



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN
CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO
POSGRADO DE EDAFOLOGÍA

**USO EFICIENTE DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO EN
FAMILIAS NATIVAS DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) Y
SU COMPETITIVIDAD COMO PORTAINJERTO**

BENJAMÍN GONZÁLEZ VARGAS

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2020

La presente tesis, titulada: **Uso eficiente de nitrógeno, fósforo y potasio en familias nativas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y su competitividad como portainjerto** realizada por el alumno: **Benjamín González Vargas**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

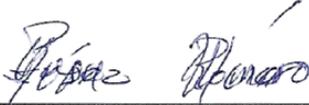
DOCTOR EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA
CONSEJO PARTICULAR

Consejero



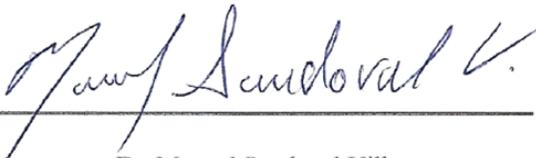
Dr. Vicente Espinosa Hernández

Asesora



Dra. Rosa María López Romero

Asesor



Dr. Manuel Sandoval Villa

Asesor



Dr. Nicacio Cruz Huerta

Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, julio de 2020.

**USO EFICIENTE DE NITRÓGENO, FÓSFORO Y POTASIO EN FAMILIAS NATIVAS
DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) Y SU COMPETITIVIDAD COMO
PORTAINJERTO**

Benjamín González Vargas, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2020

RESUMEN

México es un país megadiverso, se considera centro de domesticación del tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Existe una gran diversidad de tomates, además, del *S. lycopersicum* L., y de términos para identificar a los materiales nativos de tomate como variedades o poblaciones locales, que se consideran fuentes de germoplasma, y debido, a su adaptación a factores de estrés biótico o abiótico, como falta o exceso de agua, presencia de hongos, y disposición de nutrimentos, se pueden emplear como portainjertos. Sin embargo, para seleccionar materiales nativos como portainjertos estos se deben evaluar en una situación limitante, como el bajo suministro de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Al respecto, en esta investigación se realizaron tres ensayos independientes, en cada estudio se evaluaron las dosis (mM L^{-1}) de: 1.2, 2.4 y 4.8 de N-NO_3^- ; 0.1, 0.2 y 0.4 de P; y 0.7, 1.4 y 2.8 de K, y su respuesta en cuatro familias nativas (FN) 36, 300, 367 y 457, y un portainjerto comercial de tomate (Protector, testigo). Posteriormente, se realizó un cuarto experimento donde se evaluó el efecto del suministro de P en el rendimiento y calidad del fruto, de Cid y FN 457 sin injertar y Cid/Protector y Cid/FN 457 injertados, en invernadero e hidroponía. En cada estudio se utilizó un diseño experimental de parcelas divididas aleatorizadas. En el ensayo de N, la FN 367 presentó la mayor concentración de N en hoja, mientras que, la FN 457 mostró similares usos eficientes de N en hoja y tallo, que Protector; y en los ensayos de P y K, la FN 457 exhibió similar contenido total de P y K, además, de similar uso eficiente de P en hoja y raíz, y de K en hoja, que el testigo. La FN 457 como portainjerto, en combinación con Cid, produjo 85 % más frutos que Cid y FN 457 sin injertar; además, mantuvo las características de calidad del fruto. Las tasas de aplicación de N, P y K permitieron identificar a la FN 457 como candidata a portainjerto, lo cual se comprobó, al mantener un rendimiento de fruto similar al que produjo Cid/Protector. Los productores de tomate pueden utilizar a la FN 457 como portainjerto en condiciones de escasez de P para aumentar su rendimiento.

Palabras clave: familia nativa 457, injerto, portainjerto, rendimiento, uso eficiente de nitrógeno, fósforo y potasio.

EFFICIENCY USE OF NITROGEN, PHOSPHORUS AND POTASSIUM IN NATIVE FAMILIES OF TOMATO (*Solanum lycopersicum* L.) AND ITS COMPETITIVENESS AS A ROOTSTOCK

Benjamin González Vargas, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2020

ABSTRACT

Mexico is a megadiverse country, it is considered the center of domestication of the tomato (*Solanum lycopersicum* L.). There is a great diversity of tomatoes, in addition to *S. lycopersicum* L., and terms to identify native tomato materials as local or populations varieties, which are considered sources of germplasm, and due to their adaptation to biotic or abiotic stress factors such as lack or excess of water, presence of fungi, and nutrient availability, can be used as rootstocks. However, to select native materials as rootstocks these must be evaluated in a limiting situation, such as the low supply of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K). In this regard, three independent trials were carried out in this investigation, in each study the doses (mM L⁻¹) of: 1.2, 2.4 and 4.8 of N-NO₃⁻; 0.1, 0.2 and 0.4 of P; and 0.7, 1.4 and 2.8 of K, and their response in four native families (NF) 36, 300, 367 and 457 and a commercial tomato rootstock (Protector, control). Subsequently, a fourth experiment was performed where the effect of P supply on fruit yield and quality was evaluated, of Cid and NF 457 without grafting and Cid/Protector and Cid/NF 457 grafted, in greenhouse and hydroponics. An experimental design of randomized divided plots was used in each study. In the N test, NF 367 showed the highest concentration of leaf N, while NF 457 showed similar efficient uses of N in leaf and stem as Protector; and in the P and K tests, the NF 457 exhibited similar total content P and K, in addition to similar efficient use of leaf and root P, and leaf K, as the control. The NF 457 as rootstock, in combination with Cid, produced 85% more fruits than Cid and FN 457 without grafting; in addition, it maintained the quality characteristics of the fruit. The application rates of N, P and K allowed to identify the FN 457 as a candidate for rootstock, which was verified, maintaining a fruit yield similar to that produced by Cid/Protector. Tomato growers can use NF 457 as a rootstock in conditions of low P to increase its yield.

