

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA



Influencia del Aporte Nutricional Sobre el Rendimiento y
Calidad del Fruto de Tomate

Por:

JOSÉ JAZIEL OVILLA MORENO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

Saltillo, Coahuila, México
Junio, 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA

Influencia del Aporte Nutricional Sobre el Rendimiento
y Calidad del Fruto de Tomate

Por

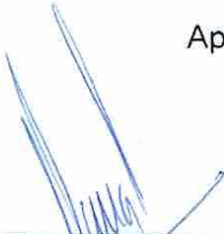
JOSE JAZIEL OVILLA MORENO

TESIS


Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA

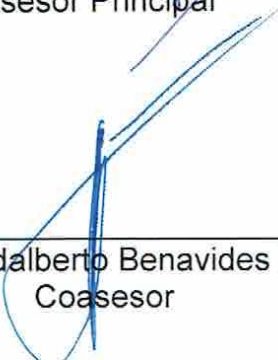
Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Asesor Principal




M.C. Felicito Ausencio Díaz Vázquez
Asesor Principal Externo



Dr. Adalberto Benavides Mendoza
Coasesor



Ing. Gerardo Rodriguez Galindo
Coasesor



Dr. Jerónimo Landeros Flores
Coordinador Interino de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México
Junio, 2023

Declaración de no plagio

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes.

Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante



José Jaziel Ovilla Moreno

AGRADECIMIENTOS

A Dios: Le agradezco primeramente a Dios, por brindarme hasta ahora una vida llena de bendiciones, él ha estado presente y en él me he refugiado en situaciones delicadas. Ha sido mi fortaleza y alivio, me ha demostrado estar presente cuando más lo necesite, así también por brindarme la sabiduría para confrontar las situaciones difíciles.

A mi Alma Mater: A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro que me cobijó durante mi etapa de estudiante, brindándome los servicios y una educación destacable y de prestigio, por darme la dicha de ser un buitre y sentir el orgullo de pertenecer a esta familia.

A mis asesores: Gracias por brindarme su apoyo, formar parte y lograr que la meta se cumpla, en especial al M.C. Felicito Díaz, que ha demostrado ser un gran apoyo durante el proceso de la elaboración de este trabajo de investigación. También por compartirme sus conocimientos. Así como el Dr. Alberto Sandoval Rangel, por apoyo que ha brindado como tutor.

A mi familia: Mi madre que ha sido un claro ejemplo de superación, que sola con valentía ha logrado sacar adelante a una familia de siete hermanos, con destreza ha sabido superar las pruebas. Le agradezco sus consejos y educación que me ha brindado. A todos mis hermanos que me brindaron su apoyo y me sostuvieron durante toda mi carrera, en especial mi hermana Kelly, Bivi y Liliana.

A mis profesores: Considero necesario mencionar a mis profesores antiguos, quienes estuvieron durante los inicios de mi formación, sentaron las bases con sus consejos y clases. En especial, a profesor Edilberto Torrez Hernández, Gilberto Ovando López y Romeo Velázquez Valencia.

A los del Pino: Grandes compañeros que mostraron ser buenos amigos, me llevo conmigo varias experiencias y su cariño. en especial a Salma Martínez, Magaly Campa, Gris Ducoing, Clarisa Sandoval y todos los que nos juntábamos debajo del famoso pino.

A mis compañeros: A mis compañeros de carrera que fueron pilares durante el inicio de la carrera, brindaron de su cariño y tiempo, creando buenos recuerdos y convivios que se llevaran por un tiempo en nuestros corazones. En especial a Robert Infañón, Mario Jerónimo, Jovani Ramírez, Karen López, Fernando Vázquez, Benjamín Jiménez y el resto del grupo de horticultura.

Al equipo charro de la Narro: A todo el equipo charro actuales y exa Narro que compartí lienzo y cajones en este bello deporte, gracias por los buenos ratos, experiencias y convivencias que me llevo. La Narro nos permitió conocernos, pero fue el lienzo que nos hizo crecer una hermandad. En especial a Raúl Valdez, Alonso Reyes, Diego López, Carlos López, Carlos Méndez, Carlos Valdez, Juan Jerónimo, Christian Michaca, Antonio López y Roberto Pérez.

DEDICATORIAS

Para mi madre, *Lilia Moreno Aquino,*

Con cariño este logro va en recompensa por todas sus oraciones, palabras de apoyo y sacrificio que ha dado en el transcurso de esta etapa, usted que se ha sacrificado y dado un gran ejemplo para mí y mis hermanos en todos estos años. Pensar en todo lo que ha pasado como madre y mujer, la admiro con todo mi corazón, no me queda más que agradecerle eternamente y pagar tanto sacrificio de su persona. Este logro es de nosotros, madre mía.

Para mis abuelos, *Blas Moreno Solís y Dolores Aquino Muñoz,*

Mi abuelo me brindó el cariño hacia el campo, me mostró a través de su dedicación y trabajo, la belleza que conlleva el esfuerzo de ser un campesino agricultor. Usted que prometió estar durante este logro, pero Dios lo llamó a su presencia, viven en nuestra memoria su alegría y todo lo que nos brindó, gracias Don Blas, orgulloso siempre de ser su nieto. A mi abuela, con la cual tuve poca convivencia en mi infancia, quiero agradecerle sus relatos, sus enseñanzas siguen en sus hijos, gracias por brindarme una gran madre, por su esencia, cariño y amabilidad.

A mis tíos, *Antonio de Jesús Reyes Cajas y María Elizabeth Revolorio Gálvez,*

Me han brindado un lugar en su familia adoptándome con el mismo cariño y aprecio. Ustedes que me han apoyado, brindado consejos y enseñanzas que me han ayudado mucho a crecer como persona. Usted Tío Toño, me enseñó las bases de la agricultura y la ganadería, me permitió compartir experiencias del campo, trabajar hombro a hombro la tierra y sobre todo creer en mis sueños, me ha brindado palabras de aliento y fe en las metas que tengo a futuro, compartimos el mismo pensar de vivir para servir y brindarle algo a la comunidad y nuestra gente.

Para *Marisol Botello Díaz,*

Dedico este pequeño gran logro a ti que me has brindado todo tu apoyo y cariño, me has conocido mucho más de cerca, más que cualquier otra persona lo puede hacer. Tú me has impulsado a creer en mis metas, teniendo fe que lograré todo lo que me proponga, ayudándome a mejorar como persona y hombre. A ti que estuviste en momentos especiales, hemos compartidos bellos ratos, este logro es tuyo como mío. Dedico mis logros que juntos hemos construidos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIAS	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE CUADROS	vii
RESUMEN	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Hipótesis	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 Importancia agronómica	3
2.3 Producción mundial	3
2.4 Producción nacional	3
2.5 Aspectos generales del cultivo	4
2.5.1 Taxonomía del cultivo	4
2.5.2 Morfología del cultivo	5
2.5.3 Fenología del cultivo	6
2.5.4 Requerimientos edafoclimáticos	7
2.6 Requerimientos nutricionales del cultivo de tomate:	9
2.7 Deficiencias nutrimentales y principales síntomas del cultivo:	10
III. MATERIALES Y MÉTODOS	17
3.1 Ubicación del experimento	17
3.2 Material genético	18
3.3 Diseño Experimental	18
3.4 Variables evaluadas	18
3.5 Análisis estadístico	20
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
4.1 Concentración de iones en solución del suelo	21
4.2 Variables de crecimiento	23
4.3 Variables fisiológicas	24
4.4 Variables de calidad de fruto y rendimiento	26
V. CONCLUSIONES	28
VI. BIBLIOGRAFÍA	29

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Requerimientos nutricionales del cultivo de tomate de acuerdo a diferentes autores.....	9
Cuadro 2. Cuadrados medios del ANOVA ($P \leq 0.05$) para la concentración de iones en solución del suelo, como efecto del manejo nutricional.....	21
Cuadro 3. Medias estadísticas de variables de solución del suelo, de acuerdo con la prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$).....	23
Cuadro 4. Cuadrados medios del ANOVA ($P \leq 0.05$) para variables de crecimiento del tomate, como efecto del manejo nutricional.....	23
Cuadro 5. Medias estadísticas de variables de crecimiento de tomate, como efecto del manejo nutricional (Tukey, $P \leq 0.05$).....	24
Cuadro 6. Cuadrados medios del ANOVA ($P \leq 0.05$) de la Conductancia Estomática en hojas de cultivo de tomate, por efecto del manejo nutricional.....	25
Cuadro 7. Medias estadísticas de la variable Conductancia Estomática medida en hojas de tomate, como efecto del manejo nutricional aplicado (Tukey, $P \leq 0.05$).....	26
Cuadro 8. Cuadrados medios del ANOVA ($P \leq 0.05$) de variables de calidad de fruto y rendimiento, como respuesta del cultivo de tomate al manejo nutricional.....	26
Cuadro 9. Medias estadísticas de variables de calidad de fruto y rendimiento del cultivo de tomate bajo invernadero, como respuesta al manejo nutricional (Tukey, $P \leq 0.05$).....	27

