



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

POSGRADO DE AGRONOMÍA

PROGRAMA DE NUTRICIÓN VEGETAL

MODALIDAD DE TITULACIÓN

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado académico de Magister en Agronomía

Determinación del índice de requerimiento de fertilización de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) variedad Extremo a partir del análisis del extracto de savia

Autor(a): Ing. María Belén Peñaloza Lozada

Director(a): Ing. Robinson Fabricio Peña Murillo, PhD

Cevallos - Ecuador

2024

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
PROGRAMA DE NUTRICIÓN VEGETAL**

INFORMACIÓN GENERAL

TEMA: Determinación del índice de requerimiento de fertilización de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) variedad Extremo a partir del análisis del extracto de savia

AUTOR: Ing. María Belén Peñaloza Lozada

Correo electrónico:

DIRECTOR: Ing. Robinson Fabricio Peña Murillo, PhD.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

- Producción Agroalimentaria y Medio Ambiente

A la Unidad Académica de Titulación de la Universidad Técnica de Ambato
Facultad de Ciencias Agropecuarias.

El Tribunal receptor del Trabajo de Investigación, presidido por el Ing. Pablo Pomboza PhD, e integrado por los señores Ing. Edgar Luciano Valle Velastegui. Mg. y el Ing. Carlos Luis Vásquez Freytez. PhD designados por la Unidad de Titulación de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: **“Determinación del índice de requerimiento de fertilización de tomate (*Solanum lycopersicum L.*) variedad Extremo a partir de análisis de extracto de savia”** Elaborado por la señorita Ingeniera María Belén Peñaloza Lozada, para optar por el grado de Magíster en Agronomía mención Nutrición Vegetal; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de investigación, el tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.



Firmado electrónicamente por:
PEDRO PABLO POMBOZA
TAMAYO

Ing. Pedro Pablo Pomboza, PhD.
Presidente del Tribunal



Firmado electrónicamente por:
EDGAR LUCIANO VALLE
VELASTEGUI

Ing. Edgar Luciano Valle Velastegui. Mg.
Miembro del Tribunal



Firmado electrónicamente por:
CARLOS LUIS VÁSQUEZ
FREYTEZ

Ing. Carlos Luis Vásquez Freytez. PhD.
Miembro del Tribunal

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: **“Determinación del índice de requerimiento de fertilización de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) variedad Extremo a partir de análisis de extracto de savia”**, le corresponde exclusivamente a la Ingeniera: María Belén Peñaloza Lozada, autor, bajo la Dirección del Ingeniero. Robinson Fabricio Peña Murillo, PhD director del Trabajo de Titulación e Investigación, y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. María Belén Peñaloza Lozada

c.c.:1804896528

AUTORA



Firmado electrónicamente por:
**ROBINSON FABRICIO
PENNA MURILLO**

Ing. Robinson Fabricio Peña Murillo, PhD

DIRECTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.

Ing. María Belén Peñaloza Lozada

c.c.: 1804896528

AUTORA

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	xi
ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO I.....	16
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	16
1.1. Introducción	16
1.2. Justificación.....	17
1.3. Objetivos	19
1.3.1. General	19
1.3.2. Específicos	19
CAPÍTULO II	21
2.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	21
2.2. MARCO TEÓRICO	24
2.3.1. El cultivo de tomate: características e importancia económica	24
2.3.2. Características edafoclimáticas del cultivo de tomate.....	26
2.4. Etapas fenológicas del tomate	27
2.4.1. Desarrollo foliar.....	27
2.4.3. Aparición de la inflorescencia	28
2.5. Requerimientos nutricionales	31
2.6. El análisis de savia	31
CAPÍTULO III	34
MARCO METODOLÓGICO	34
3.1. Ubicación	34
3.2. Equipos y materiales.....	34
3.2.1. <i>Material experimental</i>	34
3.2.2. <i>Materiales</i>	34
3.2.3. <i>Equipos</i>	34

3.3.	Tipo de investigación.....	34
3.4.	Prueba de Hipótesis	35
3.5.	Recolección de información:	35
3.6.	Procesamiento de la información y análisis estadístico:.....	37
3.7.	Variables respuesta	37
3.7.1.	<i>Concentración de nutrientes en plantas de tomate:</i>	37
3.7.2.	<i>Concentración de nutrientes en la solución del suelo:</i>	38
	CAPÍTULO IV	39
	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
4.1.	Curvas de absorción y contenido de macro y micronutrientes en los diferentes etapas de crecimiento del cultivo de tomate variedad Extremo	39
4.2.	Niveles de nutrientes en la solución del suelo en el cultivo de tomate Extremo <i>in situ</i>	48
	CAPÍTULO V	51
	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS	51
5.1.	CONCLUSIONES.....	51
5.2.	RECOMENDACIONES	52
5.3.	BIBLIOGRAFÍA	53
5.4.	ANEXOS.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Requerimientos edafoclimáticos del tomate	26
Tabla 2. Principales características del tomate variedad Extremo	30
Tabla 3. Coeficientes de correlación lineal entre las mediciones de nutrientes por métodos convencionales y método rápido con el medidor LAQUAtwin	39
Tabla 4. Caracterización química del suelo	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Producción de los principales países productores de tomate en el 2022</i> (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2024)	25
Figura 2. Rendimiento de los principales países productores de tomate en el 2022 (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2024)	26
Figura 3. Etapa de germinación según la escala BBCH. (A) Aparición del hipocótilo con cotiledones de la semilla y (B) aparición de cotiledones encima de la superficie del suelo.	27
Figura 4. Etapa de desarrollo foliar según la escala BBCH. (A) Cotiledones completamente desarrollados, (B) primeras hojas elípticas visibles, (C) primer par de hojas verdaderas visibles y (D) cuarto par de hojas verdaderas visibles.	28
Figura 5. Etapa de aparición de la inflorescencia según a la escala BBCH	28
Figura 6. Etapa de crecimiento principal 6: Floración según escala BBCH. (A) primeras flores abiertas, (B) inicio de la floración, aproximadamente el 10% de las flores se abren y (C) fin de la floración.	29
Figura 7. Control genético y hormonal del desarrollo del fruto del tomate. (A) Principales etapas del desarrollo del fruto del tomate.....	30
Figura 8. Metodologías de análisis de savia: recolección de muestras, extracción de muestras y análisis de muestras. Los procedimientos dentro de cada etapa no son necesariamente una secuencia sino diferentes enfoques utilizados en varios estudios.	32
Figura 9. Esquema de distancia de siembra del tomate Extremo.....	35
Figura 10. Dibujo de un pecíolo de hoja de tomate para mostrar el sitio para la toma de muestras	36
Figura 11. Variación en la absorción de nitrógeno de acuerdo con la etapa de crecimiento en tomate variedad Extremo	41

Figura 12. Variación en la absorción de fósforo de acuerdo con la etapa de crecimiento en tomate variedad Extremo	41
Figura 13. Variación en la absorción de potasio de acuerdo con la etapa de crecimiento en tomate variedad Extremo	41
Figura 14. Variación en la absorción de calcio de acuerdo con la etapa de crecimiento en tomate variedad Extremo	43
Figura 15. Variación en la absorción de magnesio de acuerdo con la etapa de crecimiento en tomate variedad Extremo	43
Figura 16. Variación en la absorción de hierro de acuerdo con la etapa de crecimiento en tomate variedad Extremo	45
Figura 17. Variación en la absorción de manganeso de acuerdo con la etapa de crecimiento en tomate variedad Extremo	45
Figura 18. Variación en la absorción de cobre de acuerdo con la etapa de crecimiento en tomate variedad Extremo	46
Figura 19. Variación en la absorción de zinc de acuerdo con la etapa de crecimiento en tomate variedad Extremo	47
Figura 20. Establecimiento del cultivo de tomate	61
Figura 21. Sistema de electrodos sensibles a iones específicos, denominado medidor LAQUAtwin	62
Figura 22. <i>Aspecto general del cultivo de tomate Extermo</i>	63

AGRADECIMIENTO

Agradezco eternamente a Dios por haberme iluminado y permitirme seguir adelante, con sabiduría, paciencia y hacer realidad una de mis aspiraciones y obtener el título de Magister en Nutrición Vegetal.

A cada una de las personas que colaboraron con un granito de arena para que este proyecto se haga realidad, mi eterno agradecimiento por su incondicional apoyo y ayuda.

Un agradecimiento especial al Ing. Agr. Robinson Peña PhD y al Ing. Carlos Vásquez, PhD, por ser parte fundamental de culminación de este proyecto, por haberme brindado sus conocimientos con sus experiencias y sapiencias.

DEDICATORIA

La presente tesis se la dedico principalmente a Dios y a mis padres, Enrique y Eugenia, por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis triunfos se los debo a ustedes entre los que se incluye este.

Sus sacrificios y amor incondicional han sido la luz que guio mi camino en este nuevo objetivo planteado. Sin su apoyo y su ejemplo, este logro no habría sido posible. Gracias por creer en mí, incluso cuando dudaba de mí misma.

Agradezco infinitamente el apoyo incondicional de una persona especial, quien estuvo en todos los momentos buenos y malos por las palabras de aliento y jamás soltar mi mano.

RESUMEN

La optimización de la fertilización en cultivos hortícolas puede incrementar tanto el rendimiento como la calidad del producto, al tiempo que minimiza el impacto ambiental. Tradicionalmente, los planes de fertilización se basan en los análisis de suelo, los cuales, sin embargo, no siempre reflejan con precisión las necesidades nutricionales específicas de la planta. El análisis de savia emerge como una alternativa para evaluar el estado nutricional de las plantas en tiempo real. En la presente investigación, se determinó el índice de requerimiento de fertilización para el tomate (*Solanum lycopersicum*) variedad Extremo mediante el análisis del extracto de savia. Los contenidos de nutrientes esenciales (N, P, K, Ca y Mg) fueron cuantificados utilizando el sistema de electrodos selectivos de iones, conocido como medidor LAQUAtwin, cuyos resultados fueron comparados con los obtenidos por métodos convencionales de análisis de tejido. Se observó una alta correlación positiva entre ambos métodos, con valores de correlación (r) que oscilaron entre 0,851 para fósforo y 0,991 para nitrógeno. En cuanto a los nutrientes primarios (N, P y K), se identificaron variaciones significativas en función de la etapa de crecimiento del tomate, registrándose las mayores tasas de absorción a los 30 (crecimiento vegetativo) y 60 (crecimiento reproductivo) días después del trasplante (ddt). A los 120 ddt, se constató una disminución en la absorción, especialmente de nitrógeno y fósforo, siendo esta reducción más acentuada en nitrógeno. En contraste, el calcio presentó una tendencia creciente en función de la etapa de crecimiento del cultivo. Respecto al magnesio, su absorción aumentó entre los 30 y 60 ddt, para luego disminuir hacia el final del ciclo.

En cuanto a los micronutrientes, se observó un incremento en la absorción de hierro y manganeso entre los 30 y 60 ddt, seguido de una disminución hasta el final del ciclo, siendo más pronunciada para el manganeso. El cobre mostró una disminución en la absorción hasta los 60 ddt, con posterior aumento hacia el final del ciclo, mientras que el zinc presentó una tendencia general a disminuir a medida que avanzaba el ciclo de cultivo.

Palabras Claves: Cuantificación de nutrientes, manejo de la fertilización, tomate, Ecuador

ABSTRACT

Optimizing fertilization in horticultural crops can increase both yield and product quality while minimizing environmental impact. Traditionally, fertilization plans are based on soil analyses, which, however, do not always accurately reflect the specific nutritional needs of the plant. Sap analysis emerges as an alternative to assess the nutritional status of plants in real time. In the present research, the fertilization requirement index for tomato (*Solanum lycopersicum*) variety Extremo was determined by analyzing the sap extract. The contents of essential nutrients (N, P, K, Ca and Mg) were quantified using the ion-selective electrode system, known as the LAQUAtwin meter, whose results were compared with those obtained by conventional tissue analysis methods. A high positive correlation was observed between both methods, with correlation values (r) ranging between 0.851 for phosphorus and 0.991 for nitrogen. Regarding primary nutrients (N, P and K), significant variations were identified depending on the crop development stage, with the highest absorption rates recorded at 30 (vegetative growth) and 60 (reproductive growth) days after transplant (dat). At 120 dat, a decrease in absorption was observed, especially of nitrogen and phosphorus, with this reduction being more pronounced in nitrogen. In contrast, calcium showed an increasing trend depending on the phenological state of the crop. Regarding magnesium, its absorption increased between 30 and 60 dat, then decreased towards the end of the cycle. Regarding micronutrients, an increase in the absorption of iron and manganese was observed between 30 and 60 dat, followed by a decrease until the end of the cycle, being more pronounced for manganese. Copper showed a

decrease in absorption to 60 dat, with a subsequent increase towards the end of the cycle, while zinc showed a general tendency to decrease as the crop cycle progressed.

Keywords: Nutrient Quantification, Fertilization Management, Tomato, Ecuador

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

La producción mundial de hortalizas evidenció un incremento a 1.150 millones de toneladas en 2021, siendo la producción de tomate (*Solanum lycopersicum*) una de las principales hortalizas puesto que se registraron 189 millones de toneladas, seguido de la producción de cebollas (107 millones de toneladas), pepino (93 millones de toneladas), col (71 millones de toneladas) y berenjena (59 millones de toneladas) (Singh et al., 2023). Esto demuestra la importancia de la producción de tomate a nivel mundial, tanto por su alto valor comercial debido a sus cualidades gustativas, su relevancia dentro de los sistemas agroalimentarios por las diversas formas de aprovechamiento y a la posibilidad de disponer de fruta fresca durante todo el año, además del uso en la industria farmacéutica para el aprovechamiento de licopeno, una sustancia anticancerígena (Maxim et al., 2023).