Keywords: native family 457, grafting, rootstock, yield, efficiency use of nitrogen, phosphorous and potassium.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca que otorgó a Benjamín G. Vargas, para realizar los estudios de Doctorado en ciencias.

Al comité de evaluación del Posgrado de Edafología del Colegio de Postgraduados, les agradezco la oportunidad que me brindaron para lograr mis estudios de doctorado y de esta manera enriquecer mis conocimientos.

A los integrantes del consejo particular, Dr. Vicente Espinosa Hernández, Dra. Rosa María López Romero, Dr. Manuel Sandoval Villa y Dr. Nicacio Cruz Huerta, por haberme dado la oportunidad de trabajar con ellos, por otorgarme su confianza, parte de su tiempo, por sus enseñanzas, consejos, sugerencias, paciencia, colaboración y amistad para desarrollar la presente investigación. Porque, es el supremo arte del maestro, despertar la curiosidad en la expresión creativa y conocimiento (Albert Einstein).

Al Dr. Javier Suarez Espinosa por su orientación, tiempo y enseñanzas en el manejo y análisis de datos que se originaron en la presente investigación.

Al Dr. Víctor Arturo González Hernández, por las facilidades brindadas en el uso y manejo del equipo del Laboratorio de Fisiotecnia Vegetal Avanzada, del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

Al Dr. Rogelio Castro Brindis y al Dr. Prometeo Sánchez García, por sus atenciones, comentarios y sugerencias, que enriquecieron el presente trabajo.

A todos y a cada uno de los compañeros, que colaboraron en este trabajo.

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis a mis padres: Teresa y Benjamín;

A mi esposa Mariel del Rosario Sánchez Vidaña por su apoyo incondicional;

A la familia Sánchez Vidaña, Sr. José Víctor, Diana Lorena y Adriana Elizabet por el apoyo que me han brindado desde la universidad;

A mis hermanos, Enedina, María del Carmen, Manuel, José Antonio, María Amalia, Carolina, José Alberto y José Guadalupe por su apoyo;

A mis amigos que siempre me apoyaron, Guillermo, José Luis, Celestina, Antonio Patricio, Jasso, Luis, Paco, Oralia, Eliud y Consuelo.

PRÓLOGO

El presente documento se escribió en forma de Manuscritos de artículos científicos según la guía para la organización y presentación de la tesis, del Colegio de Postgraduados (2007). Con base en éste, se diseñó el contenido de la tesis, que aborda la nutrición vegetal, desde el punto de vista del uso eficiente de nitrógeno, fósforo y potasio, y su efecto en familias nativas de tomates mexicanos, que se pueden utilizar como portainjertos de tomate.

En el Capítulo 1 se describe el efecto del suministro deficiente de nitrógeno; y en el Capítulo 2, se presentan los resultados del suministro deficiente de fósforo y potasio, en ambos capítulos se describe el crecimiento y desarrollo que presentan las familias nativas de tomate, con respecto al material comercial (Protector).

Finalmente, en el Capítulo 3, se describe la competitividad agronómica de la familia nativa de tomate 457 como portainjerto, la cual se seleccionó por presentar la mejor respuesta en los ensayos de nitrógeno, fósforo y potasio. Este último capítulo refleja la necesidad de proveer al productor, de materiales vegetales y de técnicas de producción, para que obtenga el mejor rendimiento y calidad del fruto, y de ser posible que incremente su ganancia económica, y que conserve la sustentabilidad del ambiente.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE CUADROS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xii
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS PARTICULARES.....	3
HIPÓTESIS GENERAL	4
HIPÓTESIS PARTICULARES	4
LITERATURA CITADA	5
CAPÍTULO 1. DÉFICIT DE NITRÓGENO EN CRECIMIENTO Y FISIOLOGÍA DE FAMILIAS NATIVAS DE TOMATE.....	8
1.1. RESUMEN.....	8
1.2. ABSTRACT.....	9
1.3. INTRODUCCIÓN	10
1.4. MATERIALES Y MÉTODOS	11
1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
1.6. CONCLUSIONES	22
1.7. AGRADECIMIENTOS	22
1.8. LITERATURA CITADA.....	22
CAPÍTULO 2. DÉFICIT DE FÓSFORO Y POTASIO EN FAMILIAS NATIVAS DE TOMATE (<i>Solanum lycopersicum</i> L.): CONCENTRACIÓN, ACUMULACIÓN Y USO EFICIENTE DE P Y K.....	26
2.1. RESUMEN.....	26
2.2. ABSTRACT.....	27
2.3. INTRODUCCIÓN	28
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS	29
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
2.6. CONCLUSIONES	46
2.7. AGRADECIMIENTOS	46

2.8. LITERATURA CITADA.....	46
CAPÍTULO 3. COMPETITIVIDAD AGRONÓMICA DE LA FAMILIA NATIVA DE TOMATE (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) COMO PORTAINJERTO EN DÉFICIT DE FÓSFORO	51
3.1. RESUMEN.....	51
3.2. ABSTRACT.....	52
3.3. INTRODUCCIÓN	53
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS	54
3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
3.6. CONCLUSIONES	69
3.7. AGRADECIMIENTOS	69
3.8. LITERATURA CITADA.....	69
DISCUSIÓN GENERAL.....	73
CONCLUSIONES GENERALES.....	81
LITERATURA CITADA	83