RESUMEN

La demanda alimentaria mundial, con efecto directo sobre aquellos productos agrícolas de mayor consumo como lo es el tomate, genera la necesidad de incrementar el rendimiento del cultivo, en una misma superficie agrícola. Para ello el manejo nutricional es un factor de vital importancia que permite el logro de los objetivos de producción. Por esta razón el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de cuatro tratamientos nutricionales (SN50, SN75, SN100 y SN125) sobre la concentración y disponibilidad de iones en solución del suelo en variables de crecimiento, calidad de fruto y rendimiento del cultivo de tomate. El cultivo fue establecido en suelo, a doble hilera, con manejo por fertirriego y control de plagas y enfermedades de forma convencional. La medición de la concentración de iones, pH y CE en suelo se llevó a cabo empleando electrodos de ion selectivos. Se observó un efecto directo de la disponibilidad de iones en suelo sobre la mayoría de las variables analizadas. El principal efecto se observa sobre el rendimiento por hectárea. De esta manera, el tratamiento SN125 es el que generó los mayores valores sobre las variables analizadas. La medición de la concentración de iones es un indicador de la eficiencia en la fertilización y permite mejorar el manejo nutricional, en algunos casos como en el Ca^{2+} , el uso de monitoreo constante permite reducir el uso de fuentes fertilizantes de este ion, reduciendo el costo de producción, siempre que el suelo contenga buena cantidad del mineral. Se recomienda hacer estudios posteriores donde se compare la nutrición por etapas y la nutrición constante, considerando la parte económica y productiva.

I. INTRODUCCIÓN

El cultivo de tomate ha presentado en los últimos años un comportamiento dinámico relacionado con los incrementos poblacionales y en consecuencia en la demanda alimentaria (SIAP, 2023). A nivel nacional el cultivo de tomate ha incrementado su superficie plantada de 48 000 hectáreas y un consumo *per cápita* de 12.4 kg (SIAP, 2022), la producción nacional asciende a 3 185 507 toneladas (SIAP, 2023) de las cuales 1, 940 000 toneladas fueron exportadas a EUA.

Lo anterior permite observar la importancia económica del cultivo a nivel nacional. Por otro lado, el cultivo de tomate presenta requerimientos nutricionales altos, por lo que el rendimiento del cultivo depende, entre otros factores, del manejo nutricional que le sea aportado (Allende *et al.*, 2017). Del mismo modo, variables de crecimiento y de calidad de fruto son afectadas o mejoradas en función de la calidad del manejo nutricional (Álvarez-Hernández, 2012).

En cultivos establecidos en suelo, es la solución del suelo el medio en el que se pueden encontrar los elementos minerales en formas asimilables para la planta (Strawn *et al.*, 2020a). Por lo tanto el conocimiento de la disponibilidad de iones asimilables, disueltos en este medio, permite conocer el grado de eficiencia de la nutrición aplicada (Canales-Almendares *et al.*, 2021), además, permite modificar la cantidad de minerales aplicados, regular el comportamiento de la planta y establecer valores referenciales de ciertos iones suelo (Hernández *et al.*, 2014).

En la actualidad el manejo eficiente de la fertilización permite la reducción de procesos de salinización o lixiviación de nutrientes, además, permite identificar la dosis óptima de fertilización en esquemas de producción en suelo. Esto puede lograrse siempre que se evalúen diversos esquemas o niveles de aporte nutricional y además, se cuente con herramientas de monitoreo de iones en

solución del suelo. Por tal motivo, se planteó la siguiente investigación que tiene por objetivos, los siguientes:

1.1 Objetivo general

Medir el efecto de la aplicación de diversas dosis de nutrición mineral sobre la disponibilidad de nutrientes, rendimiento y la calidad del fruto de tomate cultivado bajo condiciones protegidas

1.2 Objetivos específicos

- Medir el efecto de las diversas dosis de la solución nutritiva sobre el crecimiento y variables fisiológicas del cultivo.
- Evaluar el efecto de la dosis de nutrición mineral sobre el rendimiento del cultivo.
- Medir el efecto de dosis de la solución nutritiva sobre la calidad del fruto de tomate.

1.3 Hipótesis

La concentración de la solución nutritiva aplicada al suelo mantiene una relación directamente proporcional con el crecimiento, rendimiento y calidad del fruto en cultivo de tomate.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Importancia agronómica

El cultivo de tomate forma parte importante de la dieta mundial y actualmente es un cultivo de crecimiento dinámico. Aunque su origen se ha discutido, se considera a México, además de Perú, como una de las principales regiones donde se cree, el cultivo fue domesticado (Peralta & Spooner, 2007). En la actualidad, una gran variedad de genotipos han sido estudiados, considerando como cualidades de importancia el hábito de crecimiento y rendimiento del genotipo, lo que determina en gran medida la eficiencia de la interacción del genotipo respecto al manejo nutricional (Monge-Pérez & Loría-Coto, 2021).

2.3 Producción mundial

A nivel mundial, México se ubica como el noveno productor de tomate, con un total de 3 324 263 toneladas. Esta posición la mantiene desde 2017, siendo necesario un incremento del 4.2% para poder escalar un lugar. Respecto a la superficie sembrada, la cual asciende a 5 052 000 hectáreas, China lidera este rubro, con cerca del 20% del total mundial. En volumen de exportación, México participó en 2021 con 1 730 000 toneladas, mientras que en 2022 este volumen ascendió a 1 956 130 toneladas, siendo EUA el principal destino de la exportación (SIAP, 2022).

2.4 Producción nacional

De acuerdo con (SIAP, 2020), México aporta el 3% de la producción mundial. El destino de la producción coloca al tomate como el principal cultivo producido en el

país. De esta manera, para el año 2022, México produjo un total de 3 185 507 toneladas (SIAP, 2023)

Debido a que el tomate se cultiva en todo el territorio nacional, en 2022 la superficie sembrada alcanzó un total de 48 179 hectáreas, de esta superficie, se cosecharon 3 185 507 toneladas de fruto en fresco (SIAP, 2023). La producción nacional se concentra en cuatro estados, los cuales participan en el volumen de producción tal y como se detalla a continuación: Sinaloa ocupa el primer lugar nacional, seguido por San Luis Potosí, Michoacán y Baja California Sur con una aportación de 637 134 t, 374 791 t, 274 883 t y 177 049 t respectivamente (SIAP, 2023), en este sentido, Coahuila se ubica en el lugar número quince a nivel nacional con una producción promedio de 75 754 t para el año 2022 (SIAP, 2023).

2.5 Aspectos generales del cultivo

2.5.1 Taxonomía del cultivo

La clasificación taxonómica del tomate ha sido discutida en los últimos años, considerándose en algunos casos como *Lycopersicon esculentum*, mientras que otros investigadores lo consideran bajo la clasificación *Solanum lycopersicum* L. (Escobar & Lee, 2009), siendo esta última la más conocida y aceptada actualmente.

De acuerdo con (ITIS, 2023) la taxonomía del cultivo se detalla como sigue:

Reino.....Plantae

Subreino.....Traqueobionta

SuperdivisionSpermatophyta

División.....Magnoliophyta

Clase..... Magnoliopsida
Subclase..... Asteridae
Orden Solanales
Familia..... *Solaneceae*
Genero..... *Solanum*
Especie..... *S. Lycopersicum*

2.5.2 Morfología del cultivo

La planta de tomate de crecimiento indeterminado presenta elongación del tallo principal, con emisiones alternas de hojas, racimos florales y brotes axilares vegetativos, de forma repetitiva. Dicho crecimiento es dirigido por el punto de crecimiento ubicado en el ápice (Escobar & Lee, 2009), su morfología se detalla a continuación:

Raíz: Corresponde a una raíz pivotante con raíces secundarias en etapa de plántula, sin embargo, el trasplante tiende a dañar la raíz principal, por lo que en etapas posteriores esta se atrofia, observándose un sistema radicular con mayor dominancia de raíces adventicias en los primeros 30 cm de profundidad, aunque el sistema como tal, puede desarrollarse a profundidades de 2 metros (Baudoin, 2017).