Este cultivo enfrenta el desafío de optimizar su manejo agronómico, especialmente en lo que respecta a la fertilización, ya que un uso excesivo o inadecuado de nutrientes puede comprometer tanto el rendimiento como la calidad del producto, además de generar un impacto ambiental negativo (Ger et al., 2024). Según estudios recientes, el manejo ineficiente de los fertilizantes ha sido vinculado con problemas como la lixiviación de nitratos y la contaminación de cuerpos de agua (Berrueta et al., 2024), lo que subraya la necesidad de desarrollar enfoques más precisos y sostenibles para el manejo nutricional del tomate.

Tradicionalmente, las recomendaciones de fertilización se basan en análisis de suelo y hojas, los cuales, si bien son útiles, no siempre reflejan las necesidades nutricionales dinámicas de la planta en tiempo real (Liu et al., 2023). En este sentido, el análisis de la savia es una opción para determinar el estado nutricional de la planta, debido a que los nutrientes que se encuentran en ella están fácilmente disponibles para el desarrollo de la planta (Oskarsson et al., 2024; Yang et al., 2024).

El análisis de la savia permite determinar el estado nutricional de las plantas de forma temprana, ya que se basa en información en tiempo real sobre el contenido de minerales en la planta, así como las posibles deficiencias o excesos de nutrientes

que pueden ser determinados antes de que causen algún daño al desarrollo de la planta y, en consecuencia, al rendimiento de la fruta (Esteves et al., 2021).

El análisis de savia permite, además de proporcionar información sobre los macro y micronutrientes habituales, también puede mostrar los contenidos de NO_3^- y azúcar, los cuales muestran información sobre la velocidad de transformación del N en proteínas o, en caso contrario, si los niveles de N soluble son altos es indicativo de una mayor absorción de agua y dilución de los niveles de azúcar, lo que podría aumentar el ataque de plagas y enfermedades (Fichtner et al., 2021; Sakr, 2023). Por último, el análisis de la savia permite que los agricultores puedan hacer ajustes en los programas de fertilización, usando las cantidades óptimas de nutrientes que cubran las necesidades del cultivo con el menor impacto ambiental en el suelo y agua (Esteves et al., 2021).

La presente investigación tiene como objetivo determinar el índice de requerimiento de fertilización del tomate a partir del análisis del extracto de savia. La hipótesis principal es que los niveles de nutrientes en la savia se correlacionan de manera directa con las necesidades nutricionales del cultivo en diferentes fases fenológicas. Esto permitiría ajustar la fertilización de manera más eficiente, reduciendo el uso excesivo de insumos y mejorando la sostenibilidad del sistema productivo.

1.2. Justificación

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de las hortalizas de mayor importancia por su calidad nutritiva, por lo que es cultivada en zonas países con clima tropical, subtropical y templado y, por lo tanto, ocupa el tercer lugar en términos de producción mundial de hortalizas (Khairul Mazed et al., 2015). El tomate es una fuente importante de vitamina A y C, minerales y licopeno, un poderoso antioxidante carotenoide que tiene muchos beneficios para la salud humana ya que reduce los riesgos de problemas del sistema nervioso, diversos tipos de cáncer y enfermedades cardiovasculares (Villaseñor-Aguilar et al., 2023).

De acuerdo con Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, (2024), durante el 2022, los países con mayor producción son China con 323.215.604,8 ton, seguido de India (101.191.000 ton), Turquía (64.291.263 ton), Estados Unidos de América (55.045.376 ton), Egipto (32.750.902,91 ton), Italia

(30.604.790 ton), España (22.488.380 ton), México (21.325.760.28 ton) e Irán (19.687.035,83 ton).

Existen varios factores tanto bióticos como abióticos que pueden afectar negativamente la producción de tomate. Con relación al efecto de la temperatura, aunque las plantas de tomate se pueden cultivar en una amplia gama de condiciones climáticas, estas son extremadamente sensibles a las condiciones cálidas y húmedas, pues el cuajado de frutos es interrumpido por temperaturas superiores a 26/20 °C día/noche, respectivamente, y a menudo se detiene por completo por encima de 38/27 °C día/noche (Quamruzzaman et al., 2023).

De la misma manera, todas las hortalizas muestran una respuesta a la aplicación de micro y macronutrientes, pues al mantener un nivel adecuado de nutrientes en el suelo o en las aplicaciones foliares, se puede mejorar la calidad y el rendimiento del tomate (Sharma y Kaur, 2023).

De acuerdo con Agaba et al. (2023), el tomate es una hortaliza de alto rendimiento que requiere grandes cantidades de fertilizantes para su adecuado establecimiento, crecimiento y rendimiento, sin embargo, la frecuente aplicación de fertilizantes químicos provoca efectos negativos en el suelo, constituyéndose en uno de los factores limitantes de la producción agrícola sostenible. La mayoría de los agricultores no tienen el conocimiento adecuado sobre las dosis recomendadas que deben utilizar de fertilizantes químicos, lo que lleva a la aplicación de grandes cantidades de fertilizantes químicos, provocando un desequilibrio de nutrientes en el suelo (N. S. Verma et al., 2023).

Dada las altas exigencias de nutrientes en el cultivo de tomate, los agricultores aplican elevadas cantidades de nutrientes en el suelo, causando problemas de desequilibrios de nutrientes en el suelo. Así, mediante la técnica de análisis de nutrientes mediante el extracto celular de pecíolo (ECP) es posible cuantificar la cantidad de nutrientes existente en la savia, lo cual puede relacionarse con el contenido de nutrientes existentes en el suelo o cualquier otro sustrato y así poder realizar un ajuste en el plan de nutrición.

La aplicación de esta técnica se obtiene información precisa y en pocos minutos sobre la cantidad nutrientes acumulados en la savia de cualquier órgano de la planta y

así se puede detectar cualquier desequilibrio de un nutriente, lo cual podría afectar a otros nutrientes en el suelo y afectar el rendimiento. Por ejemplo, el potasio (K^+) compite directamente con la concentración de calcio (Ca^{2+}), sodio (Na^+) o magnesio (Mg^{2+}), por lo que un exceso de este nutriente afecta negativamente a la asimilación del resto.

Además, la concentración de nutrientes varía de acuerdo con la fase fenológica o de crecimiento del cultivo, por lo que el uso de la determinación de nutrientes el extracto celular de pecíolo permitiría un uso más racional de los fertilizantes en el cultivo, lo que contribuiría, por una lado, a disminuir los costos de producción y, por otro lado, a hacer un uso más eficiente de los fertilizante, disminuyendo los efectos negativos en las características físico-químicas del suelo, así como en la biodiversidad del suelo.

El método ha dado excelentes resultados para interpretar problemas sobre deficiencias y excesos en la nutrición, incidencias de la salinidad, optimización de la fertirrigación para diferentes suelos y sustratos, etc.

Es por ello que, se requiere realizar estudios que permitan determinar las cantidades adecuadas de aplicación de nutrientes, de acuerdo con los requerimientos del cultivo. En este sentido, en el presente estudio se plantea determinar el requerimiento de fertilización de tomate (*Solanum lycopersicum*) variedad Extremo a partir del análisis del extracto de savia.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Determinar el índice de requerimiento de fertilización de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) variedad Extremo a partir del análisis del extracto de savia

1.3.2. Específicos

- ✓ Estimar las curvas de absorción para establecer modelos de crecimiento en tomate var. Extremo.

- ✓ Determinar el contenido de NO_3 , K_2O , Na y Ca en la etapa vegetativa (30 días), reproductiva (90 días) y productiva (120 días) después del trasplante.
- ✓ Determinar los niveles de NO_3 , K_2O , Na y Ca en la solución del suelo en el cultivo de tomate Extremo *in situ*.

CAPÍTULO II

2.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

El análisis rápido de la savia como método de evaluación del contenido nutricional ha sido ampliamente usado en diferentes cultivos, sin embargo, ha sido más frecuentemente usado en cultivos de hortalizas, mientras que existen menos investigaciones en cultivos perennes. Mota et al. (2024) evaluaron el contenido de nutrientes de la savia del pecíolo en manzana 'Gala', mediante el método rápido utilizando un reflectómetro y se comparó con el método estándar. Para ello, se determinaron los niveles de macro y micronutrientes en hojas y la savia del pecíolo a los 45 y 90-110 días después de la floración (DDF), observándose una correlación entre la determinación con el reflectómetro y los análisis de laboratorio estándar, con coeficientes de determinación altos para el nitrógeno en forma de nitrato ($R^2 = 0,70$), potasio ($R^2 = 0,71$), calcio ($R^2 = 0,72$) y magnesio ($R^2 = 0,78$). Con estos resultados se demostró que el uso del reflectómetro es una herramienta de diagnóstico en tiempo real para monitorear el estado de los nutrientes durante el ciclo de crecimiento de un cultivo, principalmente en lo referido a los macronutrientes más importantes relacionados con la calidad del fruto.

Lu et al. (2022) evaluaron la precisión de la cuantificación de los niveles de nitrato (NO_3^-), potasio (K^+) y calcio (Ca^{2+}) mediante el uso de medidores de iones compactos en la savia del pecíolo frambuesa roja (*Rubus idaeus* L.) y se comparó con las concentraciones totales de nitrógeno (Nt), potasio (K) y calcio (Ca) en el tejido foliar medidas mediante análisis convencional de nutrientes en tejidos. Además, determinaron la relación entre la concentración de NO_3^- y Nt en la savia del pecíolo con las variables de crecimiento y producción de la planta. Se aplicó urea en el suelo a tres dosis baja (34 kg N/ha), media (67 kg N/ha) y alta (101 kg N/ha) y un control sin aplicación y se tomaron hojas enteras cuatro veces al año para analizar las concentraciones de nutrientes en la savia de pecíolo utilizando medidores de compactación y pruebas de tejido convencionales. Los autores demostraron que no existieron diferencias en las concentraciones de NO_3^- , K^+ y Ca^{2+} debido a la dosis de fertilizante N en la savia del pecíolo en el tejido foliar, pero no se encontraron fuertes correlaciones entre las concentraciones de nutrientes en la savia del pecíolo y en el tejido foliar.

De manera similar, Almeida et al. (2020) evaluaron la relación entre los contenidos de NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , PO_4^{3-} y NH_4^+ en la savia del pecíolo de manzano, medidos con las tiras de prueba y métodos de laboratorio para evaluar la posibilidad de utilizar esta herramienta con precisión en el análisis de savia in situ. Se recolectaron muestras de pecíolo de seis huertos de manzanos, se congelaron y prensaron. La dilución fue obligatoria para la determinación de todos los nutrientes, excepto NO_3^- . El factor de dilución varió con la etapa del ciclo anual. Los niveles de NO_3^- , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} siguieron el mismo patrón durante el ciclo de crecimiento, con ambos métodos. El análisis de regresión arrojó coeficientes de determinación altos para NO_3^- ($R^2 = 0,85$), K^+ ($R^2 = 0,86$), Mg^{2+} ($R^2 = 0,81$) y Ca^{2+} ($R^2 = 0,95$), entre RQflex® y métodos de laboratorio. No se encontró una relación equivalente para la determinación de amonio y fosfato. Estas pruebas pueden ser herramientas útiles para el manejo racional de la fertilización, principalmente en huertos de manzanos de alta densidad. El contenido de calcio en hojas de 45 DAFB se correlacionó bien con el contenido de calcio en la savia en el mismo momento. Acceder al contenido de nutrientes, en lugar del análisis foliar, aumentaría la oportunidad de ajustar la fertilización, a lo largo del ciclo de crecimiento.

Debido a la importancia del fósforo (P) en el crecimiento y el rendimiento de la soja es necesario hacer monitoreos continuos de su absorción y el transporte. En este sentido, Yamamura et al. (2024) investigaron a través de un análisis de la savia del xilema la absorción y transporte del PO_4 en plantas de soja noduladas tratadas con concentraciones de PO_4 de 0, 50 y 250 μM durante 1, 3, 7 y 15 días. Se observó que la concentración de fosfato disminuyó significativamente en la savia del xilema en plantas a las que no se proporcionó este nutriente, mientras que en plantas tratadas con la mayor concentración (250 μM) las concentraciones de PO_4 aumentaron en la savia del xilema a los 7 y 15 días. Adicionalmente, se observó el incremento en la absorción de PO_4 de acuerdo con la concentración suministrada y este nutriente también fue acumulado en las raíces de plantas de soja. De acuerdo con los resultados, la cantidad de PO_4 acumulada en la savia del xilema reflejó los niveles de deficiencia de P en tiempo real, por lo que, los autores concluyen que este índice puede ser usado como un indicador confiable para el diagnóstico de la deficiencia de P.

En España, Llanderal et al. (2019) condujeron un estudio para determinar la variabilidad espacial y temporal de los nutrientes en la savia del pecíolo en un cultivo

de tomate bajo invernadero y determinar el número de submuestras para una muestra representativa. El experimento consistió en la selección de 20 puntos de muestreo. Semanalmente se recolectaron pecíolos de hojas completamente expandidas para determinar las concentraciones de Cl^- , NO_3^- , H_2PO_4^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . Los resultados mostraron que las variaciones de las concentraciones de NO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} y K^+ en la savia fueron afectadas por la distribución espacial, mientras que las concentraciones de SO_4^{2-} y Mg^{2+} en la savia fueron afectadas por la distribución temporal. La variabilidad espacial del experimento podría estar relacionada con la radiación, el rendimiento y el antagonismo entre nutrientes, mientras que la variabilidad temporal podría estar relacionada con la etapa fenológica de la planta y el antagonismo entre nutrientes. Los autores concluyeron que el número sugerido de submuestra de pecíolos oscila entre 25 y 113, dependiendo del nutriente.

Llenderal et al. (2018) llevaron a cabo un ensayo con el objetivo de estudiar la variabilidad de las concentraciones de aniones y cationes en las diferentes muestras de pecíolos: hojas jóvenes (HJ), hojas maduras (HM) y hojas envejecidas (HV) de plantas de tomate. En cada planta se recolectaron muestras de pecíolo a los 135 días después del trasplante (DDT) para determinar la cantidad de cloruro, nitrógeno en forma de nitrato, fósforo en forma de fosfato, sulfato-azufre, sodio, potasio, calcio y magnesio (Cl^- , NO_3^- , H_2PO_4^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}). Los resultados mostraron que la selección de pecíolo de muestra en el cultivo de tomate no modificó las concentraciones de Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} y Na^+ , mientras que las concentraciones de NO_3^- , K^+ , Mg^{2+} y H_2PO_4^- mostraron una gran variabilidad debido a la selección del pecíolo de la muestra, por lo que es necesario tener cuidado con la selección de la muestra.