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Presión osmótica (PO), conductividad eléctrica (CE) y potencial osmótico (Ψ_o) de la solución nutritiva Steiner modificada a diferentes niveles de $N-NO_3^-$	12
Cuadro 2. Efecto de las dosis de $N-NO_3^-$ en el área foliar, materia seca de la hoja, tallo, raíz, total y tasa de asimilación neta de CO_2 , 55 días después del trasplante.	14
Cuadro 3. Área foliar, materia seca de hoja, tallo, raíz, total y tasa de asimilación neta de CO_2 en familias nativas de tomate, 55 días después del trasplante.....	15
Cuadro 4. Efecto de la dosis de $N-NO_3^-$ en el área foliar, materia seca de hoja, tallo, raíz, total y tasa de asimilación neta de CO_2 en familias nativas de tomate, 55 días después del trasplante.....	16
Cuadro 5. Efecto de la dosis de $N-NO_3^-$ en el contenido y uso eficiente del nitrógeno (UEN) en familias nativas de tomate, 55 días después del trasplante.	19
Cuadro 6. Contenido y uso eficiente de nitrógeno (UEN) en familias nativas de tomate, 55 días después del trasplante.	20
Cuadro 7. Efecto de la dosis de $N-NO_3^-$ en el contenido y uso eficiente de nitrógeno (UEN) en familias nativas de tomate, 55 días después del trasplante.	21
Cuadro 8. Efecto de la dosis de P y K en el contenido y uso eficiente del P (UEP) y K (UEK) en familias nativas de tomate, 45 días después del trasplante.	39
Cuadro 9. Contenido y uso eficiente de fósforo y potasio (UEP y UEK) en familias nativas de tomate, 45 días después del trasplante.	41
Cuadro 10. Efecto de la dosis de P en el contenido y uso eficiente de fósforo (UEP) en familias nativas de tomate, 45 días después del trasplante.	43
Cuadro 11. Efecto de la dosis de K en el contenido y uso eficiente de potasio (UEK) en familias nativas de tomate, 45 días después del trasplante.	45
Cuadro 12. Efecto de las dosis de fósforo en la materia seca de hoja, tallo, raíz, total, área foliar y tasa de asimilación neta de CO_2 , 90 días después del trasplante.	62
Cuadro 13. Materia seca de hoja, tallo, raíz, total, área foliar y tasa de asimilación neta de CO_2 en genotipos de tomate, 90 días después del trasplante.	63
Cuadro 14. Efecto de la dosis de fósforo en genotipos de tomate en la materia seca de hoja, tallo, raíz, total, área foliar y tasa de asimilación neta de CO_2 , 90 días después del trasplante.	63

Cuadro 15. Efecto de la dosis de fósforo en la firmeza, sólidos solubles totales, parámetros de color y licopeno en frutos de tomate, 90 días después del trasplante.....	65
Cuadro 16. Firmeza, sólidos solubles totales, parámetros de color y licopeno de frutos de diferentes genotipos de tomate, 90 días después del trasplante.	66
Cuadro 17. Efecto de la dosis de fósforo en la firmeza, sólidos solubles totales, parámetros de color y licopeno en frutos de diferentes genotipos de tomate, 90 días después del trasplante.	67
Cuadro 18. Concentraciones óptimas de nitrógeno, fósforo y potasio en hoja, tallo y fruto en plantas de tomate en condiciones de suficiencia.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Efecto de la dosis de N-NO ₃ ⁻ en la concentración de N en hoja, tallo y raíz (A), en hoja (B), tallo (C) y raíz (D) de familias nativas de tomate, 55 días después del trasplante.	17
Figura 2. Concentración de N en hoja, tallo y raíz en familias nativas de tomate, 55 días después del trasplante.	18
Figura 3. Efecto de la dosis de P (A) y K (B) en familias nativas de tomate (C y D), e interacción dosis×genotipo (E y F) en el área foliar, 45 días después del trasplante..	33
Figura 4. Efecto de la dosis de P y K en la materia seca y concentración de P y K en hoja, tallo y raíz (A y B), y en la hoja, tallo y raíz de familias nativas de tomate (C y D), 45 días después del trasplante.	34
Figura 5. Efecto de la dosis de P y K en la interacción dosis×genotipo en la materia seca (MS) y concentración de P y K en hoja (A y B), tallo (C y D) y raíz (E y F) en familias nativas de tomate expuestas a diferentes dosis de P (A, C y E) y K (B, D y F), 45 días después del trasplante..	37
Figura 6. Efecto de la dosis de fósforo (A, D y G), del genotipo (B, E y H) y dosis×genotipo (C, F e I) en el número total de frutos (NTF) (A, B y C), frutos (NFD Ca ²⁺) (D, E y F) y peso fresco de frutos con déficit de Ca ²⁺ (PFFD Ca ²⁺)(G, H e I) por planta, 90 días después del trasplante.....	57
Figura 7. Efecto de la dosis de fósforo (A y D), del genotipo (B y E) y dosis×genotipo (C y F) en el peso fresco de frutos (PFFSD Ca ²⁺) (A, B y C) y materia seca de frutos sin déficit de calcio (MSFSD Ca ²⁺) (D, E y F) por planta, 90 días después del trasplante..	59
Figura 8. Efecto de la dosis de fósforo (A), del genotipo (B) y dosis×genotipo (C) en el rendimiento de fruto por planta, 90 días después del trasplante.	60
Figura 9. Efecto de la dosis de fósforo (A), del genotipo (B) y dosis×genotipo (C) en la concentración de fósforo en la hoja, tallo, raíz y fruto, 90 días después del trasplante..	64

Figura 10. Relación del fertilizante fosfatado/nitrogenado (g) (A), potásico/nitrogenado (B) y fosfatado/potásico (C), para obtener 1 kg de materia seca en familias nativas de tomate.77

INTRODUCCIÓN GENERAL

México se clasifica como uno de los 17 países megadiversos del mundo, lo que significa que pertenece a un grupo de naciones que alberga la mayoría de todas las especies de la Tierra, además, cuenta con gran cantidad de especies endémicas (Jefferson *et al.*, 2018).