Tallo: Presenta de 2-4 cm de diámetro, es pubescente, anguloso y con coloración verdosa, con una visible reducción del diámetro en la parte superior, se considera al tallo como una continuación de la raíz, está conformado por epidermis, corteza, cilindro vascular (xilema) y tejido medular (Escobar & Lee, 2009; López-Marín, 2017).

Hojas: Son hojas compuestas de folíolos con una lámina de 6 a 12 pulgadas de longitud, imparipinnadas, es decir presenta folíolos alternados, terminan en un folíolo impar, presenta de siete a nueve folíolos peciolados, con dimensiones de 4-60 mm x 3-40 mm, lobulados y con borde dentado. Las

hojas pueden estar dispuestas de forma erecta, horizontal o inclinada, están recubiertas de pelos glandulares (Fornaris, 2007; López-Marín, 2017).

Flor: Aparecen organizadas en una cima racimosa, compuesta de 2 a 12 flores perfectas (hermafroditas), estas inflorescencias se presentan en arreglos opuestos entre las hojas. Las flores abren de forma sucesiva, tienen un diámetro de 1.9 cm aproximadamente, su cáliz es verde compuesto por seis sépalos, los pétalos son de color amarillo, generalmente cada flor presenta seis pétalos dispuestos de forma helicoidal. En el centro se encuentran seis estambres con anteras unidas formando un tubo alrededor del pistilo. (Fornaris, 2007; Escobar & Lee, 2009; López-Marín, 2017).

Fruto: La composición del fruto es de 94-95% de agua y 5-6% corresponde a compuestos orgánicos y minerales. Es una baya plurilocular, subesférica, globosa o alargada, con un peso promedio de 600 g. El fruto de tomate está formado por pericarpio, tejido placentario y semillas. En estado inmaduro son de coloración verde claro y en maduración de cosecha presenta pigmentación roja, debido a la presencia de pigmentos carotenoides como el licopeno (Escobar & Lee, 2009; López-Marín, 2017).

Semilla: La semilla del tomate pertenece al grupo de semillas ortodoxas con tolerancia a la deshidratación. Es dicotiledónea, de germinación epigea. Es pequeña con dimensiones de aproximadamente 2 mm de largo por 1 mm de ancho, ligeramente redonda, aplanada. La semilla se compone de embrión, endospermo y testa, esta última presenta en etapas de madurez fisiológica una cubierta mucilaginosa (Baudoin, 2017).

2.5.3 Fenología del cultivo

El desarrollo fenológico del cultivo se puede dividir en desarrollo vegetativo y etapa reproductiva de acuerdo con Escobar & Lee (2009), la primera etapa corresponde al periodo comprendido desde la germinación, emergencia de plántula hasta la

emergencia del primer racimo floral, cuando la planta presenta de 5-10 hojas y una altura de 40 cm.

Por su parte, (López-Marín, 2017), describe una división más específica de las etapas fenológicas, como se detalla a continuación:

Establecimiento de planta joven: Es el periodo de desarrollo de semillero que tiene como objetivo el desarrollo de las primeras partes aéreas y el sistema radicular pre-trasplante de la planta.

Crecimiento vegetativo: Comprende los primeros 45 días desde la siembra en el semillero (etapa de establecimiento), se caracteriza por un desarrollo continuo de la planta. Después de este periodo se observan alrededor de 4 semanas de crecimiento acelerado.

Floración y cuaje del fruto: Se inicia desde el inicio de la floración (20-40 días después del trasplante) hasta que la planta termine su ciclo vital. El cuaje se inicia desde el momento de fecundación de la flor y la posterior formación del fruto.

Desarrollo y maduración del fruto: Una vez después del cuaje, el fruto presenta un crecimiento estable, el cual puede medirse con el tamaño de la fruta y la acumulación de materia seca, hasta alcanzar la madurez fisiológica y de cosecha, momento en el cual el tamaño no incrementa.

2.5.4 Requerimientos edafoclimáticos

Suelo: Dentro de los rangos óptimos, los suelos con pH entre 6 y 6.5 son ideales para que la planta disponga de nutrientes adecuadamente para su desarrollo, en tanto que la conductividad eléctrica debe ubicarse entre 1.5 y 2.0 dS m⁻¹ (Allende *et al.*, 2017).

En condiciones protegidas, las variedades cultivadas bajo invernadero, incluso en suelos de textura arenosa, exhiben una mayor tolerancia del pH, incluso hasta valores de pH de 8 y valores de conductividad eléctrica superiores a 3 mS cm⁻¹, siendo un factor posible de manejar, sin embargo, este comportamiento es específico de algunas variedades.

Temperatura: Es uno de los factores más influyentes dentro de los procesos fisiológicos de la planta, aunque la planta tiene la capacidad de desarrollarse en climas adversos, la temperatura presente a la que estaría expuesta es lo que define el valor de rendimiento que esta pueda tener (Rawson & Gómez-McPherson, 2001).

El tomate es un cultivo que tiene una mejor respuesta a un clima cálido, con temperaturas moderadas. Temperaturas intensas que se salgan del rango pueden alterar el desarrollo de la planta según su etapa fenológica (YARA México, 2023). Según Allende *et al.* (2017) las temperaturas optimas se encuentra entre 18 y 30 °C. Durante el desarrollo vegetativo, el rango de temperaturas óptimas es de 23-26 °C durante el día y de 13-16 °C durante la noche. Al entrar a floración, las temperaturas deben ubicarse entre 23-26 °C en el día y entre 15-18 °C por la noche. Una vez alcanzada la maduración de frutos, las temperaturas idóneas son entre 15-22 °C (Allende *et al.*, 2017).

Humedad Relativa: El tomate es sensible ante la humedad relativa, respecto a su rango óptimo, esta debe de encontrarse entre 60 a 80%. Sin embargo, una interacción de la humedad relativa, por ejemplo, al presentarse en un valor bajo a temperaturas altas, generan aborto floral y la viabilidad del polen disminuye (Allende *et al.*, 2017). Por otro lado, valores altos de humedad relativa favorecen la aparición de enfermedades bacterianas y fungosas, además, interfiere en la fecundación, porque compacta el polen causando que ciertas flores aborten.

Los desbalances en la humedad relativa también se encuentran relacionados con el rajado o agrietamiento del fruto, cuando la planta pasa por un estrés hídrico prolongado y drásticamente tiene un incremento en la humedad del suelo debido a un riego pesado (Monardes, 2009). Del mismo modo, cuando la humedad relativa

es baja y la temperatura es alta origina que se eleve la tasa de transpiración, causando el cierre estomático, reduciendo la absorción de agua y nutrientes, lo que lleva a la planta a un estrés hídrico (Jaramillo-Noreña *et al.*, 2012).

2.6 Requerimientos nutricionales del cultivo de tomate:

La nutrición se puede denominar como la aportación de nutrientes minerales esenciales de la planta, cuando le es insuficiente el aporte del suelo, para la aplicación de la nutrición mineral deben considerarse las variables limitantes y tiempo acertados de aportación (Mengel & Kirkby, 2000).

Una fertilización eficaz es aquella que se realiza en el momento en que, de acuerdo con las necesidades nutricionales de la planta y el estado en que se encuentre el suelo, esta aporta los minerales adecuados en cantidades y tiempos precisos. Cabe mencionar que una buena nutrición no solo se basa en los criterios anteriores ya que no solo implica solventar la demanda mineral faltante, además, se debe considerar el mantenimiento del balance entre los otros elementos presentes en el suelo como en las estructuras de la planta (Baudoin, 2017).

En cuestión de elaboración de cálculos de nutrición, en la actualidad existe una diversidad de autores con distintos razonamientos respecto a las cantidades aplicadas, cada uno se basa en distintas variables, según el experimento y objetivo esperado, a continuación, se presenta una compilación de diferentes aportes nutricionales revisados:

Cuadro 1. Requerimientos nutricionales del cultivo de tomate de acuerdo a diferentes autores.

Unidades	N	P	K	Mg	S	Ca	Autor
Kg Ha ⁻¹ (50 Ton)	140	28.4	158	14.7	30		(Mejía de Tafur et al., 2007)
Kg Ha ⁻¹	100 y 600	100 y 200	160-900	40-290		45-295	(Quesada Roldán & Bertsch Hernández, 2013)
Kg Ha ⁻¹	300 y 600	400 y 800	600-1,000				Jaramillo Noreña et al. 2012

Kg/Ton ⁻¹	2.6	0.5	3.9	0.4	1.6	Allende et al. 2017
----------------------	-----	-----	-----	-----	-----	------------------------

N= Nitrógeno; P= Fosforo; K= Potasio; Mg= Magnesio; S= Sulfato; Ca= Calcio.