Debido a que la eficacia del método del electrodo selectivo de iones (ESI) ha sido cuestionada en cuanto a la exactitud para predecir la concentración de nitrógeno en el tejido foliar (CNTF) o el rendimiento del cultivo a partir de la medida de la concentración de nitrógeno en forma de nitrato en la savia del pecíolo (CNSP), Carson et al. (2016) evaluaron relación entre CNSP, LTNC y rendimiento comercializable de tomate (*Solanum lycopersicum*), para lo cual desarrollaron dos ensayos utilizando riego por filtración y fertilizantes de liberación controlada (FLC). En la investigación se recolectaron seis hojas maduras cada 15 días para medir CNSP y CNTF. Se observó que la CNSP y CNTF se correlacionaron ($P = 0,0001$, $r = 0,38$), aunque no de manera significativa y ambos disminuyeron durante las temporadas de crecimiento, pero

CNSP fue afectado por el clima. CNSP y CNTF se correlacionaron negativa y positivamente con el rendimiento de los cultivos en la mayoría de las correlaciones, respectivamente. Las correlaciones de FLC y fertilizantes solubles (SF) por separado no mejoraron las relaciones. La medición de CNTF puede ser una herramienta de manejo de nutrientes más confiable en comparación con la CNSP medida mediante un ESI.

En Italia, Farneselli et al. (2014) realizaron un experimento de campo para evaluar la confiabilidad del método de determinación de la savia del pecíolo para determinar el nivel de nitrógeno (N) en el tomate procesado. El cultivo fue fertilizado con diferentes dosis de N y frecuencias de fertiirrigación-riego. Las concentraciones de N reducido y N en forma de nitrato fueron determinadas mediante análisis de laboratorio a los 30, 42, 57, 71 y 84 días después del trasplante. En cada fecha de muestreo, la evaluación del estado nutricional de N resultante de la prueba de savia se comparó con el estado real de N de la planta determinado por el índice de nutrición de nitrógeno (INN). Los resultados de la prueba de savia coincidieron con las indicaciones del INN para aproximadamente 2/3 del ciclo del cultivo, que representa el momento crucial para el manejo de fertilizantes nitrogenados en tomate. El coeficiente de correlación de los dos métodos fue, en promedio, 0,854 y fue estadísticamente significativo en todo el período de muestreo. La concentración de nitrato en la savia del pecíolo proporcionó una buena concordancia con los análisis de laboratorio en todo el rango de concentraciones de N-nitrato (NO₃) examinadas.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.3.1. El cultivo de tomate: características e importancia económica

El tomate (*Solanum lycopersicum* Mill.) pertenece a la familia Solanaceae, la cual incluye más de 3000 especies entre las cuales están el pimiento, la papa, la berenjena y el tabaco (Knapp, 2002). En el caso del tomate, se considera que su centro de origen se ubica en la región andina, que hoy comprende Chile, Bolivia, Ecuador, Colombia y Perú; sin embargo, el sitio original de domesticación no está claro, pero se ha postulado que su centro de domesticación sea en México mientras que su centro de domesticación esté en Perú (Peralta y Spooner, 2007). Originalmente, los tomates

eran bayas del tamaño de un guisante, pero la domesticación y el fitomejoramiento han dado como resultado un mayor tamaño de la fruta (Soyk et al., 2017).

El tomate sigue siendo una de las hortalizas más importante a nivel mundial debido a su producción generalizada a nivel mundial, así como a su alto valor comercial, nutricional y además desde el punto de vista científico pues es usada como planta modelo en la investigación (Soyk et al., 2017). El tomate, no sólo sirve como hortaliza en la nutrición, sino también como alimento funcional que protege a los humanos contra enfermedades crónico-degenerativas como la diabetes, complicaciones microvasculares, enfermedades virales y cáncer, lo cual se atribuye en gran medida a su composición de fitonutrientes (Yong et al., 2023).

La producción mundial de tomate se ubicó en 924,703,203.4 ton en 2022, siendo los principales países productores China con 323,215,604.8 ton, seguido de India (101,191,000 ton), Turquía (64,291,263 ton), Estados Unidos de América (55,045,376 ton), Egipto (32,750,902.91 ton), Italia (30,604,790 ton), España (22,488,380 ton), México (21,325,760.28 ton) e Irán (19,687,035.83 ton). (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2024) (Fig. 1).

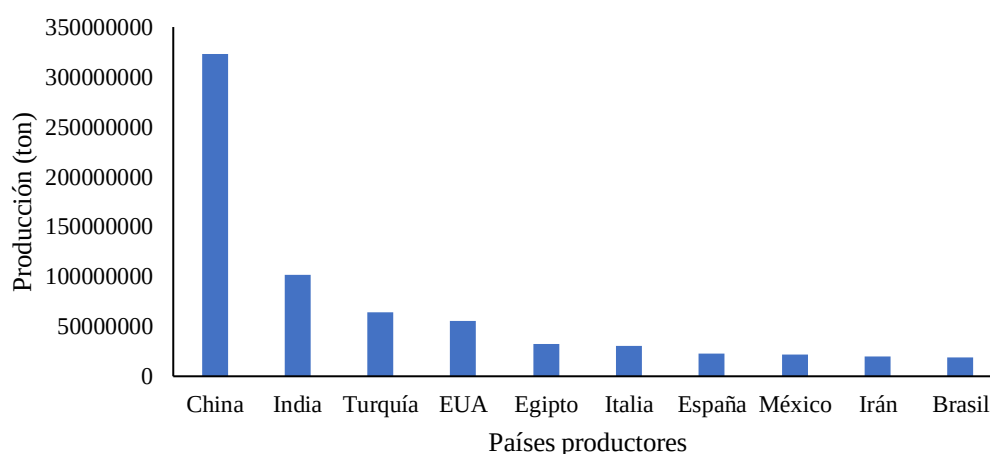


Figura 1. Producción de los principales países productores de tomate en el 2022 (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2024)

Por otra parte, los máximos rendimientos fueron registrados en China (55.1 ton/Ha), seguido de India (40.8 ton ha⁻¹) y Nigeria (38.8 ton ha⁻¹), en el resto de los países el rendimiento varió de 4.0 a 8.4 ton ha⁻¹ (Fig. 2).

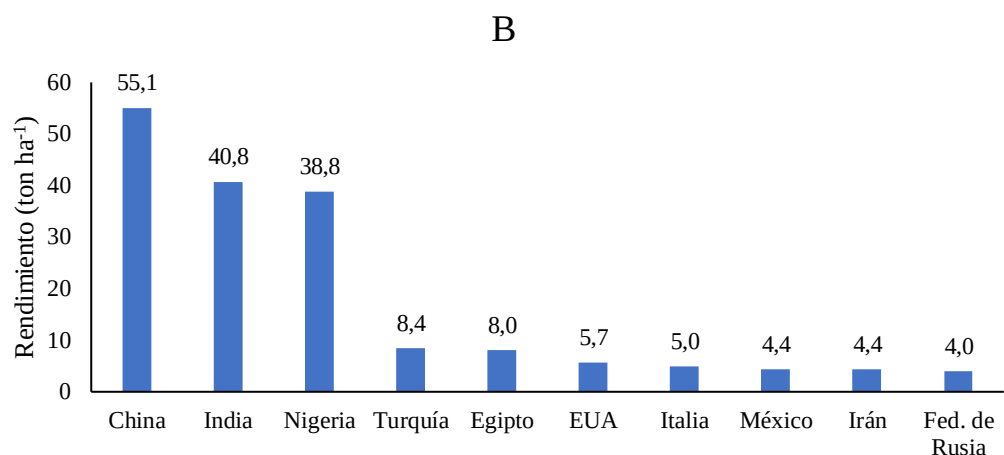


Figura 2. Rendimiento de los principales países productores de tomate en el 2022 (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2024)

2.3.2. Características edafoclimáticas del cultivo de tomate

Condiciones edafoclimáticas de la zona y requerimientos edafoclimáticas de *S. lycopersicum* se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Requerimientos edafoclimáticos del tomate

Variable edafoclimática	Descripción
Temperatura	18 – 27 °C, óptimo entre 20-24 °C. Límite máximo para el crecimiento 30 °C. Temperatura para la germinación: mínima: 10 °C, óptima y máxima de 25-33 °C
Humedad relativa	< 60%
pH	5.5 – 6 (máximo tolerado de 8)
Salinidad	0,75 – 2,0 mmho cm ⁻²
Precipitación	1500 – 2000 mm año ⁻¹
Tipo de suelo	Franco arcilloso, con buen drenaje y sin nivel freático
Altitud	1000 – 2000 msnm
Contenido de materia orgánica	> 3.5%

Fuentes: (INIA, 2012; Salazar, 2019)

2.4. Etapas fenológicas del tomate

De acuerdo con Cardoso et al. (2021), las etapas de crecimiento fenológico del tomate utilizando la escala BBCH (*Biologische Bundesantalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie*) se distinguen de 7 etapas principales: germinación, desarrollo foliar, formación de brotes laterales, aparición de la inflorescencia, floración, desarrollo del fruto, madurez del fruto.

Germinación: la germinación incluye una serie de etapas que van desde la semilla seca, el inicio de la imbibición, imbibición de la semilla, emergencia de la radícula, emergencia del hipocótilo con cotiledones de la semilla y la emergencia de los cotiledones por encima de la superficie del suelo (Fig. 2A-B).



Figura 3. Etapa de germinación según la escala BBCH. (A) Aparición del hipocótilo con cotiledones de la semilla y (B) aparición de cotiledones encima de la superficie del suelo.

Fuente: Cardoso et al. (2021)

2.4.1. Desarrollo foliar

Esta etapa comienza cuando los cotiledones ya están completamente visibles y está determinada por el número de hojas basales visibles. Así, continua con la formación del primer par de hojas verdaderas (> de 1 cm) hasta el noveno par de hojas y luego ocurre la aparición de los brotes laterales formados por encima del 70%, (Figura 2B). Estas 2 primeras hojas deben ser rayadas cuando. Por el contrario, las

hojas de estadios posteriores pueden considerarse visibles cuando miden más de 2 cm (Martinelli et al., 2015).

2.4.2. Formación de brotes laterales

Se caracteriza por el desarrollo de dos a tres brotes laterales apicales primarios en forma de Y con los respectivos brotes laterales apicales secundarios, terciarios y de orden superior (Acosta-Quezada et al., 2016).

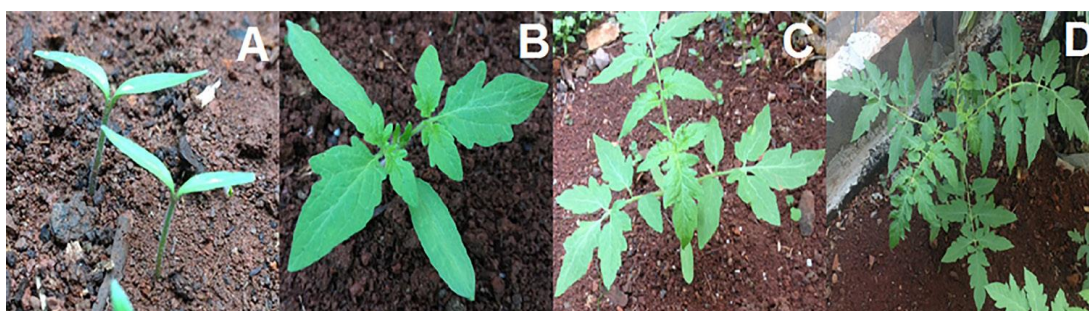


Figura 4. *Etapa de desarrollo foliar según la escala BBCH. (A) Cotiledones completamente desarrollados, (B) primeras hojas elípticas visibles, (C) primer par de hojas verdaderas visibles y (D) cuarto par de hojas verdaderas visibles.*

Fuente: Cardoso et al. (2021)

2.4.3. Aparición de la inflorescencia

Se inicia con la aparición de la primera inflorescencia visible con el botón floral claramente cerrado o más inflorescencias visibles (Fig. 4).



Figura 5. *Etapa de aparición de la inflorescencia según a la escala BBCH*

Fuente: Cardoso et al. (2021)

2.4.4. Floración

Está determinada por la apertura de la primera flor de cada inflorescencia y continúa con la apertura de la primera flor de las inflorescencias posteriores (Cardoso et al., 2021) (Fig. 5A-C). La floración involucra una secuencia de pasos con cambios profundos, estando altamente influenciada por las condiciones ambientales, y las plantas tienen la capacidad de detectar variaciones en el ambiente permitiendo determinar que el evento ocurra dentro de condiciones favorables (Schmidt et al., 2017).



Figura 6. *Etapas de crecimiento principal 6: Floración según escala BBCH. (A) primeras flores abiertas, (B) inicio de la floración, aproximadamente el 10% de las flores se abren y (C) fin de la floración.*

Fuente: Cardoso et al. (2021)

2.4.5. Desarrollo del fruto

Esta etapa inicia con la formación del primer fruto (Ramírez y Davenport, 2019). La regulación genética del desarrollo del fruto comienza en el meristemo floral, donde se determina la arquitectura y organización de este tejido, y continúa hasta las últimas etapas de desarrollo antes de la maduración del fruto (Fig. 6).

En la etapa inicial del desarrollo del fruto del tomate, el circuito de retroalimentación CLAVATAWUSCHEL (CLV-WUS) controla la actividad del meristemo y regula el tamaño del meristemo floral, lo que a su vez determina el número final de carpelos en las flores y, por tanto, de lóculos de semillas en los frutos (Quinet et al., 2019).