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) pertenece a la familia Solanaceae, que cuenta aproximadamente con 100 géneros y 3000 especies, incluidas varias plantas de importancia agronómica como: la papa (*Solanum tuberosum* L.), la berenjena (*Solanum melongena* L.) el chile (*Capsicum annuum* L.) y el tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) (Knapp y Peralta, 2016).

Además de *S. lycopersicum* L., existe una gran diversidad del tomate, como *S. cheesmaniae*, *S. galapagense*, *S. pimpinellifolium* L., *S. arcanum*, *S. chilense* R., *S. chmielewskii*, *S. corneliomulleri*, *S. habrochaites* S., *S. neorickii*, *S. pennellii* L., y *S. peruvianum* L., (Peralta y Spooner, 2007); además, existen muchos términos para identificar a los materiales nativos de tomate como variedades locales, poblaciones locales, cultivares tradicionales, variedades de agricultores y variedades tradicionales o primitivas. Las variedades locales tienen cierta integridad genética; se reconocen por su morfología, se adaptan a diversos tipos de suelo, presentan variaciones en la fecha de madurez del fruto, altura de la planta, valor nutritivo y uso de fruto; y se pueden emplear para mejorar la genética de los cultivos actuales, ya que son fuente de germoplasma; asimismo, el término raza autóctona se emplea para definir a una variedad local, la cual presenta mayor capacidad para tolerar el estrés biótico o abiótico, y en un sistema agrícola de bajos insumos, producen un rendimiento de fruto intermedio, con respecto al que generan los cultivos de tomate híbridos (Al shaye *et al.*, 2018; Negri *et al.*, 2009; Zeven, 1998).

Las plantas de tomates nativos pueden superar la calidad del fruto de las variedades comerciales, por presentar más ácido ascórbico (vitamina C), ácido cítrico, sólidos solubles totales (Berrospe-Ochoa *et al.*, 2018), licopeno y β -caroteno (Juárez-López *et al.*, 2009); asimismo, las plantas de tomate que son resultado del mejoramiento genético, presentan una diversidad genómica de 5 %; es decir, muestran un bajo polimorfismo a nivel de ADN, debido a que son autógamias, sin embargo, las plantas silvestres presentan una diversidad genómica de 95 % (Choudhary *et al.*, 2018; Flores-Hernández *et al.*, 2018). Délices *et al.* (2019) indican que, gracias a la plasticidad y capacidad de adaptación de las plantas de tomate, estas se pueden encontrar en ambientes muy diferentes a los

del centro de origen (América del sur), como en el estado de Veracruz, México, que alberga gran diversidad de especies de tomate.

Las plantas de tomate se adaptan a diferentes ambientes climáticos, y debido a que presentan gran capacidad de producción de semillas, un genoma de 950 Mb, alta homocigosis y al control de la polinización e hibridación, son un excelente modelo en los programas de investigación básica y aplicada, además, las plantas se pueden generar asexualmente a partir de explantes, o con la técnica del injerto, donde se emplean portainjertos (Gerszberg *et al.*, 2015).

En los sistemas intensivos de tomate, los productores utilizan plantas injertadas, cuyo objetivo final del portainjerto es incrementar el rendimiento de fruto de la variedad élite, sin embargo, en México no se han registrado genotipos para tal propósito, pero existe un registro de 16 variedades de *S. lycopersicum* que se generaron a partir de materiales nativos (Jefferson *et al.*, 2018). Como parte del proceso para crear portainjertos se desarrollan estudios genéticos y morfológicos (Vela-Hinojosa *et al.*, 2018; Rajae *et al.*, 2018; Ravindra *et al.*, 2018), fenotípicos y agronómicos (Maldonado-Peralta *et al.*, 2016), y de resistencia a enfermedades (*Fusarium* spp.) (Isaac *et al.*, 2018), para seleccionar al mejor padre, y realizar las cruzas interespecíficas o intergenéricas. Posteriormente, el portainjerto deber ser genética y fisiológicamente compatible con el vástago, para transferirle las características agronómicas por la cuales se seleccionó.

Los portainjertos de tomate son el resultado de la detección de germoplasma existente, sin embargo, las empresas privadas crean estos materiales con cruzas entre plantas de tomate, al respecto, las principales fuentes genéticas para crear portainjertos son los híbridos de tomate, y los híbridos interespecíficos de *S. lycopersicon* L., × *S. habrochaites* S.

Internacionalmente se comercializan varios portainjertos de tomate como: Maxifort, Beaufort (DeRuiters Seeds, Bergschenhoek, Holanda), He-Man (Syngenta Seeds), Basel (Suiza), Resistar (Hazera Seeds), Shikmim (Israel), Emperador (Rijk Zwaan, De Lier, Holanda) y Robusta (Bruinsma Seeds) (King *et al.*, 2010); y en México, Velasco-Alvarado *et al.* (2017) reportan como portainjertos a las colectas, LOR-22, LOR-77, LOR-81, LOR-84, LOR-95 y LOR-100, e Ibrahim *et al.* (2001) reporta a los materiales silvestres *S. melongena* “Uttara”×*S. integrifolium*, *S. melongena* “DMP”×*S. integrifolium* y *S. sisymbriifolium*, para incrementar el rendimiento y la calidad del fruto; sin embargo, el propósito del injerto se ha diversificado, a temas como la

absorción de agua (Nilsen *et al.*, 2014), la tolerancia a salinidad (Huang *et al.*, 2013), a elementos tóxicos (Balal *et al.*, 2017), y a la absorción de nutrimentos (Nawaz *et al.*, 2016).

El nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) se encuentran en mayor concentración en el tejido de las plantas, asimismo, estos nutrimentos son absorbidos por medio de transportadores específicos de alta o baja afinidad. La actividad de algunos transportadores de absorción de N, P y K en la raíz, se regula tanto por la concentración celular como por el de la solución nutritiva. La importancia de optimizar el suministro del N, P y K radica en disminuir el exceso de fertilizantes aplicados en la agricultura, pero sin provocar el detrimento del crecimiento y rendimiento de los cultivos; por ello, los estudios nutrimentales y fisiológicos con enfoque en la absorción y asimilación de nutrientes, para identificar materiales vegetales con el mayor uso eficiente nutrimental es primordial para una agricultura sostenible.

OBJETIVO GENERAL

- ✓ Evaluar el suministro de nitrógeno, fósforo y potasio en las familias nativas 36, 300, 367, 457 y un portainjerto comercial (Protector, testigo) de tomate, seleccionar la mejor en el uso eficiente de los mismos nutrimentos, y evaluar su competitividad agronómica como portainjerto.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Evaluar tres dosis de suministro de nitrógeno en las familias nativas 36, 300, 367, 457 y un portainjerto comercial (Protector, testigo) de tomate, sobre el crecimiento, concentración, contenido y uso eficiente del N, en condiciones de invernadero e hidroponía.
- Evaluar tres dosis de suministro de fósforo en las familias nativas 36, 300, 367, 457 y un portainjerto comercial (Protector, testigo) de tomate, sobre el crecimiento, concentración, contenido y uso eficiente del P, en condiciones de invernadero e hidroponía.
- Evaluar tres dosis de suministro de potasio en las familias nativas 36, 300, 367, 457 y un portainjerto comercial (Protector, testigo) de tomate, sobre el crecimiento, concentración, contenido y uso eficiente del K, en condiciones de invernadero e hidroponía.
- Evaluar el efecto del suministro de fósforo en el crecimiento, rendimiento, concentración de fósforo en los diferentes órganos de la planta y la calidad del fruto de los genotipos sin

injertar Cid y FN-457, e injertados Cid/Protector y Cid/FN-457, en invernadero e hidroponía.

HIPÓTESIS GENERAL

- ✓ Las familias nativas de tomate 36, 300, 367 y 457 presentarán un crecimiento y desarrollo similar a Protector sometidas al déficit de nitrógeno, fósforo y potasio; y por ser materiales adaptados a suelos con baja disponibilidad de estos nutrimentos, presentarán mayor uso eficiente de los nutrimentos, que el portainjerto comercial.

HIPÓTESIS PARTICULARES

- Al menos una familia nativa de tomate, tendrá similar crecimiento, concentración, contenido y uso eficiente de N, que el portainjerto comercial Protector.
- Al menos una familia nativa de tomate, tendrá similar crecimiento, concentración, contenido y uso eficiente de P, que el portainjerto comercial Protector.
- Al menos una familia nativa de tomate, tendrá similar crecimiento, concentración, contenido y uso eficiente de K, que el portainjerto comercial Protector.
- El genotipo Cid/FN-457 tendrá una respuesta similar en crecimiento, rendimiento, concentración de P en hoja, tallo, raíz y fruto, y mantendrá la calidad del fruto que Cid y Cid/Protector, y presentará una respuesta superior que el de la familia nativa 457 sin injertar.

LITERATURA CITADA

- Al shaye, N., H. Migdadi, A. Charbaji, S. Alsayegh, S. Daoud, W. AL-Anazi, and S. Alghamdi.** 2018. Genetic variation among Saudi tomato (*Solanum lycopersicum* L.) landraces studied using SDS-PAGE and SRAP markers. Saudi Journal of Biological Sciences. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.04.014>
- Balal, R. M., M. A. Shahid, C. Vincent, L. Zotarelli, G. Liu, N. S. Mattson, B. Rathinasabapathi, J. J. Martínez-Nicolas, and F. García-Sánchez.** 2017. Kinnow mandarin plants grafted on tetraploid rootstocks are more tolerant to Cr-toxicity than those grafted on its diploids one. Environ. Exp. Bot. 140: 8-18.
- Berrospe-Ochoa, E. A., C. Saucedo-Veloz, M. E. Ramírez-Guzmán, y D. Saucedo-Reyes.** 2018. Componentes del sabor y contenido de ácido ascórbico de jitomates (*Solanum lycopersicum* L.) nativos e híbridos comerciales. Agrociencia. 52: 623-638.
- Bonilla-Barrientos, O., R. Lobato-Ortiz, J. Jesús García-Zavala, S. Cruz-Izquierdo, D. Reyes-López, E. Hernández-Leal, y A. Hernández-Bautista.** 2014. Diversidad agronómica y morfológica de tomates arriñonados y tipo pimienta de uso local en Puebla y Oaxaca, México. Revista Fitotecnia Mexicana. 37: 129-139.
- Choudhary, P., G. Kumar R., S. Bagati, D. Jamwal, D. Bhadwal, V. Raj S., and P. Kumar R.** 2018. Evaluation of genetic variability in tomato (*Solanum lycopersicum* L. Mill) genotypes using microsatellite markers. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 7: 2117-2124. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.701.255>
- Délices, G., O. R. Leyva O., C. Mota-Vargas, R. Núñez Pastrana, R. Gámez P., P. Andrés M., y R. Serna-Lagunes.** 2019. Biogeografía del tomate *Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme* (Solanaceae) en su centro de origen (sur de América) y de domesticación (México). Revista de Biología Tropical. 67: 1023-1036.
- Flores-Hernández, L. A., R. Lobato-Ortiz, D. M. Sangerman-Jarquín, J. J. García-Zavala, J. D. Molina-Galán, M. J. Velasco-Alvarado, and I. M. Marín-Montes.** 2018. Genetic diversity within wild species of Solanum. Revista Chapingo Serie Horticultura. 24: 1027-152X/2007-4034. <http://10.5154/r.rchsh.2017.08.030>
- Gerszberg, A., K. Hnatuszko-Konka, T. Kowalczyk, and A. K. Kononowicz.** 2015. Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in the service of biotechnology. Plant Cell Tissue and Organ Culture. 120: 881-902. <https://doi.org/10.1007/s11240-014-0664-4>