Como se observa, las referencias de la dosis de nutrición necesaria varían según el objetivo esperado, Allende *et al.* (2017) menciona que lo primordial para un cálculo de fertilización eficiente, adecuado a la planta, inicia a partir de una comprensión del papel que impone cada nutriente. Sabiendo que, la intervención de estos, está fuertemente vinculada al crecimiento y funciones fisiológicas, por ello, el conocimiento de la absorción que hace la planta del suelo es una herramienta básica para la realización de una nutrición adaptada al cultivo. (Allende *et al.*, 2017).

2.7 Deficiencias nutrimentales y principales síntomas del cultivo:

Mengel & Kirkby (2000) describe a la nutrición como la dotación de compuestos químicos necesarios para el funcionamiento metabólico de un organismo, siendo los nutrientes consumidos durante el crecimiento de este.

Arnon & Stout (1939), exponen que la presencia de un elemento no puede ser sustituida por otro y en ausencia de él, se presentaría distintas interrupciones metabólicas y fisiológicas de la planta, distintivas de cada elemento lo cual haría imposible que la planta concluya su ciclo de vida, lo anterior se considera como criterios de esencialidad de los elementos minerales.

Lo que se comprende cómo que la ausencia o deficiencia de cada elemento tiene su propia sintomatología, siendo visible en distintas áreas, con notaciones sobresalientes en diversas estructuras de la planta, afectando el metabolismo y por ende, el desarrollo según su etapa y en conclusión el rendimiento del cultivo.

Haciendo observación de los principales nutrientes evaluados, se puede mencionar los siguientes:

Nitrógeno: Siendo de los nutrientes más móviles, tanto en la planta como en el suelo, está presente en distintas funciones metabólicas, durante el ciclo de vida de la planta, contribuyendo tanto al crecimiento vegetativo y reproductivo (Jaramillo-Noreña *et al.*, 2012).

Su deficiencia se distingue al tener una tasa de crecimiento menor con plantas de apariencia ahilada o etioladas (Mengel & Kirkby, 2000), además se observa en las hojas inferiores una coloración amarillenta y visualización de una planta raquítica. En etapa reproductiva se observan folíolos pálidos, un aborto prematuro de flores y el fruto se mantiene pequeño sin llegar a su maduración completa (Jaramillo-Noreña *et al.*, 2012).

Las hojas con deficiencias de nitrógeno muestran una clorosis uniforme, a causa de un colapso de los cloroplastos, donde los síntomas se presentan en una etapa temprana sobre las hojas viejas (inferiores), en comparación de otros déficits similares tal como el de Fe, Ca y S, donde es más notorio en hojas más jóvenes (superiores), siendo esto una característica importante al momento de hacer un diagnóstico visual de las deficiencias de estos elementos.

Las plantas con deficiencia nitrogenada, tienden a madurar más rápido y reducen el lapso de su etapa vegetativa, esto debido posiblemente al suministro del N en la síntesis y translocación de citoquininas (Mengel & Kirkby, 2000).

Fósforo: Un elemento igual de móvil dentro de planta como el nitrógeno, con el cual trabaja de la mano en relaciones fisiológicas, impulsando el desarrollo de las raíces, teniendo como producto una mejor calidad de fruto, asimismo asegurando la calidad de semillas, este elemento también tiene participación dentro del proceso de germinación.

Su valor también radica en su participación dentro del metabolismo energético de la planta, dado que participa en la formación de varias moléculas, las cuales son vitales para el fortalecimiento de la planta en cuestión de resistencia ante posibles enfermedades (Jaramillo-Noreña *et al.*, 2012).

Sus síntomas de déficit pueden ocurrir en una edad madura de la planta, aunque puede presentarse también en la época de trasplante (Baudoin, 2017). Los síntomas son visibles en hojas maduras cuya coloración es de un verde intenso, los márgenes se tornan un color morado, originada por una mayor síntesis de antocianinas. Cabe

destacar que las plantas que presentan este déficit, estiman una valoración del 0.1% o menos, del contenido de P de la materia seca (Mengel & Kirkby, 2000).

El déficit de este elemento afecta primordialmente en la etapa de desarrollo del fruto, lo cual ocasiona una disminución en el rendimiento esperado del cultivo, reduce la floración y cuajado de frutos, en deficiencias severas, estas ocasionan caída de flores, hojas y frutos, presentando raquitismo en la planta, con tallos delgados y fibrosos, teniendo así mismo, un retardo en la floración y maduración (Jaramillo-Noreña *et al.*, 2012).

Así mismo, dado su participación en la división celular y transferencia de energía (Barker & Pilbeam, 2007), perjudica el desarrollo de la planta, a causa de que la producción de proteínas se reduce, así como la síntesis de almidón, celulosa y sacarosa. Una destacada manifestación de este déficit, relacionado con reducción de la expansión celular, es que, puede presentarse el enanismo en las plantas (Jaramillo-Noreña *et al.*, 2012).

Potasio: Este nutriente juega un papel importante dentro de la fotosíntesis y síntesis de proteínas, agregándole que promueve un mejor uso del agua a la planta, gracias a su efecto osmorregulador (Baudoin, 2017). Incluso, incrementa la resistencia ante enfermedades, estrés causado por nematodos y otros patógenos, aumenta la resistencia a las heladas y participa en la activación de enzimas. Cabe agregar, que está muy relacionado con la calidad y formación del fruto, mejorando la calidad y calibres del cultivo y su vida poscosecha (Jaramillo-Noreña *et al.*, 2012)

Baudoin (2017) menciona que el potasio tiene un efecto directo en la firmeza, llenado y calidad organoléptica del fruto, dándole una maduración uniforme y por ello, una prolongada vida de anaquel. Debido a esto, la aplicación de potasio es mayor sobre el tomate por encima de las otras hortalizas, debido a que el mayor porcentaje que la planta consume, cerca del 57%, se encuentra ubicado en los frutos (Baudoin, 2017).

Con una alta concentración de K^+ en el citoplasma, el alto valor fisiológico de este nutriente mineral se basa en el papel importante que hace en el metabolismo de los

carbohidratos y proteínas. En cuanto a su función en la eficiencia del uso del agua, este ion está vinculado con la apertura estomática, influyendo directamente en la absorción del CO₂ y en el proceso de transpiración (Azcón-Bieto & Talón, 2003).

La deficiencia de K⁺ es visible en su mayoría, sobre las hojas maduras de la planta, debido a que estas suministran K⁺ a las hojas más jóvenes, aun así, su sintomatología no es observable en primera instancia. Inicialmente, disminuye la tasa de crecimiento conocido como hambre oculta, posterior a ello, se presenta una clorosis y posteriormente una necrosis en los bordes de las hojas (Mengel & Kirkby, 2000).

Las plantas afectadas pierden su sanidad, es decir, que la resistencia, tolerancia o fortaleza a factores bióticos en comparación con una planta bien nutrida. Ejemplo de ello es que la deficiencia ocasiona que el tejido foliar pierda su resistencia ante ataques fúngicos y enfermedades. Su tolerancia a las sequías y heladas disminuye, debido a que las hojas pierden su turgor, volviéndose flácidas, esto relacionado a que hay un desarrollo anormal de los tejidos y órganos celulares además de poca asimilación de agua en tejido (Mengel & Kirkby, 2000).

Calcio: Sonneveld & Voogt (2009) mencionan que el Ca²⁺ tiene 3 principales funciones dentro de la planta de tomate.

El 90% del calcio está presente en la pared celular. Tiene una función de adherencia, la cual sostiene las células y a la par mantiene su estructura dentro de los tejidos de la planta. Así mismo participa en la elongación y división celular (González-López, 2013).

Por último, es encontrado en el centro de mecanismo de defensa de la planta, brindándole una mejor capacidad de detección ante un estrés externo y así mismo una tolerancia al ataque de patógenos. En conjunto, el hecho de que el calcio esté involucrado en la firmeza de los tejidos, permite mejoras en la vida de anaquel del fruto durante el almacenamiento (Xiong *et al.*, 2021).