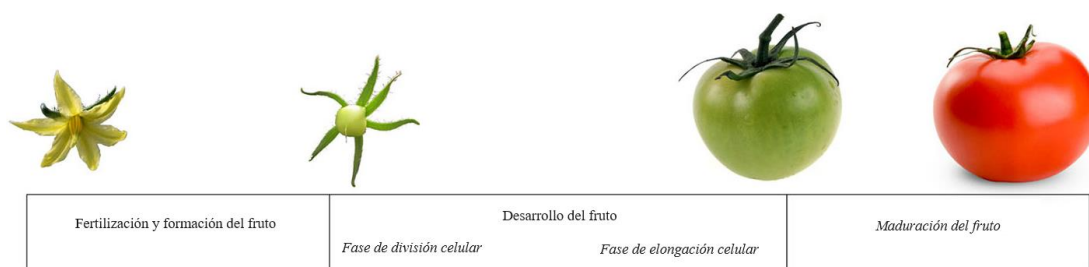


Figura 7. Control genético y hormonal del desarrollo del fruto del tomate. (A) Principales etapas del desarrollo del fruto del tomate

Fuente: Quinet et al. (2019)

2.4.6. Maduración del fruto

La etapa de maduración del fruto define el momento de la cosecha, que se define por el cambio de color debido al contenido de clorofila y carotenoides. El color verde de los frutos inmaduros se atribuye a la clorofila, la cual se comienza a degradar y marca el inicio de la maduración (Cardoso et al., 2021).

En cuanto a la descripción del tomate variedad Extremo se tiene que es una planta de crecimiento indeterminado, de excelente adaptabilidad para su cultivo a campo abierto o en invernaderos, plantas con vigor medio, alta producción y entrenudos cortos (Tabla 2).

Tabla 2. Principales características del tomate variedad Extremo

Variable	Descripción			
Tipo	Indeterminado			
Adaptabilidad	Desde los 800 hasta los 3000 msnm			
Descripción	Frutos de gran tamaño (180 – 200 g) que conservan el calibre incluso en los racimos superiores Alta calidad de frutos con excelente dureza, color y brillo			
Características comerciales	Sabor intenso y agradable y con alto porcentaje de frutos de primera calidad			
Ciclo de vida (días después del trasplante, ddt)	Plantación	ddt a cosecha	Cosecha	Total
	30 días	90 días	90 días	210 días
Rendimiento	100 ton ha ⁻¹ a dos ejes (5 kg planta ⁻¹)			
Densidad de siembra	Se usan una densidad de 20.000 plantas/ha a una distancia de siembra de 1.4 x 0.35 m			

Fuente: etiqueta del producto

2.5. Requerimientos nutricionales

De acuerdo con Sainju et al. (2003), la cantidad y el tipo de nutrientes suministrados al tomate pueden influir no sólo en su rendimiento sino también en su contenido de nutrientes, sabor y calidad de almacenamiento postcosecha, por lo que algunos nutrientes, como N, P, K, Ca, Mg y S, son necesarios en grandes cantidades para el crecimiento y reproducción normales del tomate, otros, como Fe, Cu, Zn, Mn, B, Mo y Cl, se necesitan en pequeñas cantidades.

Como resultado, las plantas de tomate son fertilizadas regularmente con N, P y K y ocasionalmente con Ca y Mg provenientes del encalado para ajustar el pH del suelo y, por lo general, no se aplican otros nutrientes a menos que ocurra algún tipo de deficiencia. Por otra parte, la aplicación de cantidades por encima de lo requerido por la planta puede reducir el rendimiento del tomate, disminuir la eficiencia en el uso de fertilizantes e incrementar el costo de la fertilización, además de provocar degradación de calidad ambiental (Sainju et al., 2003). Por lo tanto, se deben realizar análisis periódicos de muestras de suelo y plantas para determinar la cantidad adecuada de fertilización con el fin de asegurar los mayores rendimientos con bajo costo y menor impacto ambiental.

2.6. El análisis de savia

Actualmente no existe consenso en la comunidad científica sobre la definición de savia, puesto que algunos autores definen la savia como la porción líquida que es extraída del xilema y floema, más los fluidos apoplástico, citosólico y vascular (Llenderal et al., 2019), otros solo consideran a la savia como aquellos fluidos extraídos de los tejidos conductores, ya sea xilema, floema o una mezcla (Padilla et al., 2020); otros describen la savia como los fluidos del xilema y varios consideran la savia simplemente como los fluidos del floema obtenidos mediante estilectomía de insectos (Palmer y Stangoulis, 2018).

Pero, independientemente de la definición adoptada, los nutrientes que se encuentran en la savia están fácilmente disponibles para el desarrollo de la planta, por lo tanto, el análisis de savia se compara con un “análisis de sangre” de la planta, por lo que el análisis de la savia es una opción para determinar el estado de los nutrientes de las plantas (Esteves et al., 2021).

Los resultados del análisis de savia dependen en gran medida de la metodología elegida, ya que no ha sido estandarizada y aun no existe acuerdo en la comunidad científica sobre la metodología de análisis para la recolección de muestras, el tipo de tejido (pecíolos, puntas de los brotes y láminas de las hojas) y el método de extracción de savia y análisis (Padilla et al., 2020). Sin embargo, de acuerdo con Esteves et al. (2021) en general existen tres pasos principales en el análisis de savia: recolección de muestras, extracción de savia y análisis de savia (Fig. 8).

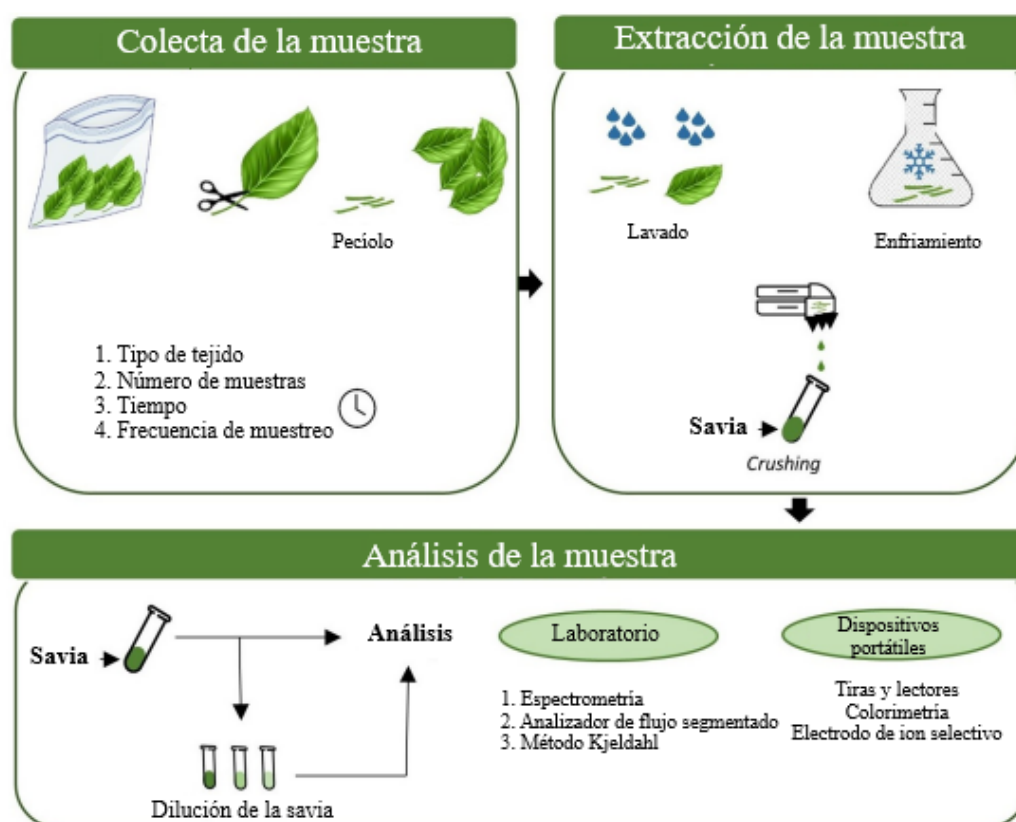


Figura 8. Metodologías de análisis de savia: recolección de muestras, extracción de muestras y análisis de muestras. Los procedimientos dentro de cada etapa no son necesariamente una secuencia sino diferentes enfoques utilizados en varios estudios. Fuente: Padilla et al. (2020).

El análisis de la savia de las plantas proporciona una determinación temprana del estado de los nutrientes de las plantas, ya que se basa en información en tiempo real y así los niveles de minerales de las plantas, las deficiencias y los excesos nutricionales podrían determinarse antes de que causen algún daño al desarrollo de las plantas y, en consecuencia, al rendimiento de los frutos (Farneselli et al., 2014). Además, el análisis de savia brinda a los productores la oportunidad de ajustar la

fertilización y aplicar la cantidad específica de nutrientes necesarios, no solo para la nutrición de las plantas sino también para mejorar la sostenibilidad ambiental (Esteves et al., 2021).

De acuerdo con Padilla et al. (2020) existen varios enfoques basados en el monitoreo de suelos y plantas que pueden ayudar a mejorar el manejo de la fertilización con nitrógeno, que incluyen monitoreo del suelo, métodos destructivos (análisis de N de tejido, análisis de nitrato de savia del pecíolo (NO_3) y no destructivos (sensores ópticos) basados en cultivos, y sistemas portátiles de análisis rápido. Los sensores ópticos más prometedores para el manejo del N en la producción de hortalizas son los medidores de clorofila y los sensores de reflectancia del dosel. Los métodos basados en cultivos son generalmente indicadores sensibles del estado del N en una amplia gama de cultivos de hortalizas, sin embargo, tienden a tener una sensibilidad reducida cuando el suministro de N es excesivo.

Por otra parte, una característica notable de los métodos de monitoreo del suelo (por ejemplo, el método holandés de extracción de agua y suelo 1:2, monitoreo de la solución del suelo) es que pueden detectar el exceso de suministro de N, mientras que la combinación de monitoreo de cultivos y suelos proporciona a los productores de hortalizas herramientas para detectar la deficiencia y el exceso de suministro de N en los cultivos (Padilla et al., 2020).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Ubicación

El presente estudio fue realizado en la Parroquia Yaruquí, perteneciente al cantón Quito, provincia de Pichincha, ubicada a altitud promedio de 2.500 m.s.n.m. (0°09'45"S 78°19'01"W).

3.2. Equipos y materiales

3.2.1. *Material experimental*

Plántulas de tomate variedad Extremo

3.2.2. *Materiales*

Bomba de fumigación

Herramientas de labores culturales

Tijeras Felco N° 2

Botas

Etiquetas

Palos de madera

Baldes

3.2.3. *Equipos*

Equipo Horiba

3.3. Tipo de investigación

El estudio fue conducido bajo un enfoque de investigación de tipo experimental, la cual implica la manipulación de una o más variables independientes (supuestas causas antecedentes) con el fin de verificar su efecto sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos consecuentes) dentro de una situación controlada por el investigador (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018).

3.4. Prueba de Hipótesis

H1: El uso del sistema de electrodos sensibles a iones específicos (Horiba) funciona como método de estimación de los requerimientos nutricionales del tomate variedad Extremo.

3.5. Recolección de información:

Los datos fueron tomados en una plantación de tomate variedad extremo, establecida bajo cobertura. Se establecieron 400 plantas sembradas a una distancia entre plantas de 0,30 m y 1,20 m entre hileras (Fig. 9).

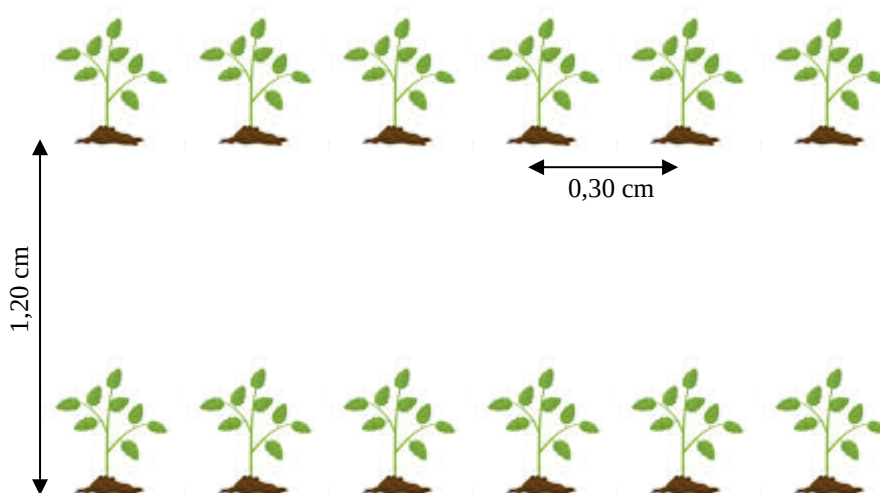


Figura 9. Esquema de distancia de siembra del tomate Extremo

Los nutrientes fueron aplicados mediante fertirrigación con un sistema de riego por goteo con un caudal de 3 L/h por emisor. La solución nutritiva inicial fue preparada de acuerdo a lo recomendado por Llanderal et al. (2018), quienes sugieren una solución con 6.44 mmol/L de cloruro (Cl^-), 13,00 mmol L^{-1} de nitrato (NO_3^-), 1,26 mmol L^{-1} de fosfato (H_2PO_4^-), 6,82 mmol L^{-1} de sulfato (SO_4^{2-}), 7,62 mmol L^{-1} de potasio (K^+), 5,50 mmol L^{-1} de calcio (Ca^{2+}), 3,90 mmol L^{-1} de magnesio (Mg^{2+}) y 7,54 mmol L^{-1} de sodio (Na^+), una conductividad eléctrica (CE) de $\approx 3,40 \text{ dS m}^{-1}$ y un valor de pH de ≈ 5.80 .

Se realizaron aplicaciones edáficas quincenales de fertilizantes a base de N, P, K, Mg y Ca, mientras que se suplementó B, Zn, Fe, Mo, S, Mg y Ca en aplicaciones

foliares mensuales para garantizar una condición nutricional sin límites de absorción. Las cantidades fueron calculadas en función a las necesidades de acuerdo con la etapa de crecimiento del cultivo.