- Huang, Y., J. Li, B. Hua, Z. Liu, M. Fan, and Z. Bie.** 2013. Grafting onto different rootstocks as a means to improve watermelon tolerance to low potassium stress. *Science Horticulturae*. 149: 80-85.
- Ibrahim, M., M. K. Munira, M. S. Kabir, A. K. M. S. Islam, and M. M. U. Miah.** 2001. Seed germination and graft compatibility of wild *Solanum* as rootstock of tomato. *Journal of Biological Sciences*. 1: 701-703. <https://doi.org/10.3923/jbs.2001.701.703>
- Isaac, M. R., S. G. Leyva-Mir, J. Sahagún-Castellanos, K. Cámara-Correia, J. M. Tovar-Pedraza, y J. E. Rodríguez-Pérez.** 2018. Occurrence, identification, and pathogenicity of *Fusarium* spp. associated with tomato wilt in Mexico. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici*. 46: 484-493. <https://doi.org/10.15835/nbha46211095>
- Jefferson, D. J., I. S. Fraire, and L. F. Beltrán-Morales.** 2018. Intellectual property and the governance of plant genetic resources in Mexico: Trends and implications for research and innovation. In: Ortega-Rubio, A. (eds.). *Mexican natural resources management and biodiversity conservation*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90584-6_6
- Juárez-López, P., R. Castro-Brindis, T. Colinas-León, P. Ramírez-Vallejo, M. Sandoval-Villa, D. W. Reed, L. Cisneros-Zevallos, y S. King.** 2009. Evaluación de calidad en frutos de siete genotipos nativos de jitomate (*Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme*). *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 15: 5-9.
- King, S. R., A.R. Davis, X. Zhang, and K. Crosby.** 2010. Genetics, breeding and selection of rootstocks for Solanaceae and Cucurbitaceae. *Scientia Horticulturae*. 127: 106-111. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.08.001>
- Knapp, S., and I. E. Peralta** 2016. The tomato (*Solanum lycopersicum* L., Solanaceae) and its botanical relatives. In: Causse, M., J. Giovannoni, M. Bouzayen, and M. Zouine. (eds). *The tomato genome. Compendium of plant genomes*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53389-5_2
- Maldonado-Peralta, R., P. Ramírez-Vallejo, V. A. González Hernández, F. Castillo-González, M. Sandoval-Villa, M. Livera-Muñoz, y N. Cruz-Huerta.** 2016. Riqueza agronómica en colectas mexicanas de tomates (*Solanum lycopersicum* L.) nativos. *Agroproductividad*. 9: 68-75.

- Nawaz, M. A., M. Imtiaz, Q. Kong, F. Cheng, W. Ahmed, Y. Huang, and Z. Bie.** 2016. Grafting: A technique to modify ion accumulation in horticultural crops. *Frontier in Plant Science*. 7: 1-15.
- Negri, V., N. Maxted, and M. Veteläinen.** 2009. European landrace conservation: An introduction. *European Landraces on-farm Conservation Management use*. 1-22.
- Nilsen, E. T., J. Freeman, R. Grene, and J. Tokuhisa.** 2014. A rootstock provides water conservation for a grafted commercial tomato (*Solanum lycopersicum* L.) line in response to mild-drought conditions: A focus on vegetative growth and photosynthetic. *PLOS ONE*. 9: 1-22.
- Peralta, I. E., and D. M. Spooner.** 2007. History, origin and early cultivation of tomato (Solanaceae). In: *Genetic improvement of solanaceous crop: Tomato*. M. K. Razdan and A. K. Mattoo (eds). Science Publishers. Enfield, New Hampshire, USA. pp:1-24.
- Rajae, A., D. Mingeot, M. Addi, A. Elamrani, H. Caid S., A. Mihamou, and M. Abid.** 2017. Genetic assessment of moroccan tomato (*Solanum lycopersicum* L.) genotypes by RAPD and SSR markers. *Atlas Journal of Biology*. 384-391. ISSN-2158-9151.
- Ravindra, B. M. RVS. K. Reddy, K. Ravinder R., P. Saidaiah, and A. Snehalatha R.** 2018. Studies on genetic diversity in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). 7(SPI): 13-17.
- Souri, M. K., and S. Dehnavard.** 2018. Tomato plant growth, leaf nutrient concentrations and fruit quality under nitrogen foliar applications. *Advances in Horticultural Science*. 32: 41-47.
- Vela-Hinojosa, C., C. Barbosa-Martínez, H. B. Escalona-Buendía, J. A. Mendoza-Espinoza, R. Lobato-Ortiz, J. E. Rodríguez-Pérez, J. M. Villa-Hernández, L. J. Pérez-Flores.** 2018. Architectural diversity of the cuticle and epidermis of native and hybrid tomato fruit genotypes and the relation to polygalacturonase expression. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici*. 46: 45-51. <https://doi.org/10.15835/nbha46111001>
- Velasco-Alvarado, M. J., R. Lobato-Ortiz, J. J. García-Zavala, R. Castro-Brindis, S. Cruz-Izquierdo, T. Corona-Torres, and M. K. Moedano-Mariano.** 2017. Mexican native tomatoes as rootstocks to increase fruit yield. *Chilean Journal of Agricultural Research* 77(3): 187-193. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392017000300187>
- Zeven, A. C.** 1998. Landraces: a review of definitions and classifications. *Euphytica*. 104: 127-139.