Una singularidad del Ca²⁺ que es transportado de manera casi particular, por el flujo de transpiración, siendo distribuido desde la raíz hasta las hojas, por medio del

xilema y su disponibilidad varía según el pH de la solución nutritiva mediante el cual se vaya a aplicar (Azcón-Bieto & Talón, 2003).

Su deficiencia se presenta con un amarillamiento en los bordes de las hojas que están en crecimiento, generando una deformación a manera de un curvamiento de los bordes hacia arriba y un color café opaco en el envés que posteriormente se convierte en necrosis en su parte apical. Las raíces se manifiestan cortas con poca ramificación y gruesas, pero donde es más visible este déficit es en el fruto, con un “hundimiento” en la zona apical, que es definido como pudrición apical (Baudoin, 2017).

Magnesio: El magnesio es absorbido por las plantas como Mg^{2+} y su contenido total promedio en la planta es de alrededor del 0.5% en peso seco. La absorción de magnesio puede verse afectada por la competencia con otros cationes como el potasio, amonio, calcio y manganeso, así como por un pH ácido. La deficiencia de magnesio debido a la competencia con otros cationes es un fenómeno común.

En la planta, el magnesio desempeña un papel crucial como componente metálico de la molécula de clorofila, el pigmento esencial para la fotosíntesis en las plantas verdes.

La proporción de magnesio unido a la clorofila depende en gran medida del suministro de magnesio. Aproximadamente del 6% al 25% del magnesio total en la planta se une a la clorofila, lo que representa solo alrededor del 10-12% del total contenido en la planta. Sin embargo, en condiciones de poca luz, la proporción de magnesio unido a la clorofila puede ser incluso superior al 50%. Otro 10.5% del magnesio total se encuentra en forma de pectatos en las paredes celulares o en forma de sales poco solubles en la vacuola, como el fosfato.

El resto, entre el 60% y el 90%, puede extraerse con agua. Además, el magnesio también se encuentra asociado con aniones orgánicos como el malato, nitrato y oxalato en diferentes partes de la planta como semillas, ramas, hojas y troncos. Las semillas suelen ser ricas en magnesio.

La mayor parte del magnesio presente en el suelo no es fácilmente utilizable por las plantas. El magnesio se encuentra en diferentes formas en el suelo, algunas de las cuales son lentamente asimilables, asimilables y rápidamente asimilables por las plantas. La fracción no intercambiable, que incluye el magnesio contenido en minerales primarios y secundarios, generalmente se considera de poca utilidad para las plantas. En suelos ácidos con alto contenido de arcillas, puede haber una retención de magnesio en las unidades cristalinas del mineral (García-Navarro, 2013).

Azufre: La atmósfera puede ser una fuente de azufre para el suelo, aunque en proporciones pequeñas. En áreas cercanas a centros industriales con alta actividad y en lugares con emanaciones volcánicas, el dióxido de azufre puede depositarse en el suelo a través de la lluvia. La cantidad de azufre aportado depende de factores como el régimen de lluvias, la dirección de los vientos dominantes, la actividad industrial y la ubicación geográfica. Debido a estas variables, los datos disponibles varían ampliamente, y las cantidades de deposición de azufre pueden ser tan bajas como 0.5 kg S ha^{-1} por año en zonas áridas y poco industrializadas, hasta más de 100 kg S ha^{-1} por año en áreas cercanas a zonas industriales y con alta precipitación.

En el suelo, el azufre está sujeto a diversas transformaciones, en las que intervienen tanto agentes químicos como biológicos, como animales, plantas superiores y microorganismos. Los microorganismos desempeñan un papel fundamental en estas transformaciones, siendo el principal vínculo entre el azufre, las plantas y los animales.

La dinámica del azufre en el suelo puede dividirse en tres fases principales:

- Sulfhidración, que implica la mineralización del azufre orgánico.
- Sulfooxidación, que implica la oxidación del azufre mineral.
- Desulfatación, que implica la reducción del azufre mineral.

Estas tres fases son responsables de las principales formas de azufre presentes en los suelos, y su proporción varía en relación con las condiciones climáticas y ecológicas (García-Navarro, 2013).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del experimento

El experimento se realizó en un invernadero de baja tecnología, ubicado dentro del Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada al sur de Saltillo, dentro de la región sureste de Coahuila. En la región se encuentran suelos con textura franca. El análisis de suelo arrojó los datos que a continuación se detallan:

- 3.2% de materia orgánica
- Punto de saturación de 43%
- Capacidad de campo de 22.9%,
- Densidad aparente de 1.13 g cm^{-3}
- Contenido de carbonatos de 55.8%,
- pH de 8.07,
- CE de 6.93 dS m^{-1}
- Saturación de bases de 70.6% Ca^{2+} equivalente a $18.5 \text{ mEq } 100 \text{ g}^{-1}$, 13.9% Mg^{2+} equivalente a $3.64 \text{ mEq } 100 \text{ g}^{-1}$, 4.12% K^{+} equivalente a $1.08 \text{ mEq } 100 \text{ g}^{-1}$ y 11.3% Na^{+} equivalente a $2.95 \text{ mEq } 100 \text{ g}^{-1}$.

Como complemento al análisis de suelo, se realizó la medición de iones de NO_3^- , Ca^{2+} , K^{+} , Na^{+} , pH y CE en extracto saturado de pasta de suelo, obteniéndose los siguientes datos para macroelementos (mEq L^{-1}): $\text{NO}_3^- = 2.25$; $\text{Ca}^{2+} = 7.5$; $\text{K}^{+} = 2.3$; $\text{Na}^{+} = 7.39$, mientras que se obtuvieron los valores de: pH= 8 y CE= 6 dS m^{-1} .

Del mismo modo, el análisis de agua, presentó los siguientes datos para macroelementos y otros compuestos (mEq L^{-1}): $\text{NO}_3^- = 0.53$; $\text{SO}_4^{2-} = 1.11$; $\text{Cl}^- = 1.73$; $\text{HCO}_3^- = 6.6$; $\text{Ca}^{2+} = 4.48$; $\text{K}^{+} = 0.15$; $\text{Mg}^{2+} = 2.4$; $\text{Na}^{+} = 2.52$; mientras que para

microelementos se obtuvieron los siguientes valores (mg L^{-1}): B=0.27; Fe=0.07; Mn=0.069; Cu= 0.003; Zn=0.167; As= 0.015; del mismo modo, algunos parámetros presentaron los siguientes valores: pH= 7.68; CE= 0.96 dS m^{-1} , RAS= 1.36 y RAS_{aj} =1.68.

3.2 Material genético

Se empleó semilla del genotipo Vengador F1 de Syngenta Seeds (Chicago, USA), las cuales fueron sembradas en charolas de poliestireno de 200 cavidades, para obtener plántulas las cuales se trasplantaron al suelo a los 45 días después de emergencia.

3.3 Diseño Experimental

El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar, con tres repeticiones. Los tratamientos consistieron en cuatro diferentes concentraciones de solución Steiner modificada para el cultivo de tomate: 1) 50%, 2) 75%, 3) 100% y 4) 125% (SN50, SN75, SN100 y SN125) aplicadas mediante fertirriego al suelo.

La solución nutritiva a concentración normal (SN100) presentó los siguientes requerimientos minerales para macroelementos (mEq L^{-1}): NO_3^- (15), H_2PO_4^- (2), SO_4^{2-} (5), K^+ (9), Ca^{2+} (10), Mg^{2+} (3) y de los microelementos en mg L^{-1} : Fe (1.5), Mn (0.6), Zn (0.2), B (0.5), Cu (0.15) y Mo (0.05), con un pH de 6.1 y CE de 2.53 dS m^{-1} .

3.4 Variables evaluadas

A continuación, se detallan las variables evaluadas dentro de cada grupo, además del equipo empleado, la frecuencia de medición, tamaño del muestreo y unidades de medida empleadas.

Variables de la solución del suelo

Concentración de NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} , Na^+ pH y CE en solución del suelo: Se extrajo la solución del suelo de forma semanal durante 15 semanas, empleando lisímetro de succión, con un vacío a 60 kPa aplicado 15 minutos después del fertirriego. Las extracciones se realizaron después de una hora de aplicado el vacío. Se midió la concentración de los iones y otras variables empleando los equipos empleando ionómetros (HORIBA, Kyoto, Japón) modelos LAQUAtwin-NO3-11, K-11 y Ca-11 para NO_3^- , K^+ y Ca^{2+} respectivamente, calibrados a 150 y 2000 mg L⁻¹, expresándose los resultados en miligramo por litros, del mismo modo se midió el pH y CE de la solución el suelo con los ionómetros LAQUAtwin pH-11 y EC-11 (HORIBA, Kyoto, Japón) para pH y CE respectivamente, calibrados a dos puntos (4.0 y 7.0 para pH y 1.41- 12.9 mS cm⁻¹ para CE). Los resultados se expresaron en valores de 0 a 14 para pH y dS m⁻¹ para CE.

