- Zamora, E. (2016). *El cultivo de tomate (Lycopersicon esculentum L. Mill) bajo cubiertas plásticas* [Revisió Literaria]. Universidad de Sonora, México.

[https://dagus.unison.mx/Zamora/3.%20EL%20CULTIVO%20DE%20TOMATE%20\(Lycopersicon%20esculentum%20L.%20Mill\)%20BAJO%20CUBIERTAS%20PLASTICAS.pdf](https://dagus.unison.mx/Zamora/3.%20EL%20CULTIVO%20DE%20TOMATE%20(Lycopersicon%20esculentum%20L.%20Mill)%20BAJO%20CUBIERTAS%20PLASTICAS.pdf)

Zar, J. (2010). *Biostatistical Analysis* (5th ed). Pearson.  
<https://lib.zu.edu.pk/ebookdata/Biostatistics/Biostatistical%20Analysis-by%20Jerrold%20H%20Zar.pdf>

Zeledon, S. (2004). *Evaluación del manejo de nutrientes y agua para el cultivo de tomate (Lycopersicon esculentum Mill) bajo condiciones de macrotúnel en Zamorano, Honduras* [Proyecto Especial de Graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.  
<https://bdigital.zamorano.edu/items/4cb3ba86-fcd5-4660-87f1-36e1bbfd9d93>

## Anexos

### Anexo A

*Análisis de pH realizado para cada sustrato en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Zamorano,*

*Honduras, 2025.*



ESCUELA AGRÍCOLA PANAMERICANA			
LABORATORIO DE SUELOS ZAMORANO			
LSZ-MC-F31 INFORME DE RESULTADOS	ANÁLISIS DE SUELOS	Versión	3

Sistema de Gestión de Calidad ISO/IEC 17025

Solicitante	Fecha Ingreso Muestra	Fecha Envío Informe	Procedencia de la muestra	Página		
Ing Orlin Velasquez	2024-05-21	2025-06-03	EAP Zamorano	1 de 1		
Dirección del cliente	N° Lote de Análisis	Cultivo	Informe N°	Anexo Recomendación		
EAP Zamorano	2025-10	-	2025-155	Sí:	No:	x

Código	Identificación de la muestra	pH
Interno Lab.		(H <sub>2</sub> O)
25-S-2971	1.5-1-1 SCR	5.83
25-S-2972	Testigo 1-1-1 RSC	6.16
25-S-2973	3# 1-1-1 SCP	7.45
25-S-2974	5# 1.5-1.5-0.5 CRS	6.29

Métodos: pH: 1:2 en agua

## Anexo B

## Análisis de agua del invernadero.



**LABORATORIO DE SUELOS ZAMORANO**  
**INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE AGUAS**

LSZ-F10708-1

Versión

V02

Sistema de Gestión de Calidad ISO 17025

Cliente	Código Interno Lab.	N° Lote de Análisis
Horticultura	21-AR-2475	2021-14

Dirección Cliente	Fecha ingreso de la muestra	Fecha Envío Informe
EAP, Zamorano	2021-08-16	2021-08-18

Ubicación de la Muestra	Descripción Muestra	N° Informe
Pozo Zona 3, EAP	Pozo	2021-238,2

CATIONES	mg/L	meq-g/L
Calcio	26.82	1.34
Magnesio	3.73	0.31
Potasio	9.93	0.25
Sodio	20.39	0.89

ANIONES	mg/L	meq-g/L
Cloruros	5.81	0.16
Carbonatos	ND	ND
Bicarbonatos	29.28	0.48

Micronutrientes mg/L			
Cu	Fe	Mn	Zn
ND	ND	ND	0.003

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	
pH	6.08, ácido.
C.E.	374.89 $\mu\text{S}/\text{cm}$ . No hay problema de salinización.
SAR	0.977 Sin riesgo de alcalinización.
Normas Riverside, Blasco y de la Rubia	C2 S1 Salinidad media, solo se resentirán los cultivos muy sensibles y puede emplearse con cierta tolerancia en suelos con buen drenaje. Agua con bajo contenido en Sodio, su uso no presenta problemas, solo en algunos frutales muy sensibles.
Fitotoxicidad por cloro.....	No hay problema.
Fitotoxicidad por sodio.....	No hay problemas en riego por aspersión
Dureza (CaCO <sub>3</sub> mg/L)	82.42584, agua moderadamente dura

Métodos: K, Ca, Mg, Na, Cu, Fe, Mn, Zn: Determinados por Absorción atómica. CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>: Volumetría, Cl<sup>-</sup>: Volumetría con AgNO<sub>3</sub>. Dureza: Espectrometría de Absorción Atómica.

**Anexo C**

*Preparación de los sustratos.*



**Anexo D**

*Pasteurización de los sustratos.*



**Anexo E**

*Recipiente utilizado para la recolección del agua drenada.*



**Anexo F**

*Toma de datos de pH y conductividad eléctrica.*



**Anexo G**

*Tomas de datos de altura y grosor de tallo.*



**Anexo H**

*Medición de peso y longitud del sistema radicular.*