CAPÍTULO 1. DÉFICIT DE NITRÓGENO EN CRECIMIENTO Y FISIOLOGÍA DE FAMILIAS NATIVAS DE TOMATE

1.1. RESUMEN

Las plantas tienen la habilidad de adaptarse a la disponibilidad de los nutrientes, este carácter se considera un determinante relevante de la resiliencia de los cultivos, entre ellos el tomate (*Solanum lycopersicum* L.). En México, el tomate es una de las hortalizas más importantes por el área del cultivo, la producción y consumo *per cápita*. En este estudio se evaluó la respuesta de cuatro familias nativas (FN) (36, 300, 367 y 457) y un portainjerto comercial de tomate, en tres dosis de N-NO₃⁻ (1.2, 2.4 y 4.8 mM L⁻¹) en la solución nutritiva Steiner. Se usó un diseño experimental completamente aleatorizado con arreglo de parcelas divididas. Las plantas se muestrearon 55 días después del trasplante. Se registraron las variables: área foliar (AF), tasa de asimilación de CO₂ (Ai), materia seca de hoja, tallo y raíz, y concentración, contenido y uso eficiente de nitrógeno (UEN) en los mismos órganos. Las plantas de tomate produjeron mayor AF (5054 cm²) y materia seca de hoja (37 g) con la aplicación de 4.8 mM L⁻¹ de NO₃⁻, mientras que, la mayor cantidad de materia seca en raíz y total se obtuvo con 2.4 mM. Además, la Ai se incrementó 33 % al aplicar 1.2 mM L⁻¹ respecto al tratamiento de 4.8 mM. Las plantas produjeron con la solución nutritiva de 1.2 y 4.8 mM de N-NO₃⁻ similares concentraciones, contenidos y usos eficientes de N en hoja y raíz. Las FN 367 y 457 presentaron similar UEN en hoja y tallo que Protector, por lo anterior y debido a que las tasas de aplicación de N pueden ser uno de los factores a considerar en la selección de FN de tomate, dichos materiales se pueden incorporar a programas de mejoramiento genético.

Palabras clave: *Solanum lycopersicum* L., concentración, contenido y uso eficiente de nitrógeno, familias nativas de tomate.

1.2. ABSTRACT

Plants have the ability to adapt to the availability of nutrients, this character is considered a relevant determinant of crop resilience, including tomato (*Solanum lycopersicum* L.). In Mexico, the tomato is one of the most important vegetables for the area of cultivation, production and consumption *per capita*. In this study, the response of four native families (NF) (36, 300, 367 and 457) and a commercial tomato rootstock were evaluated in three doses of N-NO₃⁻ (1.2, 2.4 and 4.8 mM L⁻¹) in the Steiner nutritional solution. An experimental design of randomized divided plots was used. Plants were sampled 55 days after transplanting. Variables were recorded: leaf area (LA), CO₂ assimilation rate (*A_i*), dry matter of leaf, stem and root, and concentration, content and efficient use of nitrogen (EUN) in the same organs. Tomato plants produced higher LA (5054 cm²) and leaf dry matter (37 g) with application of 4.8 mM L⁻¹ of NO₃⁻, while the highest total and root dry matter was obtained with 2.4 mM. In addition, *A_i* increased 33% when applying 1.2 mM L⁻¹ compared to 4.8 mM treatment. The plants produced with the nutrient solution of 1.2 and 4.8 mM of N-NO₃⁻ similar concentrations, contents and efficient uses of N in leaf and root. The NF 367 and 457 presented a similar EUN in leaf and stem as Protector, due to the above and because the application rates of N may be one of the factors to consider in the selection of tomato NF, these materials can be incorporated into genetic improvement programs.

Keywords: *Solanum lycopersicum* L., concentration, content and nitrogen use efficiency, native families of tomato.

1.3. INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es un elemento crítico para las plantas y juega un papel primordial en el crecimiento, proliferación y funcionamiento de la raíz. La aplicación excesiva de N al suelo incrementa la emisión de gases de efecto invernadero (N_2O , NO_2 y NO), por ello es necesario regular la aplicación, incrementar la absorción y uso de dicho nutrimento, mediante el uso de nuevos genotipos, que además, permitan disminuir la contaminación y polución que este causa (Yang *et al.*, 2018; García-Velázquez y Gallardo, 2017; Ríos-Osorio *et al.*, 2014).

La Asociación Internacional de la Industria de Fertilizantes y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente estiman que 1 Mg de fertilizante nitrogenado que se sintetizó por el proceso Haber-Bosch consume 873 m^3 de gas natural (Xu *et al.*, 2012); asimismo, de no cultivar materiales vegetales eficientes en la absorción de N, se estima que la aplicación de N aumente tres veces en los próximos 40 años. Los fertilizantes nitrogenados son los más costosos, al depender de la energía eléctrica fósil; sin embargo, un incremento en la eficiencia de absorción del N (EAN, capacidad del sistema radicular para adquirir el N de la solución del suelo, expresado como porcentaje de fertilizante nitrogenado adquirido por la planta) en 1 % en los cultivos equivale a ahorrar aproximadamente 1.1 billón de USD al año (Kant *et al.*, 2011); dicho incremento, disminuirá la pérdida de N en el suelo a causa de la lixiviación, desnitrificación, volatilización y consumo microbiano en alrededor del 50 % (García-Velázquez y Gallardo, 2017; Ahmed *et al.*, 2017). En la producción de cultivos se aplican entre 85 y 90 millones de Mg de N por año en el mundo. Sin embargo, el costo creciente de la energía eléctrica para elaborar fertilizantes nitrogenados, ha estimulado la investigación para mejorar la eficiencia de absorción, mediante el uso de nuevas tecnologías, variedades, híbridos y técnicas (el injerto) que remuevan eficientemente los nutrimentos aplicados al suelo (Masclaux-Daubresse *et al.*, 2010; Borisev *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2013). Al respecto, varios autores señalan que la dosis óptima de N para el cultivo de tomate, es diversa, tanto entre las dosis que se aplican en suelo, como en la SN, que van de 110 a 200 kg ha^{-1} y de 4 a 50 mM L^{-1} de N (Khavari-Nejad *et al.*, 2009; Frias-Moreno *et al.*, 2014; Larbat *et al.*, 2014).