Variables de Crecimiento

Ganancia de altura: Con una cinta métrica, se determinó la altura de la planta durante 22 semanas, al final, se midió la ganancia de altura, calculándola mediante la diferencia entre la altura en la última semana de muestreo y la altura al comienzo de experimento, el resultado se expresó en centímetros.

Diámetro de tallo: Durante el mismo periodo y empleando un vernier digital CD-8 (Mitutoyo Corp., Kanagawa, Japón) se midió de forma semanal, el diámetro de los tallos a 2 cm antes de la primera bifurcación, de tres plantas por tratamiento, los resultados se expresaron en milímetros.

Variables Fisiológicas

Conductancia estomática: De forma semanal, empleando porómetro Leaf Porometer SC-1 (Decagon Devices, Inc., WA, USA) bajo la técnica del estado estacionario, se midió tres veces al día (8:00, 12:00 y 16:00 h) por 4 semanas. Los resultados se expresaron en mmol m⁻² s⁻¹ de vapor de agua.

Variables de Calidad Comercial y Rendimiento

Firmeza del fruto: Se evaluaron tres frutos por tratamiento y por racimo. Empleando un penetrómetro con una punta de calibre 8 mm (Qa Supplies, VA, USA), expresando los resultados en kg cm⁻².

Sólidos solubles totales: Con ayuda de un refractómetro portátil Bx-1 (Vee Gee, IL, USA) se extrajo el jugo de cinco frutos por tratamiento y repetición, se midió el contenido de sólidos solubles en jugo, obteniéndose los valores en °Brix (%).

Rendimiento por hectárea: Considerando el rendimiento por 5 plantas las cuales ocupaban una superficie de 1 m² se extrapolaron los datos a una superficie de 10,000 m² obteniéndose el rendimiento en t ha⁻¹.

3.5 Análisis estadístico

Se realizó análisis de varianza ($P \leq 0.05$) bajo un modelo de bloques completos al azar y una prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$). Se empleó el paquete estadístico Infostat V. 2020 (Di Rienzo *et al.*, 2020).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Concentración de iones en solución del suelo

El análisis de varianza ($P \leq 0.05$) detectó una diferencia altamente significativa entre tratamientos para la concentración de nitrato en la solución del suelo, del mismo modo se reportó una diferencia significativa entre tratamientos para K^+ en la solución del suelo.

Así mismo, en el caso del Ca^{2+} se observó diferencia significativa entre tratamientos en la solución del suelo. Sin embargo, para el mineral de Na^+ , no se presentó alguna diferencia significativa, de la misma manera, tampoco se presentó ninguna diferencia significativa para pH. Por otro lado. Respecto a CE, se observó diferencia altamente significativa entre tratamientos.

Cuadro 2. Cuadrados medios del ANOVA ($P \leq 0.05$) para la concentración de iones en solución del suelo, como efecto del manejo nutricional

F.V.	GL	NO_3^-	K^+	Ca^{2+}	Na^+	pH	CE
Tratamiento	3	271412.15 **	19904.73 *	7503.18 *	2625.74 ns	0.02 ns	0.36 **
Bloque	2	80803.12 *	2167.45 ns	2631.1 ns	1862.41 ns	0.03 *	0.1 ns
Error	6	15621.36	2700.37	775.81	3538.08	0.0041	0.04
Total	11						
CV (%)		21.01	42.52	10.63	32.86	0.85	11.42

F.V.= Fuentes de variación; GL= Grados libertad; C.V.= Coeficiente de variación; NO_3^- = Nitrato; K^+ = Potasio; Ca^{2+} = Calcio; Na^+ = Sodio; pH= Potencial de Hidrogeno; CE= Conductividad eléctrica; ns= No significativo ($P \leq 0.05$); * = Significativo ($P \leq 0.05$); ** = Altamente significativo ($P \leq 0.01$).

La prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) permitió observar que, para la concentración de nitrato, el tratamiento SN125 fue el mejor con una medida de 949.09 mg L^{-1} . Superando al tratamiento SN100 por 36.68%, a SN75 por 91.04% y a SN50 por 296.57%, la disponibilidad del ion con una relación directa del aporte vía solución nutritiva podría deberse a la carga negativa del ion,

lo que le permite mantenerse disponible en la solución del suelo, sobre todo en suelos con alta saturación de bases, es decir, al ser un anión no interactúa por medio de cargas con las partículas del suelo (Hernández *et al.*, 2014). Por otro lado, respecto al ion potasio, de igual manera SN125 presentó mayor concentración en solución del suelo, con un valor de 231.09 mg L⁻¹. En comparación con los demás tratamientos, se mostró la siguiente diferencia: SN125>SN100>SN75>SN50, por lo que SN125 fue mayor por 72.73%, 188.28% y 427.60% respectivamente, los ritmos de absorción de K⁺ están condicionados por la cantidad de potasio que libere el suelo y los ritmos de absorción del cultivo, los cuales incrementan en etapa productiva (Lao *et al.*, 2003; Hernández *et al.*, 2014) (Cuadro 3).

En relación al Calcio, la SN125 reportó el mayor valor de concentración en la solución del suelo con 323.07 mg L⁻¹. Haciendo la una comparación con el resto de las soluciones se observó las siguientes diferencias: SN125>SN100>SN75>SN50, por lo que se interpreta que SN125 fue superior a los demás tratamientos en el orden ya mencionado por 20.79%, 26% y 39.73% respectivamente, en suelos calcáreos, los niveles de liberación de este ion pueden llegar a satisfacer la demanda nutrimental del cultivo para algunas etapas de crecimiento (Díaz-Vázquez *et al.*, 2023).

Mientras que para Sodio no se observaron grupos estadísticos diferenciados, en este caso, el sodio contenido en suelo y el aportado por el agua pueden ser fácilmente desplazados por los riegos a fracciones del suelo donde el muestro no accedió, se sabe que el sodio es el catión con menor fuerza de adsorción a las partículas del suelo (Strawn *et al.*, 2020). Del mismo modo, los valores medios de pH no generaron grupos estadísticos diferenciados bajo la prueba de medias aplicada. En relación a CE, la SN125 se observó el mayor valor con 2.08 mS cm⁻¹, SN100 fue menor a SN125 por 16.20%, SN75 por 28.39% y SN50 por 67.74%, los valores de CE están directamente relacionados a la cantidad de sales fertilizantes disueltos en cada solución nutritiva y en consecuencia en la sumatoria de iones (cationes y aniones) disueltos en la solución del suelo (Santos Coello & Ríos Mesa, 2016) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Medias estadísticas de variables de solución del suelo, de acuerdo con la prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$)

Tratamiento	NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	K ⁺ (mg L ⁻¹)	Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	Na ⁺ (mg L ⁻¹)	pH (n)	CE (mS cm ⁻¹)
SN50	239.32 c	43.80 b	201.07 b	150.16 a	7.62 a	1.24 b
SN75	496.78 bc	80.16 b	256.39 ab	161.53 a	7.65 a	1.62 ab
SN100	694.38 ab	133.78 ab	267.45 ab	202.56 a	7.62 a	1.79 a
SN125	949.09 a	231.09 a	323.07 a	209.82 a	7.49 a	2.08 a

SN50= Solución nutritiva al 50%; SN75= Solución nutritiva al 75%; SN100= Solución nutritiva al 100%; SN125= Solución nutritiva al 125%; NO₃⁻ = Nitrato; K⁺= Potasio; Ca²⁺= Calcio; Na⁺= Sodio; pH= Potencial de hidrógeno; CE= Conductividad eléctrica. Medias con letras distintas en la misma columna refieren diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

4.2 Variables de crecimiento

El análisis de varianza ($P \leq 0.05$) detectó diferencia altamente significativa entre tratamientos para la variable GA y DT.

Cuadro 4. Cuadrados medios del ANOVA ($P \leq 0.05$) para variables de crecimiento del tomate, como efecto del manejo nutricional

F.V.	GL	GA	DT
Tratamiento	3	5094.74 **	6.22 **
Bloque	2	552.48 ns	5.19 **
Error	6	331.08	0.05
Total	11		
CV (%)		5.28	3.47

F.V.= Fuentes de variación; GL= Grados libertad; C.V.= Coeficiente de variación; GA= Ganancia de altura; DT= Diámetro de tallo; ns= No significativo ($P \leq 0.05$); *= Diferencia significativa ($P \leq 0.05$); **= Diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$).

La prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) permitió observar que el tratamiento SN125 generó mayor ganancia de altura en las plantas de tomate, con una media de 381.67 cm.

Bajo este análisis, se pudieron obtener la diferencia porcentual entre tratamientos, así, al determinar que SN125=SN100=SN75>SN50. De esta manera SN125 superó por 4.68%, 10.59% y 32.98% respectivamente. Sin embargo, SN125, SN100 y SN75 son estadísticamente similares.

Diferencias estadísticas más notables fueron detectadas en la variable DT bajo la misma prueba de comparación de medias, la SN125 fue la media más alta con un valor de 8.29 mm. En comparación con el resto de las soluciones, SN125>SN100 en 24.10%, SN125>SN75 por 39.79% y SN125>SN50 un 69.18%, la disponibilidad de los nutrientes en conjunto, sobre todo aquellos que participan de forma estructural permite un mayor incremento en variables de crecimiento, por el contrario la disminución del aporte en conjunto genera raquitismo y enanismo (Mengel & Kirkby, 2000).

Cuadro 5. Medias estadísticas de variables de crecimiento de tomate, como efecto del manejo nutricional (Tukey, $P \leq 0.05$)

Tratamiento	GA (cm)	DT (mm)
SN50	287.00 b	4.90 d
SN75	345.11 a	5.93 c
SN100	364.66 a	6.68 b
SN125	381.67 a	8.29 a

SN50= Solución nutritiva al 50%; SN75= Solución nutritiva al 75%; SN100= Solución nutritiva al 100%; SN125= Solución nutritiva al 125%; GA= Ganancia de altura; DT= Diámetro de tallo. Medias con letras distintas en la misma columna refieren diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

4.3 Variables fisiológicas

El análisis de varianza detectó diferencia altamente significativa dentro de la variable Cest 1. Mientras que para la variable Cest 2 se presentó una diferencia significativa y finalmente la variable Cest 3, expuso una diferencia altamente significativa (Cuadro 6).

Cuadro 6. Cuadrados medios del ANOVA ($P \leq 0.05$) de la Conductancia Estomática en hojas de cultivo de tomate, por efecto del manejo nutricional

F.V.	GL	Cest_1	Cest_2	Cest_3
Tratamiento	3	3069.44 **	4583.84 *	2929.92 **
Bloque	2	24858.75 **	32740.23 **	22224.89 **
Error	6	207.15	532.01	199.52
Total	11			
CV (%)		4.63	5.6	5.94

F.V.= Fuentes de variación; GL= Grados libertad; C.V.= Coeficiente de variación; Cest_1= Conductancia estomática momento 1; Cest_2= Conductancia estomática momento 2; Cest_3= Conductancia estomática momento 3; *= Diferencia significativa ($P \leq 0.05$); **= Diferencia altamente significativa ($P \leq 0.05$).

La prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) permitió observar que dentro de la variable Cest1, el tratamiento SN125 destacó con una media de 350. En este sentido al hacer una comparación con el resto de las soluciones se observaron las siguientes diferencias: SN125=SN100 con diferencia de 8.65%, mientras que SN125>SN75 por 18.46% y por último SN125>SN50 por 26.53% (Cuadro 7).

Para la variable Cest2, la SN125 generó la media estadística más alta con un valor de 456.31 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Al compararse con el resto de las soluciones, se observó que SN125=SN100 con diferencia de 6.69%, mientras que SN125=SN75 presentó una diferencia de 14.37% mientras que SN125>SN50 por una diferencia de 24.99% (Cuadro 7).

Por último, la variable Cest3, la SN125 presentó el mejor valor con 274.17 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, al comparar la diferencia, se obtuvo los siguientes porcentajes: SN125=SN100 con diferencia de 10.71%, por otro lado SN125>SN75 por 19.77% y finalmente SN125>SN50 en 37.10%, en todos los momentos de medición durante el día, se observa que la disponibilidad limitada o una deficiencia de K^+ está directamente relacionada con reducciones de conductancia estomática (Cuadro 7) (Dell'Amico & Morales, 2017).

Cuadro 7. Medias estadísticas de la variable Conductancia Estomática medida en hojas de tomate, como efecto del manejo nutricional aplicado (Tukey, $P \leq 0.05$)

Tratamiento	CEst1	Cest2 (mmol m ⁻² s ⁻¹)	Cest3
SN50	276.61 c	365.05 b	199.97 c
SN75	295.44 bc	398.95 ab	228.91 bc
SN100	322.11 ab	427.67 ab	247.63 ab
SN125	350.00 a	456.31 a	274.17 a

SN50= Solución nutritiva al 50%; SN75= Solución nutritiva al 75%; SN100= Solución nutritiva al 100%; SN125= Solución nutritiva al 125%; Cest_1= Conductancia estomática momento 1; Cest_2= Conductancia estomática momento 2; Cest_3= Conductancia estomática momento 3. Medias con letras distintas en la misma columna refieren diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

4.4 Variables de calidad de fruto y rendimiento

El análisis de varianza ($P \leq 0.05$) detectó una diferencia estadística altamente significativa para la variable FF, de igual manera que en SS y en el rendimiento por Hectárea.

Cuadro 8. Cuadrados medios del ANOVA ($P \leq 0.05$) de variables de calidad de fruto y rendimiento, como respuesta del cultivo de tomate al manejo nutricional

F.V.	GL	FF	SS	REND_HA
Tratamiento	3	0.41 **	0.20 **	1413.98 **
Bloque	2	0.02 *	0.01 *	182.48 *
Error	6	0.0031	0.0013	34.76
Total	11			

CV (%)

	1.84	0.77	6.6
--	------	------	-----

F.V.= Fuentes de variación; GL= Grados libertad; C.V.= Coeficiente de variación; FF= Firmeza del fruto; SS= Sólidos solubles totales; REND_HA= Rendimiento por hectárea; * = diferencia significativa; ** = Diferencia altamente significativa.

La prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) permitió observar que en la variable FF, el tratamiento SN125 fue el mejor con una media de 3.41 kg cm⁻². En comparación con los otros tratamientos, se observan las siguientes diferencias, SN125>SN100>SN75>SN50 con una diferencia del 8.25%, 15.59% y 34.78% respectivamente, se ha encontrado una relación directa del aporte de calcio sobre esta variable (Mengel & Kirkby, 2000).

Del mismo modo, para la variable SS fue SN125 el tratamiento que sobresalió con la media más alta de 5.06 % °Brix, en comparación con los otros tratamientos

nutricionales aplicados. Las diferencias porcentuales se describen como SN125>SN100>SN75>SN50, con una diferencia porcentual de SN125 de 4.35%, 8.63% y 15.28% sobre los demás tratamientos, un aporte alto de fosfato inorgánico relacionado con la concentración de la solución del elemento en la solución nutritiva y su posterior disponibilidad en la solución del suelo, incrementa el movimiento de fosfoglicerato y triosa fosfato, lo que incrementa la producción de carbohidratos como sacarosa, incrementando las lecturas de SS (Mengel y Kirkby, 2000).

Por último, en la variable de rendimiento ($t\ ha^{-1}$), la SN125 destacó con la media más alta con $116.49\ t\ ha^{-1}$, al hacer comparaciones con los otros tratamientos nutricionales, se presentaron las siguientes diferencias: SN125>SN100>SN75>SN50, de tal manera que SN125 superó por 21.49%, 50.09% y 73.71% respectivamente a los demás tratamientos en el orden ya mencionado.

Cuadro 9. Medias estadísticas de variables de calidad de fruto y rendimiento del cultivo de tomate bajo invernadero, como respuesta al manejo nutricional (Tukey, $P\leq 0.05$)

Tratamiento	FF ($kg\ cm^{-2}$)	SS (% °Brix)	Rendimiento ($t\ ha^{-1}$)
SN50	2.53 d	4.44 d	67.06 c
SN75	2.95 c	4.63 c	77.61 c
SN100	3.15 b	4.82 b	95.88 b
SN125	3.41 a	5.03 a	116.49 a

SN50= Solución nutritiva al 50%; SN75= Solución nutritiva al 75%; SN100= Solución nutritiva al 100%; SN125= Solución nutritiva al 125%; FF= Firmeza del fruto; SS= Sólidos solubles totales; Rendimiento= Rendimiento por hectárea. Medias con letras distintas en la misma columna refieren diferencias significativas de acuerdo a la prueba de Tukey ($P\leq 0.05$).