El contenido de nutrientes fue medido mediante el uso del sistema de electrodos sensibles a iones específicos, denominado medidor LAQUAtwin (Horiba, Kyoto, Japón) (Padilla et al., 2020). En la parte aérea de la planta se cuantificaron los niveles de los macronutrientes: Nitrógeno (NO_3), Fósforo (F), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) según la metodología de Farneselli et al. (2014). En el análisis de suelo se consideró el contenido de Nitrógeno, Potasio, Fósforo, y micronutrientes Hierro (Fe), Boro (B), Cobre (Cu), Manganeseo (Mn), Zinc (Zn), pH.

La metodología empleada siguió lo señalado por Hochmuth y Hochmuth (2022), tal como se describe a continuación:

1. Es necesario estandarizar el tiempo, la temperatura y las condiciones climáticas en las que se realiza el muestreo para obtener resultados consistentes, debido a que los niveles de nutrientes en la planta pueden variar a lo largo del día.
2. Se recolectó los pecíolos de hojas maduras, las cuales han alcanzado el tamaño máximo y hayan cambiado de un color verde claro juvenil a un color verde oscuro. La figura 10 muestra la parte del peciolo que fue usada para el muestreo.

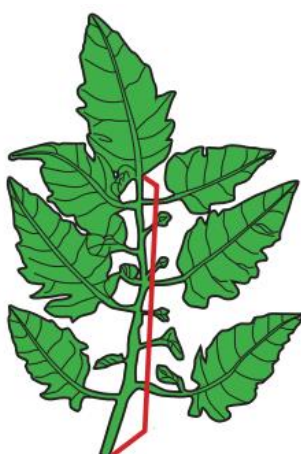


Figura 10. Dibujo de un peciolo de hoja de tomate para mostrar el sitio para la toma de muestras

Fuente: Hochmuth y Hochmuth (2022)

3. Se tomó muestras de diferentes plantas para asegurarse de que la muestra de savia sea representativa del campo o del área que se está analizando. Los pecíolos se pueden almacenar a temperatura ambiente en una bolsa plástica durante hasta 2 horas o, en el caso de requerir un almacenamiento más prolongado, los pecíolos enteros frescos son preservados en hielo dentro de una bolsa plástica hasta por 8 h. Los pecíolos fríos se deben calentar a temperatura ambiente antes de triturarlos para que las diferencias de temperatura entre la savia y el medidor no afecten los resultados.
4. Se picó y mezcló los pecíolos y tomar una submuestra de pecíolos picados para triturarlos.
5. Se exprimió la savia de los pecíolos con un prensador y se midió la savia fresca con los medidores de bolsillo LAQUAtwin entre 1 y 2 minutos después de presionar. Finalmente se hizo el registro de las lecturas.

Las mediciones fueron hechas a los 30 (etapa vegetativa), 60 (etapa reproductiva) y 120 (etapa productiva) días después del trasplante y se colectaron hojas completamente maduras de seis plantas en la fila central de cada parcela. La savia de la planta fue extraída de los pecíolos frescos considerados desde la base de la hoja hasta el primer folíolo (Carson et al., 2016).

3.6. Procesamiento de la información y análisis estadístico:

El ensayo fue conducido en un diseño de bloques al azar con 5 repeticiones y todas las variables fueron sometidos a análisis de varianza y aquellas variables que muestren diferencias significativas fueron comparadas mediante prueba de medias según Tukey ($p < 0,05$) usando el paquete estadístico Statistix para Windows, versión 10.0.

3.7. Variables respuesta

3.7.1. *Concentración de nutrientes en plantas de tomate:*

El contenido de nutrientes fue medido mediante el uso de un sistema de electrodos sensibles a iones específicos (medidor LAQUAtwin, Horiba), el cual es un

sistema portátil de análisis rápido en la savia del pecíolo que proporciona un resultado casi inmediato después de la recolección de la muestra (Padilla et al., 2020).

3.7.2. Concentración de nutrientes en la solución del suelo:

Se tomó una muestra de suelos al final del ensayo para realizar un análisis en un Laboratorio de análisis de suelo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Curvas de absorción y contenido de macro y micronutrientes en los diferentes etapas de crecimiento del cultivo de tomate variedad Extremo

Las curvas de absorción y el contenido de macro y micronutrientes en los distintas de crecimiento del cultivo, en general, mostraron una alta correlación positiva entre las determinaciones de laboratorio realizadas mediante métodos convencionales y las mediciones rápidas obtenidas con el uso de electrodos específicos sensibles a iones (medidor LAQUAtwin). Los coeficientes de determinación (R^2) oscilaron entre 0,724 para la cuantificación de fósforo, hasta 0,982 para la determinación de nitrógeno (Tabla 3). Los valores positivos de R^2 reflejan una tendencia conjunta en ambas mediciones.

Tabla 3. Coeficientes de correlación lineal entre las mediciones de nutrientes por métodos convencionales y método rápido con el medidor LAQUAtwin

	Método usado	Días después del trasplante			Coeficiente de determinación
		30	60	120	
Nitrógeno (%)	Convencional	4,22 a	4,72 a	2,92 b	0,982
	Rápido	4,57 a	4,88 a	2,75 b	
Fósforo (%)	Convencional	0,61 b	0,80 a	0,50 b	0,724
	Rápido	0,59 c	0,85 a	0,64 b	
Potasio (%)	Convencional	4,18 c	5,07 a	4,62 b	0,939
	Rápido	4,52 b	5,12 a	4,95 a	
Calcio (%)	Convencional	3,37 c	4,60 b	6,65 a	0,884
	Rápido	4,10 c	5,90 b	6,75 a	
Magnesio (%)	Convencional	0,80 b	1,20 a	0,74 b	0,941
	Rápido	0,89 b	1,10 a	0,77 c	

Los valores promedio en una fila, seguidos de letras diferentes, indicaron diferencias significativas según la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($p < 0,05$).

En un estudio destinado a evaluar el contenido de nutrientes en la savia del pecíolo mediante distintos métodos, incluyendo el método estándar de laboratorio y

un método rápido basado en reflectometría, Mota et al. (2024) reportaron altos coeficientes de determinación (R^2) entre ambos métodos para N-NO_3^- , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , con valores de 0,703; 0,705; 0,715 y 0,780, respectivamente. Según estos autores, estos resultados indican que el reflectómetro constituye una herramienta eficaz de diagnóstico en tiempo real para el monitoreo del estado nutricional durante el ciclo de crecimiento, en particular para nutrientes esenciales que influyen en el crecimiento del cultivo y la calidad del fruto.

El contenido de macronutrientes primarios (N, P y K) evidenció fluctuaciones en función de la etapa de crecimiento del tomate. En el caso del Nitrógeno, la mayor absorción se registró a los 60 y 120 días después del trasplante (ddt), que se correspondieron a la etapa de crecimiento reproductivo y productivo, respectivamente, con un incremento de 44.5 y 61.6 % más que en la etapa de crecimiento vegetativo, mientras que con relación al fósforo (P), el incremento fue de 22.0 y 60.0 % (Figs. 11-12). En cuanto al potasio, la mayor absorción ocurrió en la fase de crecimiento vegetativo, mientras que en fase reproductiva se evidenció una ligera disminución de 9.5 % y luego aumentó en un 17,6 % (Fig. 13).

El nitrógeno es un macronutriente esencial para el desarrollo de las plantas, ya que impulsa el crecimiento de hojas, tallos y raíces, promoviendo un vigoroso crecimiento vegetativo (Leghari et al., 2016). Las mayores demandas de este nutriente se presentan, por tanto, en las etapas iniciales del crecimiento del cultivo. El análisis de los requerimientos nutricionales de un cultivo permite evaluar la eficacia de la fertilización nitrogenada a lo largo de las fases de crecimiento y desarrollo de la planta, lo cual proporciona información fundamental para optimizar las dosis de aplicación (Deng et al., 2024).

Durante la fase inicial de crecimiento del cultivo (germinación y desarrollo de plántulas), las cantidades de nitrógeno aplicadas deben ser moderadas, dado que la planta aún no ha desarrollado un sistema radical adecuado. A medida que progresa el desarrollo de hojas y raíces, la absorción y utilización del nitrógeno aumentan significativamente, lo que conlleva a un incremento en la tasa fotosintética. Este aumento en la fotosíntesis favorece la actividad fisiológica de la planta, mejorando la eficiencia en el uso del nitrógeno (Leghari et al., 2016).

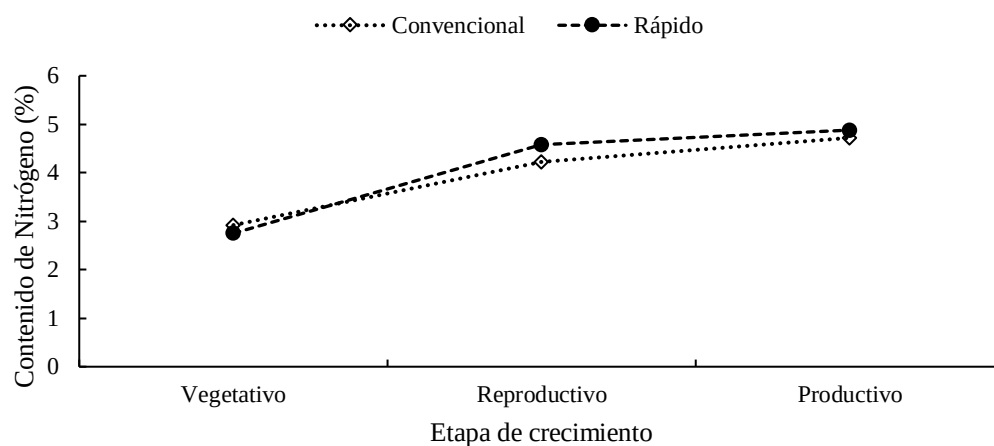


Figura 11. Variación en la absorción de nitrógeno de acuerdo con la etapa de crecimiento en tomate variedad Extremo

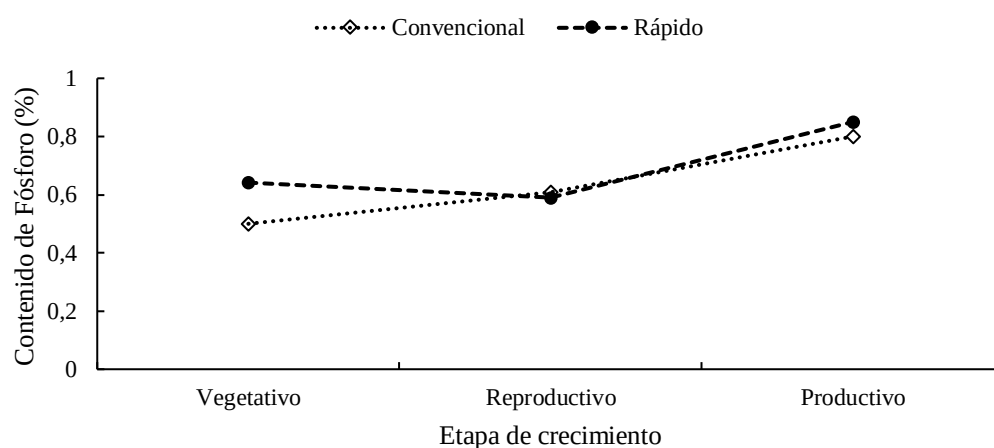


Figura 12. Variación en la absorción de fósforo de acuerdo con la etapa de crecimiento en tomate variedad Extremo

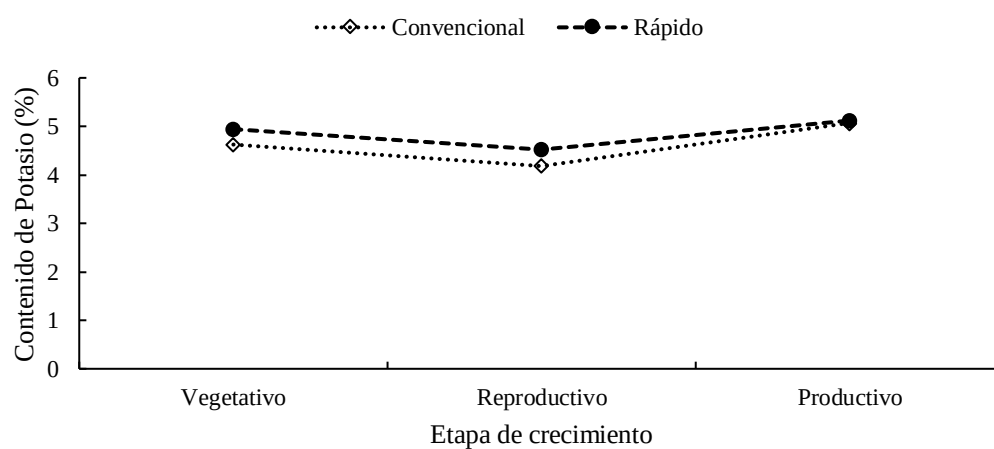


Figura 13. Variación en la absorción de potasio de acuerdo con la etapa de crecimiento en tomate variedad Extremo

Similar al nitrógeno, la aplicación de fósforo durante la fase de crecimiento del cultivo es una práctica común, sin embargo, la aplicación de este nutriente de forma empírica ha provocado su acumulación excesiva en los suelos agrícolas, por lo que es importante la adopción de tecnologías innovadoras que mejoren la eficiencia y manejo de la fertilización con fósforo, tales como uso de microorganismos solubilizadores, aplicación de fertilizantes de liberación lenta/controlada, formulación de fertilizantes foliares y realizar mediciones del nivel de absorción de este nutriente con equipos de medición rápida (Khan et al., 2023).

El fósforo es un componente estructural y funcional importante de moléculas biológicas como ácidos nucleicos, proteínas, ATP, NADPH, vitaminas, etc., además de desempeñar un papel importante en la regulación de los sistema de señalización en la planta (Malhotra et al., 2018). En tal sentido, este nutriente interviene en la regularización del crecimiento de las plantas debido a su papel en varios procesos celulares, como la respiración, la fotosíntesis y en el metabolismo de los carbohidratos y los compuestos nitrogenados (Kaur et al., 2021).