V. CONCLUSIONES

- ✓ Los tratamientos nutricionales aplicados al suelo afectaron directamente la concentración de iones medidos en la solución del suelo, así como los valores de la conductividad eléctrica, mientras que el pH no se vio afectado, debido al contenido de cationes base y carbonatos del suelo.
- ✓ La concentración media del calcio medida durante el periodo de muestreo supera los niveles de calcio de una solución nutritiva al 100% (200 mg L⁻¹) aun cuando se aplica el tratamiento menos concentrado (SN50).
- ✓ La disponibilidad de iones en suelo afecta directamente variables como la conductancia estomática relacionada con el ion potasio, la firmeza del fruto relacionada con el calcio y el rendimiento condicionado por un efecto sinérgico del déficit o suficiencia de los nutrientes en suelo.
- ✓ Podría aplicarse soluciones similares a SN125 de forma constante en el establecimiento del cultivo de tomate, lo que mejora los rendimientos por hectárea.
- ✓ El monitoreo permite reducir el aporte nutrimental modificando el aporte mediante fuentes fertilizantes.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Allende C, M., Salinas P, L., Olivares P, N., Riquelme S, J., Antúnez B, A., martinez C, J. P., Corradini S, P., Abarca R, P., Guzmán L, A., & Felmer E, S. (2017). *Manual de cultivo de tomate en invernadero* (A. Torres (ed.)). Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Álvarez-Hernández, J. C. (2012). Comportamiento agronómico e incidencia de enfermedades en plantas de tomate (*solanum lycopersicum* L.) injertadas. *Acta Agronomica*, 61(2), 117–125.
- Arnon, D. I., & Stout, P. R. (1939). The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiology*, 14, 1460–1470.
- Azcón-Bieto, J., & Talón, M. (2003). Fundamentos de fisiología vegetal. In *McGrawHill*.
- Barker, A. V., & Pilbeam, D. J. (2007). *Handbook of Plant Nutrition*. Taylor & Francis.
- Baudoin, A. (2017). *Manual Técnico de Producción de tomate con enfoque de Buenas Prácticas Agrícolas*. Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras.
- Canales-Almendares, J. E., Borrego-Escalante, F., Narvaez-Ortíz, W. A., González-Morales, S., & Benavides-Mendoza, A. (2021). Impacto de diferentes fertilizantes en la solución del suelo y el crecimiento de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 26, 105–117. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i26.2941>
- Dell'Amico, J. M., & Morales, D. M. (2017). *Stomatal conductance behavior of two Cuban tomato varieties in field conditions and limited irrigation*. 38(2), 137–144. <http://ediciones.inca.edu.cu>
- Díaz-vázquez, F. A., Cabrera-De La Fuente, M., Benavides-Mendoza, A., Robledo-Torres, V., Juárez-Maldonado, A., Sandoval-Rangel, A., & García-León, A. (2023). Influencia de cuatro concentraciones de solución Steiner sobre los nutrientes en la solución del suelo y productividad en tomate (*Solanum lycopersicum* L .). *Terra Latinoamericana*, 41, 1–12. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1646>
- Escobar, H., & Lee, R. (2009). *Manual de producción de tomate bajo invernadero* (H. Escobar & R. Lee (eds.)). Fundación Universidad de Bogota. <https://doi.org/10.2307/j.ctv23dxc51.6>

- Fornaris, G. J. (2007). *Conjunto Tecnológico para la Producción de Tomate: Características de la planta*. <http://136.145.11.14/eea/wp-content/uploads/sites/17/2016/03/TOMATE-Características-de-la-Planta-v2007.pdf>
- González López, H. (2013). *Efecto de la Concentración de Calcio y Potasio en la Solución de Fertirriego en Tomate Bajo Invernadero Por*: Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- Hernández, M. I., Chailloux Laffita, M., Moreno Placeres, V., Igarza Sánchez, A., & Ojeda Veloz, A. (2014). Niveles referenciales de nutrientes en la solución del suelo para el diagnóstico nutricional en el cultivo protegido del tomate. *Idesia*, 32(2), 79–88. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292014000200011>
- ITIS. (2023). *Solanum Lycopersicum L. Taxonomy*. https://www.itis.gov/servlet/SingleRpt/SingleRpt?search_topic=TSN&search_v alue=521671#null
- Jaramillo Noreña, J. E., Sánchez León, G. D., Rodríguez, V. P., Aguilar Aguilar, P. A., Gil Vallejo, L. F., Hío, J. C., Pinzón Perdomo, L. M., García Muñoz, M. C., Quevedo Garzón, D., Zapata Cuartas, M. Á., Restrepo, J. F., & Guzmán Arroyave, M. (2012). *Tecnología para el cultivo de tomate bajo condiciones protegidas*. Corpoica.
- Lao, M. T., Jiménez, S., Eymar, E., Fernández, E. J., & Jiménez, R. (2003). Determination of spatial variability of nutrient composition of soil solutions in greenhouses by using suction cups. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34(5–6), 865–879. <https://doi.org/10.1081/CSS-120018980>
- López-Marín, L. M. (2017). *Manual técnico del cultivo de tomate (Solanum lycopersicum)*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología
- López, S. A., Martínez, J. G., y Pérez, J. C. (2018). Establecimiento de tomate en suelos alcalinos. *Terra Latinoamericana*, 2(12), 123-134.
- Mejía de Tafur, M. S., Estrada S., E., & Franco P., M. M. (2007). Respuesta del tomate chonto cultivar Unapal Maravilla, a diferentes concentraciones de nutrientes. *Acta Agronómica*, 56(2), 75–83.
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2000). *Principios de Nutrición Vegetal* (4ta ed.). Instituto Internacional de la Potasa.
- Monardes, H. (2009). *Manual de cultivo de tomate (Lycopersicon esculentum Mill): Características botánicas. Origen*. Universidad de Chile.
- Monge-Pérez, J. E., & Loría-Coto, M. (2021). Determinación de criterios de selección para el rendimiento de tomate (*Solanum lycopersicum L.*) cultivado bajo invernadero. *Avances En Investigación Agropecuaria*, 25(1), 7–19.
- Peralta, I. E., & Spooner, D. M. (2007). History, Origin and Early Cultivation of Tomato (Solanaceae). In M. K. Razdan & A. K. Mattoo (Eds.), *Genetic Improvement of Solanaceous Crops Volume 2: Tomato* (Vol. 2, pp. 1–24).

Science Publishers.

- Quesada Roldán, G., & Bertsch Hernández, F. (2013). Obtención de la curva de extracción nutrimental del híbrido de tomate FB-17. *Terra Latinoamericana*, 31(1), 1–7.
- Rawson, H. M., & Gómez-McPherson, H. (2001). *Trigo regado: Manejo del Cultivo* (1st ed.). FAO.
- Santos Coello, B., & Ríos Mesa, D. (2016). *Cálculo de soluciones nutritivas. En suelo y sin suelo* (S. de A. y D. Rural (ed.); 1ra ed.). Graficas Sabater S.L.
- SIAP. (2020). *PANORAMA AGROALIMENTARIO 2020* (Issue jitomate).
- SIAP. (2022). *Panorama Agroalimentario 2022*.
<https://drive.google.com/file/d/1jVWS4EFKK7HGwQOBpGeljUyaDT8X8lyz/view>
- SIAP. (2023). *Producción nacional de tomate rojo- Avance de Siembras y Cosechas*.
https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/
- Sonneveld, C., & Voogt, W. (2009). *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*. Springer.
<https://doi.org/10.1190/1.9781560801580.ch3>
- Strawn, D. G., Bohn, H. L., & O'Connor, G. A. (2020a). *Soil Chemistry* (5ta ed., Vol. 13, Issue 1). Jhon Wiley & Sons.
- Strawn, D. G., Bohn, H. L., & O'Connor, G. A. (2020b). *Soil Chemistry* (5th ed.). John Wiley & Sons Ltd.
- Xiong, T., Tan, Q., Li, S., Mazars, C., Galaud, J. P., & Zhu, X. (2021). Interactions between calcium and ABA signaling pathways in the regulation of fruit ripening. *Journal of Plant Physiology*, 256(483).
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153309>
- YARA México. (2023). *Nutrición Vegetal: Tomate*.
<https://www.yara.com.mx/nutricion-vegetal/tomate/principios-agronomicos-en-tomate/>