Por último, con relación al potasio, este es considerado como uno de los elementos vitales necesarios para el crecimiento y la fisiología de las plantas, pues además de ser un elemento estructural de la planta, también interviene en la regulación de varios procesos relacionados con la síntesis de proteínas, el metabolismo de los carbohidratos la activación de enzimas y la regulación estomática y la fotosíntesis (Hasanuzzaman et al., 2018). Adicionalmente, el potasio desempeña un papel importante en la floración, la germinación del polen, así como en el desarrollo de las semillas, regula la biosíntesis de metabolitos que aumentan el rendimiento, lo que asegura una mayor producción y calidad de la cosecha, por lo que, este nutriente es denominado el "elemento de calidad" por su asociación con una mejor producción de cultivos (Hasanuzzaman et al., 2018).

Según estudios previos, los cultivos presentan variaciones en la demanda y capacidad de absorción de potasio en función de la etapa de crecimiento, lo cual se atribuye a la capacidad diferencial del sistema radical para explorar eficazmente el volumen de suelo y a la habilidad de las células radicales para captar potasio a bajas concentraciones en la rizosfera, incluyendo el potasio no intercambiable del suelo (White et al., 2020). Por esta razón, la aplicación de este nutriente debe ser

cuidadosamente sincronizada con sus requerimientos fisiológicos para optimizar los rendimientos del cultivo.

En cuanto a los macronutrientes secundarios, la absorción de calcio fue alta en la etapa de crecimiento y tendió a disminuir en 49.3% a los 60 ddt para luego incrementar, pero a un nivel menor que al inicio del cultivo. Por el contrario, la absorción de magnesio fue baja durante el crecimiento vegetativo, pero durante el crecimiento reproductivo y productivo experimentó un aumento 8.1 y 62.2 % respecto a los datos al inicio del cultivo (Figs. 14-15).

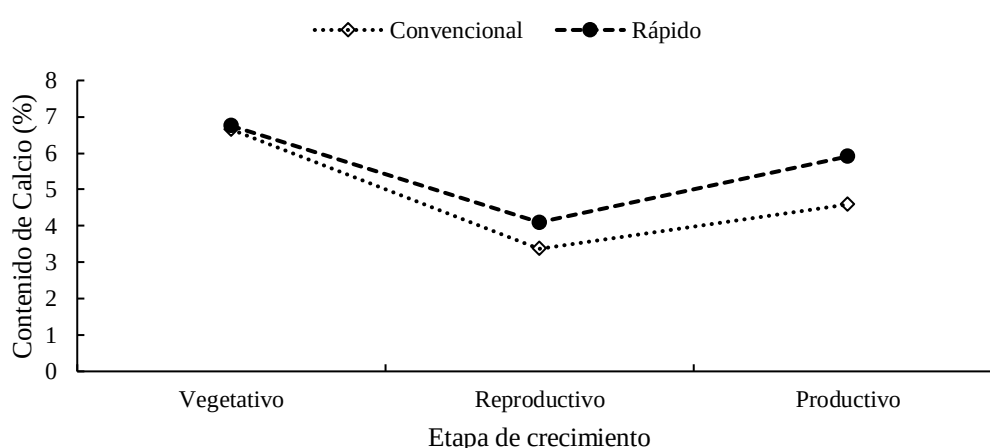


Figura 14. Variación en la absorción de calcio de acuerdo con la etapa de crecimiento en tomate variedad Extremo

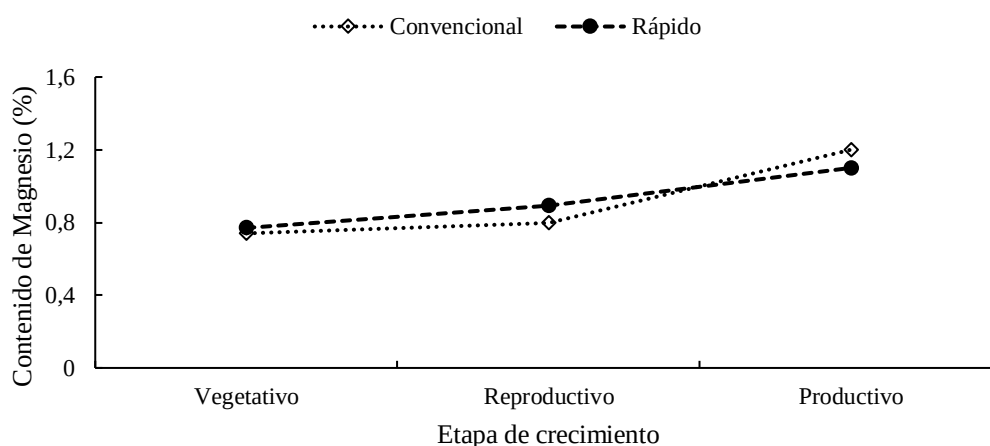


Figura 15. Variación en la absorción de magnesio de acuerdo con la etapa de crecimiento en tomate variedad Extremo

El calcio cumple un papel importante en el metabolismo de las plantas a través de varios procesos fisiológicos y bioquímicos como la elongación y división celular,

mantenimiento del pH celular e interviene en la translocación transmembrana, por lo que es un elemento primordial en el desarrollo de las plantas, pero también tiene un impacto positivo en el crecimiento del fruto de tomate, así como en los niveles de producción y calidad de los frutos (Alrashidi et al., 2022).

Con relación al papel del calcio en la calidad del fruto de tomate, Dodgson et al. (2023) demostraron que cuando se aplicó calcio de forma foliar en combinación de un estimulante del transporte de la cosecha, los frutos de tomate mostraron mayor firmeza la cual se mantuvo hasta 10 semanas después de la cosecha, lo que demostró el rol del calcio en la calidad de la cosecha y tiempo de vida útil de los tomates con menor dosis de calcio. Por otra parte, (Coulibaly et al., 2023) mostraron que los parámetros de crecimiento y el rendimiento de plantas de tomate variedad Lindo mejoraron con la suplementación de la fertilización con diferentes fuentes de calcio y además, mejoraron la resistencia a enfermedades.

El magnesio (Mg) es un nutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que desempeña un papel clave en los procesos fisiológicos y bioquímicos. Contribuye al desarrollo del sistema radicular, optimiza la absorción de agua y nutrientes, facilita el transporte de carbohidratos y mitiga la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y el daño fotooxidativo a las células bajo condiciones de estrés (Verma et al., 2019). Se ha demostrado que los cultivares de tomate de alto rendimiento tienen una alta demanda de magnesio, lo que los hace susceptibles a su deficiencia. Esta deficiencia provoca una reducción en la productividad, debido a la disminución de la producción y movilización de biomasa en los frutos (Kasinath et al., 2015).

La capacidad de absorción de magnesio en plantas de tomate podría depender de su utilización en cada etapa de crecimiento y a las condiciones ambientales que propician su absorción, la cual varía de acuerdo con las condiciones de crecimiento, la variabilidad estacional y el manejo de fertilizantes que afectan el rendimiento de los cultivos (Quddus et al., 2022). En función del crecimiento de las plantas, las características del fruto, la absorción de nutrientes, el rendimiento del tomate y la calidad de la fruta, la aplicación de magnesio tiende a mejorar el rendimiento del tomate y la calidad del fruto (Quddus et al., 2022).

Finalmente, en cuanto a los micronutrientes, se observó una disminución de la absorción del hierro (Fe) 26.4 % entre los 30 y 60 ddt con un aumento del 20.7 % al final del cultivo (Fig. 16). Con relación al manganeso, se observó un incremento consistente 117.8 y 586.3 % durante la etapa reproductiva y productiva a los 60 y 120 ddt, respectivamente (Fig. 17).

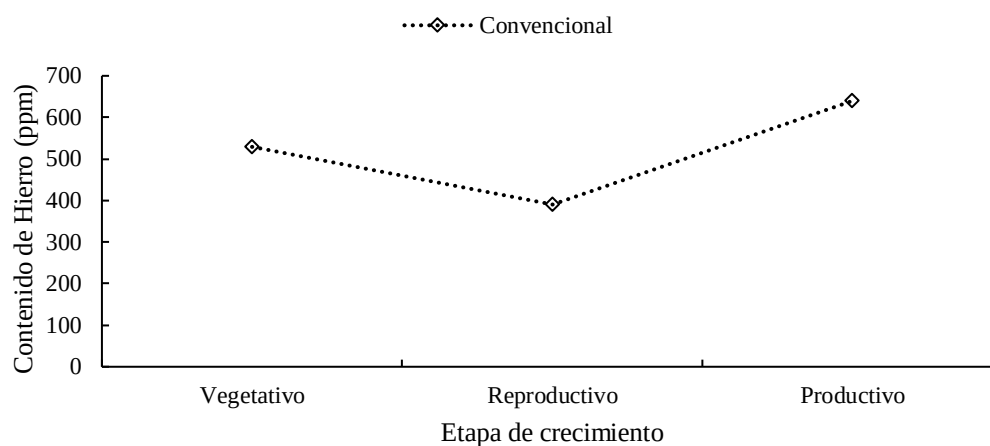


Figura 16. Variación en la absorción de hierro de acuerdo con la etapa de crecimiento en tomate variedad Extremo

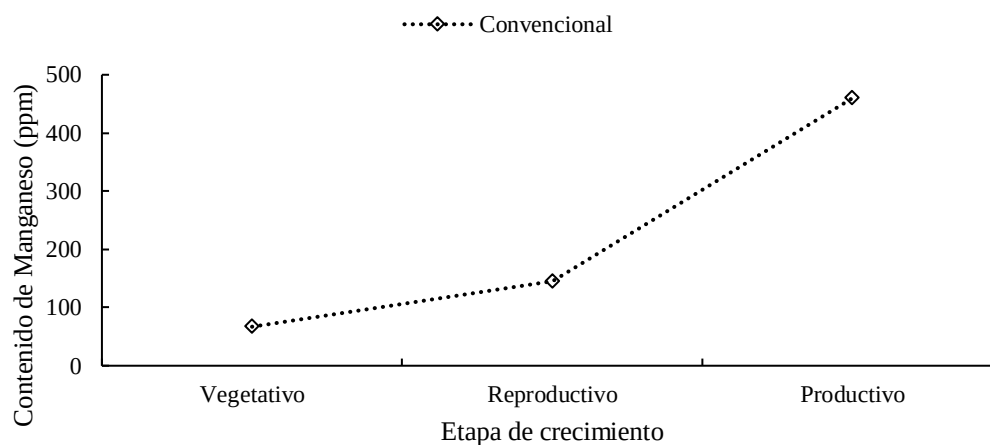


Figura 17. Variación en la absorción de manganeso de acuerdo con la etapa de crecimiento en tomate variedad Extremo

De acuerdo con Kaur et al. (2021), el hierro (Fe) es un microelemento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas y se utiliza en casi todos los procesos celulares, incluyendo la fotosíntesis y la respiración. Varios estudios han demostrado que el exceso de hierro provoca defectos en el crecimiento y disminución del

rendimiento de los cultivos, debido a que reactividad del hierro con el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) generando especies reactivas de oxígeno (ROS).

Por otra parte, la deficiencia de hierro es frecuente debido a que este elemento se encuentra en forma de óxidos/hidróxidos poco solubles, especialmente en suelos con pH de neutro a alcalino, por lo tanto, la homeostasis del Fe en las células vegetales debe estar estrechamente regulada para evitar la deficiencia de Fe o el exceso de Fe, los cuales afectan gravemente el rendimiento de los cultivos y la calidad de sus productos derivados (Li et al., 2023).

Al igual que ocurre con el hierro, la deficiencia de manganeso es inducida por un pH alto del suelo, sin embargo, se presenta con menos frecuencia en suelos agrícolas y sus síntomas son menos severo que el causado por la deficiencia de hierro, mientras que, por otro lado, la toxicidad se presenta principalmente en suelos húmedos y compactados y en plantas de tomate se muestran síntomas cuando las concentraciones superan los 80 mg kg^{-1} en el suelo y más de 1000 mg kg^{-1} en la planta (Sainju et al., 2003).

En cuanto al elemento cobre (Cu), la dinámica de absorción mostró una disminución del 9.7 y 21.2 % durante la fase reproductiva y productiva con respecto a la absorción durante la fase de crecimiento (Fig. 18). Por su parte, con respecto al zinc (Zn), se observó un incremento significativo durante la fase reproductiva que alcanzó 1594.8% para posteriormente disminuir durante la fase productiva (Fig. 19).

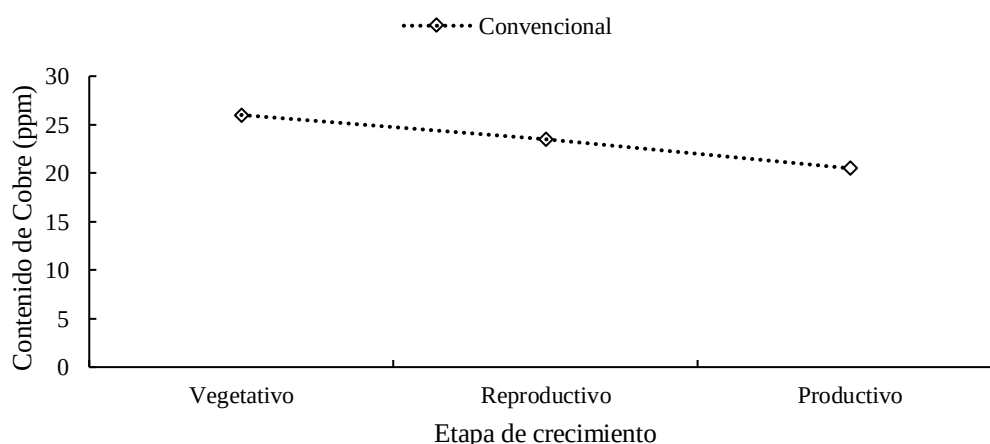


Figura 18. Variación en la absorción de cobre de acuerdo con la etapa de crecimiento en tomate variedad Extremo

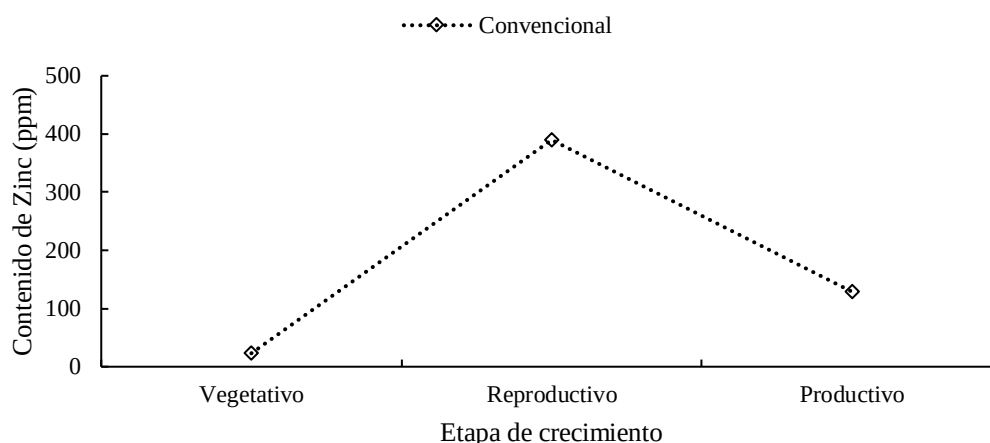


Figura 19. Variación en la absorción de zinc de acuerdo con la etapa de crecimiento en tomate variedad Extremo

De acuerdo con Yruela (2009), el cobre es un metal de transición redox-activo esencial para las plantas, puesto que participa en muchos procesos fisiológicos, actúa como elemento estructural en ciertas metaloproteínas, muchas de las cuales están involucradas en el transporte de electrones en los cloroplastos y las mitocondrias, así como en la respuesta al estrés oxidativo de las plantas y a nivel celular, interviene en la movilización de proteínas de transcripción, la fosforilación oxidativa, la movilización del hierro y la biogénesis del cofactor molibdeno (Yruela, 2009). Por tanto, las plantas necesitan Cu para su crecimiento y desarrollo, y en casos de deficiencia, se observan afectación de las hojas jóvenes y órganos reproductivos (Yruela, 2009).

El zinc (Zn) es un micronutriente crucial para la síntesis de proteínas en las plantas, ya que constituye un componente esencial de los ribosomas. Además, desempeña un papel clave en la polinización, participando en la formación del tubo polínico (Mousavi et al., 2012). La aplicación de zinc en los cultivos puede inducir mejoras en la producción al favorecer la absorción de fósforo, y las plántulas originadas de semillas con altos contenidos de zinc muestran una mayor capacidad para tolerar condiciones ambientales adversas (Mousavi et al., 2012). Aunque los requerimientos de zinc varían según la especie y las condiciones edafoclimáticas, su concentración en los tejidos vegetales es generalmente mucho más elevada que en la solución del suelo, donde se encuentra en concentraciones cercanas a 65 ppm (Broadley et al., 2012).

4.2. Niveles de nutrientes en la solución del suelo en el cultivo de tomate *Extremo in situ*

De acuerdo con los resultados del análisis de nutrientes en el suelo, se observó que la mayoría de los elementos (P, K, Ca, Mg, Fe y Cu) se encuentran en concentraciones elevadas, según los niveles referenciales establecidos para suelos de la región Sierra, según los parámetros del laboratorio de Suelos, Foliares y Aguas de la Agencia de Regulación y Control Fito y Zoosanitario (Tabla 4). En contraste, el nitrógeno, manganeso y zinc presentan concentraciones por debajo de los niveles mínimos recomendados. El nitrógeno se halló en un 0,05%, por debajo del límite de 0,15%, mientras que el manganeso y el zinc se encontraron a concentraciones de 4,21 y 2,63 mg/kg, respectivamente, cuando los valores umbrales son < 5,0 mg/kg y < 3,0 mg/kg, respectivamente (Tabla 4).

Tabla 4. Caracterización química del suelo

Parámetro analizado	Unidad	Valor	Bajo	Medio	Alto
pH (25 °C) ¹	--	7,36	--	--	--
Materia Orgánica ²	%	0,91	<1,0	1,0-2,0	>2,0
Nitrógeno ²	%	0,05	<0,15	0,15-0,3	>0,30
Fósforo ³	mg/kg	86,3	<10,0	10,0-20,0	>20,0
Potasio ⁴	cmol/kg	0,51	<0,2	0,2-0,38	>0,38
Calcio ⁴	cmol/kg	11,63	<1,0	1,0-3,0	>3,0
Magnesio ⁴	cmol/kg	3,66	<0,33	0,33-0,66	>0,66
Hierro ⁵	mg/kg	44,8	<20,0	20,0-40,0	>40,0
Manganeso ⁵	mg/kg	4,21	<5,0	5,0-15,0	>15,0
Cobre ⁵	mg/kg	7,55	<1,0	1,0-4,0	>4,0
Zinc ⁵	mg/kg	2,63	<3,0	3,0-7,0	>7,0

¹Método electrométrico PEE/SFA/06, EPA 9045D

²Método volumétrico PEE/SFA/09

³Método colorimétrico PEE/SFA/11

⁴Absorción atómica PEE/SFA/12

⁵Absorción atómica PEE/SFA/13

Según Padilla et al. (2020), la integración del monitoreo del cultivo y del suelo proporciona a los productores de hortalizas herramientas para identificar deficiencias o excesos de nutrientes, lo que facilita la implementación de correctivos oportunos. No

obstante, su uso requiere que el agricultor posea un nivel técnico adecuado y reciba soporte técnico continuo. En este contexto, la utilización de tecnologías de detección rápida, combinadas con sistemas de fertirrigación y riego por goteo, se configura como una estrategia clave para la gestión eficiente de nutrientes en cultivos hortícolas. Esto contribuye a minimizar las pérdidas de nutrientes y, por ende, reduce el uso excesivo de fertilizantes, lo que disminuye su impacto ambiental.

Estos métodos rápidos permiten detectar problemas potenciales y así evitarlos, sobre todo si estos son detectados durante las primeras etapas del ciclo del cultivo (antes de la floración), por ejemplo, plantas jóvenes que parecen normales pueden tener concentraciones bajas de nitrógeno para esa etapa de crecimiento, pudiéndose hacer las aplicaciones correctivas para mejorar el crecimiento del cultivo y así evitar una reducción sustancial del rendimiento (Hochmuth et al., 2012).

Según Rosen et al. (1996), las pruebas rápidas utilizadas para determinar el NO_3 y el K en la savia del pecíolo pueden proporcionar lecturas precisas cuando se utiliza savia diluida, sin embargo, el margen de error cuando se usa savia no diluida no suele ser tan importante como para justificar el esfuerzo adicional de la dilución, mientras que en el caso de la determinación de potasio, el uso de savia no diluida si presenta errores aún mayores, por lo que se recomienda el uso de savia diluida para determinar concentraciones precisas de K en la savia.

Los resultados del análisis de plantas también pueden ser usados para el manejo de fertilizantes durante las diferentes etapas de crecimiento del cultivo, puesto que se pueden ajustar las dosis de fertilizantes según los resultados de las pruebas de tejido y los rendimientos de cultivos anteriores y, en algunos casos, se pueden utilizar para decidir el momento de aplicación de fertilizantes complementarios (Hochmuth et al., 2012).

Según diversos estudios sobre el uso de métodos rápidos para el análisis de tejidos vegetales combinados con los resultados de análisis de suelo, ambos enfoques ofrecen herramientas valiosas para la gestión eficiente de la tasa y el momento de la aplicación de fertilizantes en cultivos hortícolas. Sin embargo, estos métodos presentan algunas limitaciones. Por ejemplo, no se recomienda el uso de pruebas de tejidos cuando se emplean fertilizaciones mediante aspersión foliar, ya que no es posible

eliminar completamente los residuos de nutrientes de la superficie foliar, lo que puede generar resultados artificialmente elevados respecto a la cantidad de nutrientes realmente presentes en el tejido vegetal (Hochmuth et al., 2012).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS

5.1. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados, la medición de la concentración de nutrientes mediante el método rápido usando el medidor LAQUAtwin mostró valores cercanos a los obtenidos por los métodos convencionales, los cuales mostraron coeficientes de correlación (r) altos que variaron desde 0,85 en la determinación de los niveles de fósforo hasta valores significativamente altos de 0,99 en el caso del nitrógeno.

Con relación al contenido de macronutrientes primarios (N, P y K), se observaron variaciones en las diferentes etapas de crecimiento del tomate, observándose la mayor absorción a los 30 y 60 días después del trasplante (ddt), mientras que a los 120 ddt se observó una disminución en la absorción, principalmente con relación al nitrógeno y fósforo y esta fue significativamente menor en cuanto a la reducción en la absorción del potasio.

En cuanto a los macronutrientes secundarios, la absorción del calcio mostró una tendencia al incremento de acuerdo la etapa de crecimiento del tomate y contrariamente, con respecto al magnesio, se observó un incremento en la absorción entre los 30 y 60 ddt y posteriormente su absorción disminuyó al final del cultivo.

Finalmente, con relación a los micronutrientes, se encontró un incremento en la absorción del hierro y manganeso entre los 30 a los 60 ddt, pero esta disminuyó hasta el final del ciclo del cultivo, siendo mayor la disminución en la absorción de manganeso. En el caso del cobre, se detectó una disminución en la absorción hasta los 60 ddt y posteriormente mostró un incremento hasta el final del ciclo del cultivo, mientras que el zinc, en general, mostró una tendencia a disminuir sus niveles de absorción a medida que avanzó el ciclo del cultivo.

Por último, el análisis de la solución del suelo demostró que el contenido de P, K, Ca, Mg, Fe y Cu estaban en cantidades altas, considerando los niveles referenciales para suelos de la región Sierra, pero el contenido de N, Mn y Zn se encontraban por debajo del límite bajo.

5.2.RECOMENDACIONES

Dado la alta correlación observada entre los resultados obtenidos por los métodos convencionales y el método rápido utilizando el medidor LAQUAtwin, se recomienda optar por el método rápido. Este enfoque ofrece ventajas significativas, ya que permite obtener resultados en un menor tiempo, proporcionando una evaluación precisa del estado nutricional actual del cultivo. Esta capacidad facilita la toma de decisiones oportunas para implementar acciones correctivas en la gestión de nutrientes, optimizando así la eficiencia en la fertilización y promoviendo un mejor rendimiento de los cultivos.

Dado el potencial del método rápido utilizando el medidor LAQUAtwin, se recomienda llevar a cabo capacitaciones dirigidas a asesores agrícolas y agricultores sobre su correcto uso. Esto permitirá optimizar los resultados en la determinación del contenido de nutrientes en los cultivos, evitando aplicaciones innecesarias de fertilizantes. De este modo, se contribuirá a un uso más eficiente y racional de los fertilizantes, lo que no solo reducirá los costos operativos, sino que también mejorará la salud del suelo y promoverá prácticas agrícolas sostenibles.

5.3. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta-Quezada, P. G., Riofrío-Cuenca, T., Rojas, J., Vilanova, S., Plazas, M., y Prohens, J. (2016). Phenological growth stages of tree tomato (*Solanum betaceum* Cav.), an emerging fruit crop, according to the basic and extended BBCH scales. *Scientia Horticulturae*, 199, 216–223.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.12.045>
- Agaba, J., Osiru, D. S., y Ndizihiwe, D. (2023). Effect of different poultry manure on the performance of tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *American Journal of Agriculture*, 5(1), 1–21. <https://doi.org/10.47672/aja.1315>
- Almeida, P. da C., Oliveira, C., Mota, M., y Ribeiro, H. (2020). Rapid sap nutrient analysis methods in *Malus domestica* Borkh cv. ‘Gala.’ *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(12), 1693–1706.
<https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1791160>
- Alrashidi, A. A., Alhaithloul, H. A. S., Soliman, M. H., Attia, M. S., Elsayed, S. M., Ali, M. M., Sadek, A. M., y Fakhr, M. A. (2022). Role of calcium and magnesium on dramatic physiological and anatomical responses in tomato plants. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 50(1), Artículo 12614. <https://doi.org/10.15835/nbha50112614>
- Berrueta, C., Grasso, R., Dogliotti, S., Scarlato, M., Alliaume, F., Machado, D., y Manzioni, A. (2024). *Manejo eficiente de la fertirrigación en el cultivo de tomate bajo invernáculo*. Editorial Agropecuaria Hemisferio Sur S.R.L.
<https://doi.org/10.35676/INIA/ST.270>
- Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Rengel, Z., y Zhao, F. (2012). Function of Nutrients: Micronutrients. In P. Marschner (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants: Third Edition* (pp. 191–248). Academic Press Inc.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8>
- Cardoso, E. F., Lopes, A. R., Dotto, M., Pirola, K., y Giarola, C. M. (2021). Phenological growth stages of Gaúcho tomato based on the BBCH scale. *Comunicata Scientiae Horticultural Journal*, 12, 1–7.
<https://doi.org/10.14295/CS.v12.3490>

- Carson, L., Ozores-Hampton, M., y Morgan, K. (2016). Correlation of petiole sap nitrate-nitrogen concentration measured by ion selective electrode, leaf tissue nitrogen concentration, and tomato yield in Florida. *Journal of Plant Nutrition*, 39(12), 1809–1819. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1187743>
- Coulibaly, A. S., Kouakou, K. L., Dao, J. P., Kouakou, C., Dedi, J. K., y Bi, I. A. Z. (2023). Enhancing tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit yield and quality and Blossom End Rot control using different biological calcium sources. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 12, 263–274. <https://doi.org/10.4236/jacen.2023.123020>
- Deng, Y., Zheng, Y., Lu, J., Guo, Z., Sun, X., Zhao, L., Guo, H., Zhang, L., y Wang, C. (2024). Effects of different N fertilizer doses on phenology, photosynthetic fluorescence, and yield of quinoa. *Agronomy*, 14, Article 914. <https://doi.org/10.3390/agronomy14050914>
- Dodgson, J., Weston, A. K., y Marks, D. J. (2023). Tomato Firmness and Shelf-Life Increased by Application of Stimulated Calcium. *Crops*, 3(4), 251–265. <https://doi.org/10.3390/crops3040023>
- Esteves, E., Locatelli, G., Bou, N. A., y Ferrarezi, R. S. (2021). Sap analysis: a powerful tool for monitoring plant nutrition. *Horticulturae*, 7, 1–13. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7110426>
- Farneselli, M., Tei, F., y Simonne, E. (2014). Reliability of petiole sap test for N nutritional status assessing in processing tomato. *Journal of Plant Nutrition*, 37(2), 270–278. <https://doi.org/10.1080/01904167.2013.859696>
- Fichtner, F., Dissanayake, I. M., Lacombe, B., y Barbier, F. (2021). Sugar and nitrate sensing: a multi-billion-year story. *Trends in Plant Science*, 26(4), 352–374. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.11.006>
- Ger, K. G., Belew, D., Nebiyu, A., y Barnabas, J. (2024). Growth , yield , and yield Components of Tomato varieties (*Solanum lycopersicum* L.) influenced by the application of blended fertilizers (NPS) at Jimma, South-West Ethiopia. *Current Agriculture Research Journal*, 12(2), 599–622.

- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., Nahar, K., Hossain, M. S., Al Mahmud, J., Hossen, M. S., Masud, A. A. C., Moumita, y Fujita, M. (2018). Potassium: A vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. *Agronomy*, 8(Artículo 31). <https://doi.org/10.3390/agronomy8030031>
- Hernández-Sampieri, R., y Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw Hill Interamericana Editores S.A.
- Hochmuth, G., y Hochmuth, R. (2022). Plant Petiole Sap-Testing for Vegetable Crops. In *Horticultural Sciences Department, UF/IFAS Extension*. (Issue 3). <https://doi.org/10.32473/edis-cv004-2022>
- Hochmuth, G. J., Maynard, D., Vavrina, C., Hanlon, E., y Simonne, E. (2012). Plant tissue analysis and interpretation for vegetable crops in Florida. In *Horticultural Sciences Department* (Issue HS964).
- INIA. (2012). *Informacion de avance proyecto. Tomate*.
- Kasinath, B. L., Ganeshamurthy, A. N., y Nagegowda, N. S. (2015). Effect of magnesium on plant growth, dry matter and yield in tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *Journal of Horticultural Sciences*, 10(2), 190–193. <https://doi.org/10.24154/jhs.v10i2.128>
- Kaur, G., Shukla, V., Meena, V., Kumar, A., Tyagi, D., Singh, J., Kandoth, P. K., Mantri, S., Rouached, H., y Pandey, A. K. (2021). Physiological and molecular responses to combinatorial iron and phosphate deficiencies in hexaploid wheat seedlings. *Genomics*, 113(6), 3935–3950. <https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2021.09.019>
- Khairul Mazed, H. E. M., Hasanuzzaman Akand, M., Nazmul Haque, M., Ashraful Islam Pulok, M., y Gope Partho, S. (2015). Yield and economic analysis of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) as influenced by potassium and stem pruning. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 5(1), 1–5.
- Khan, F., Siddique, A. B., Shabala, S., Zhou, M., y Zhao, C. (2023). Phosphorus

- plays key roles in regulating plants' physiological responses to abiotic stresses. *Plants*, 12, Artículo 2861. <https://doi.org/10.3390/plants12152861>
- Knapp, S. (2002). Tobacco to tomatoes: A phylogenetic perspective on fruit diversity in the Solanaceae. *Journal of Experimental Botany*, 53(377), 2001–2022. <https://doi.org/10.1093/jxb/erf068>
- Leghari, S. J., Wahocho, N. A., Laghari, G. M., Laghari, A. H., Bhabhan, G. M., K.H.Talpur, y Lashari, A. . (2016). Role of nitrogen for plant growth and development: A review. *Advances in Environmental Biology*, 10(9), 209–218.
- Li, M., Watanabe, S., Gao, F., y Dubos, C. (2023). Iron Nutrition in Plants: Towards a New Paradigm? *Plants*, 12, 1–15. <https://doi.org/10.3390/plants12020384>
- Liu, J., Cai, H., Chen, S., Pi, J., y Zhao, L. (2023). A review on soil nitrogen sensing technologies: challenges, progress and perspectives. *Agriculture (Switzerland)*, 13, 1–19. <https://doi.org/10.3390/agriculture13040743>
- Llanderal, A., García-Caparrós, P., Contreras, J. I., Segura, M. L., y Lao, M. T. (2018). Evaluation of the Nutrients Variability in Sap of Different Petiole Samples in Tomato Plant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(6), 745–750. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1435797>
- Llanderal, A., García-Caparrós, P., Segura, M. L., Contreras, J. I., y Lao, M. T. (2019). Nutritional changes in petiole sap over space and time in a tomato crop greenhouse. *Journal of Plant Nutrition*, 42(10), 1205–1217. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1609504>
- Lu, Q., Miles, C., Tao, H., y DeVetter, L. (2022). Evaluation of real-time nutrient analysis of fertilized raspberry using petiole sap. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.918021>
- Malhotra, H., Vandana, Sharma, S., y Pandey, R. (2018). Phosphorus nutrition: plant growth in response to deficiency and excess. In M. Hasanuzzaman, M. Fujita, H. Oku, K. Nahar, y B. Hawrylak-Nowak (Eds.), *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance* (pp. 171–190). Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8>

- Martinelli, T., Andrzejewska, J., Salis, M., y Sulas, L. (2015). Phenological growth stages of *Silybum marianum* according to the extended BBCH scale. *Annals of Applied Biology*, 166(1), 53–66. <https://doi.org/10.1111/aab.12163>
- Maxim, A., Albu, V. C., Vodnar, D. C., Mihăiescu, T., Mang, Ștefania M., Camele, I., Trotta, V., Bonomo, M. G., Mihălescu, L., Sandor, M., Ranga, F., y Borsai, O. (2023). Assessment of Tomato (*Solanum lycopersicum*) Landraces for Their Agronomic, Biochemical Characteristics and Resistance to Phytophthora infestans. *Agronomy*, 13, 1–18. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010021>
- Mota, M., Martins, M. J., Sprey, L., Maurício, A., Rosa, C., Faria, J., Martins, M. B., de Sousa, M. L., Santos, R., de Sousa, R. M., Ribeiro, H., y Oliveira, C. M. (2024). Analysis of petiole sap nutrients using rapid and standard methods and its relation to leaf analysis of fertilized *Malus domestica* cv. Gala. *Horticulturae*, 10(1), 1–14. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10010036>
- Mousavi, S. R., Galavi, M., y Rezaei, M. (2012). The interaction of zinc with other elements in plants: A review. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 4(24), 1881–1884.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024). *Datos de cultivos*. FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Oskarsson, C., Pettersson, L., Larsson Jönsson, H., y Caspersen, S. (2024). Pre-vegetated green roof sedum mats: Mineral nutrient status and apparent fertiliser recovery during production. *Scientia Horticulturae*, 336, 113428. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113428>
- Padilla, F. M., Farneselli, M., Gianquinto, G., Tei, F., y Thompson, R. B. (2020). Monitoring nitrogen status of vegetable crops and soils for optimal nitrogen management. *Agricultural Water Management*, 241, 106356. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106356>
- Palmer, L. J., y Stangoulis, J. C. R. (2018). Changes in the elemental and metabolite profile of wheat phloem sap during grain filling indicate a dynamic between plant maturity and time of day. *Metabolites*, 8, 1–12. <https://doi.org/10.3390/metabo8030053>

- Peralta, I. E., y Spooner, D. M. (2007). History, origin and early cultivation of tomato (Solanaceae). In M. K. Razdan y A. K. Matoo (Eds.), *Genetic Improvement of Solanaceous Crops Volume 2: Tomato* (pp. 1–24). Science Publishers. <https://doi.org/10.1201/b10744-2>
- Quamruzzaman, A., Akter, L., y Islam, F. (2023). Yield and pest performance of high-temperature tolerant tomato (*Lycopersicon esculentum*) lines for year-round tomato production in Bangladesh. *Agricultural Sciences*, 14, 855–863. <https://doi.org/10.4236/as.2023.147057>
- Quddus, M. A., Siddiky, M. A., Hussain, M. J., Rahman, M. A., Ali, M. R., y Masud, M. A. T. (2022). Magnesium influences growth, yield, nutrient uptake, and fruit quality of tomato. *International Journal of Vegetable Science*, 28(5), 441–464. <https://doi.org/10.1080/19315260.2021.2014614>
- Quinet, M., Angosto, T., Yuste-Lisbona, F. J., Blanchard-Gros, R., Bigot, S., Martinez, J. P., y Lutts, S. (2019). Tomato Fruit Development and Metabolism. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1554. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01554>
- Rosen, C. J., Errebhi, M., y Wenshan, W. (1996). Testing Petiole Sap for Nitrate and Potassium: A Comparison of Different Analytical Techniques. *HortScience*, 31(7), 1173–1176. <https://doi.org/10.21273/hortsci.30.4.908>
- Sainju, U. M., Dris, R., y Singh, B. (2003). Mineral nutrition of tomato. *Food, Agriculture y Environment*, 1(2), 176–184.
- Sakr, S. (2023). Sugar transport, metabolism and signaling in plants”. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(6), 5655. <https://doi.org/10.3390/ijms24065655>
- Salazar, N. (2019). *Implementación de un cultivo de tomate (Solanum lycopersicum) como nueva alternativa de diversificación agrícola, en el municipio de Chaparral, Tolima* [Universidad de la Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/ingenieria_agronomica/139
- Schmidt, D., Zamban, D. T., Prochnow, D., Caron, B. O., Souza, V. Q., Paula, G. M., y Cocco, C. (2017). Caracterização fenológica, filocrono e requerimento

térmico de tomateiro italiano em dois ciclos de cultivo. *Horticultura Brasileira*, 35(1), 89–96. <https://doi.org/10.1590/S0102-053620170114>

Sharma, K., y Kaur, H. (2023). *Influence of macro and micro nutrients on growth and yield parameters of tomato (Solanum lycopersicum L.) under open field conditions*. 12(6), 4842–4844.

Singh, S. K., Thakur, K., Sharma, V., Saini, M., Sharma, D., Vishwas, S., Kakoty, V., Pal, R. S., Chaitanya, M. V. N. L., Babu, M. R., Gupta, S., Rehman, Z. ur, Smriti, Singla, M., Gupta, G., Jakhmola, V., Jesus, T. de, Pinto, A., Kumbhar, P., ... Gadewar, M. M. (2023). Exploring the multifaceted potential of chlorogenic acid: Journey from nutraceutical to nanomedicine. *South African Journal of Botany*, 15, 658–677.

Soyk, S., Lemmon, Z. H., Oved, M., Fisher, J., Liberatore, K. L., Park, S. J., Goren, A., Jiang, K., Ramos, A., van der Knaap, E., Van Eck, J., Zamir, D., Eshed, Y., y Lippman, Z. B. (2017). Bypassing Negative Epistasis on Yield in Tomato Imposed by a Domestication Gene. *Cell*, 169, 1142–1155. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2017.04.032>

Verma, G., Srivastava, D., Tiwari, P., y Chakrabarty, D. (2019). ROS modulation in crop plants under drought stress ROS generation : an overview. In M. Hasanuzzaman, V. Fotopoulos, K. Nahar, y M. Fujita (Eds.), *Reactive Oxygen, Nitrogen and Sulfur Species in Plants: Production, Metabolism, Signaling and Defense Mechanisms* (Vol. 1, pp. 311–336). John Wiley y Sons Ltd.

Verma, N. S., Yadav, D., Chouhan, M., Bhagat, C., y Kochale, P. (2023). Understanding potential impact of green manuring on crop and soil: a comprehensive review. *Biological Forum- An International Journal*, 15(10), 832–839.

Villaseñor-Aguilar, M. J., Padilla-Medina, J. A., Prado-Olivarez, J., Botello-Álvarez, J. E., Bravo-Sánchez, M. G., y Barranco-Gutiérrez, A. I. (2023). Low-Cost Sensor for Lycopene Content Measurement in Tomato Based on Raspberry Pi 4. *Plants*, 12, 2683. <https://doi.org/10.3390/plants12142683>

White, P. J., Bell, M. J., Djalovic, I., Hinsinger, P., y Rengel, Z. (2020). Potassium

use efficiency of plants. In T. S. Murrell, R. L. Mikkelsen, G. Sulewski, R. Norton, y M. L. Thompson (Eds.), *Improving Potassium Recommendations for Agricultural Crops* (Issue January 2022, pp. 119–145). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59197-7_5

Yamamura, Y., Nara, S., Higuchi, K., Saito, A., y Ohyama, T. (2024). Absorption and Xylem Transport of ³³P-Labeled Phosphorus in Nodulated Soybean Plants. *Agriculture*, 14, 1–18. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071104>

Yang, J., Li, L., Tu, C., Li, R., y Luo, Y. (2024). Crop plants transport irregularly shaped mineral particles from root to shoot: Tracking and quantifying. *Eco-Environment y Health*, En Imprenta. <https://doi.org/10.1016/j.eehl.2024.05.002>

Yong, K. T., Yong, P. H., y Ng, Z. X. (2023). Tomato and human health: a perspective from post-harvest processing, nutrient bio-accessibility, and pharmacological interaction. *Food Frontiers*, 4(4), 1702–1719. <https://doi.org/10.1002/fft2.299>

Yruela, I. (2009). Copper in plants: acquisition, transport and interactions. *Functional Plant Biology*, 36(5), 409–430. <https://doi.org/10.1071/FP08288>

5.4.ANEXOS



Figura 20. *Establecimiento del cultivo de tomate*



Figura 21. Sistema de electrodos sensibles a iones específicos, denominado medidor LAQUAtwin



Figura 22. *Aspecto general del cultivo de tomate Extermo*