El ion NO_3^- es la principal fuente de absorción de N para muchos cultivos, y debido a la necesidad de enfrentar los problemas de fertilidad del suelo y de incrementar el rendimiento de los cultivos, es necesario seleccionar genotipos eficientes en la absorción y uso de dicho nutrimento

(Colla *et al.*, 2010; Xu *et al.*, 2012). Al respecto, la biotecnología y el mejoramiento genético son responsables del 55 % del incremento en rendimiento de los cultivos (He, 2016). Asimismo, los portainjertos pueden incrementar la absorción de nutrimentos, respecto a las plantas sin injertar (Kyriacou *et al.*, 2017; Turhan *et al.*, 2011); por ejemplo, las accesiones de *Legenaria siceraria* (L43, L46, L48, L50, L54 y L56), al ser injertadas con sandía (*Citrillus lunatus* L.) superaron al material comercial en rendimiento e incrementan la absorción de N (Suárez-Hernández *et al.*, 2016).

La absorción de NO_3^- y concentración de N es función de la edad y etapa fenológica. Por lo anterior, y debido a la diversidad de dosis de N que se aplican a las variedades comerciales, y a que las familias nativas (FN) de tomate por lo general no se fertilizan, prosperan en condiciones edafoclimáticas totalmente adversas, y a que representan un recurso genético estratégico para el desarrollo sostenible (Ríos-Osorio *et al.*, 2014), el objetivo del presente estudio fue evaluar el suministro de tres dosis de N, en cuatro familias nativas y un portainjerto comercial (Protector, testigo) de tomate, mediante la cuantificación del crecimiento, concentración, contenido y uso eficiente del N en condiciones de invernadero e hidroponía. La hipótesis es que al menos una familia nativa de tomate tendrá el mismo comportamiento que el portainjerto comercial.

1.4. MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en invernadero, ubicado en Texcoco, Estado de México (2240 m de altitud). Las FN de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) 36, 300, 367 y 457 se colectaron en México, en los estados de Puebla, Guerrero, Estado de México y Veracruz. El portainjerto comercial fue Protector (Harris Moran[®]).

Las semillas de las FN 36, 300, 367, 457 y Protector, se sembraron en charolas de unicel de 200 cavidades, de 25 mL por alveolo, con turba (peat moss, Premier) como sustrato. Las plántulas de tomate se fertilizaron con la solución nutritiva Steiner (SNS) al 20, 30 y 50 % los primeros cuatro, diez y 30 días después de la emergencia, y se trasplantaron 45 días después de la siembra (dds) para obtener una plántula de calidad (Misu *et al.*, 2018), en macetas de polietileno negro de 10 L, que contenían 5 L de arena como sustrato, para facilitar la extracción de la raíz. Las plántulas se condujeron a un tallo, y se eliminaron brotes laterales y racimos florales, lo anterior porque el objetivo final de un portainjerto, no fue la producción de frutos, sino de proveer al vástago

resistencia a plagas y enfermedades del suelo, precocidad de cosecha e incremento en la absorción de agua y nutrientes entre otros factores (Warschefsky *et al.*, 2016). La arena presentó pH_(1:2) de 6.0, conductividad eléctrica (CE) de 0.44 dS m⁻¹, densidad aparente de 1.49 g cm⁻³, y partículas <0.1, 0.1, 0.25 y 0.5 mm, en proporción de 12, 18, 19 y 32 % en el orden dado, que constituyen el 81 % de la muestra, y el resto (19 %) eran partículas de 1 a 4.7 mm. En cuanto a la capacidad de retención de agua, el sustrato presentó 56 y 44 % de material sólido y espacio poroso total, este último subdividido en 9.0 % en capacidad de aireación, 11.3 % en agua de fácil disposición (AFD), 7.4 % en agua de reserva (AR) y 16.0 % de agua de difícil disposición, y agua total disponible de 18.7 % (AFD + AR). El cultivo se fertirrigó con la SNS modificada a diferentes concentraciones de NO₃⁻: 1.2, 2.4 y 4.8 mM L⁻¹, equivalente a aplicar el 10, 20 y 40 % del N de la SNS que presenta una CE de 2.0 dS m⁻¹ (Cuadro 1).

Cuadro 1. Presión osmótica (PO), conductividad eléctrica (CE) y potencial osmótico (Ψ_o) de la solución nutritiva Steiner modificada a diferentes niveles de N-NO₃⁻.

N-NO ₃ ⁻ (mM L ⁻¹)	PO (Atm.) [†]	CE (dS m ⁻¹)	Ψ _o (MPa)
1.2	0.58	1.61	-0.058
2.4	0.61	1.70	-0.061
4.8	0.64	1.77	-0.064

[†]PO = Se calculó a partir de la suma total de los iones en mM L⁻¹ × 0.024; CE = PO/0.36; Ψ_o = PO* - 0.1.

El NO₃⁻ se agregó como Ca(NO₃)₂·4H₂O y KNO₃. Los iones Ca²⁺, H₂PO₄⁻, K⁺, Mg²⁺ y SO₄²⁻ se adicionaron con los fertilizantes comerciales: Ca(NO₃)₂·4H₂O, KH₂PO₄, K₂SO₄, MgSO₄·7H₂O, CaSO₄ y ácido sulfúrico (H₂SO₄), para ajustar el pH y como aporte de sulfatos. Los micronutrientes se incorporaron como quelatos de EDTA en cantidades de (mg L⁻¹): 3.0 de Fe, 1.4 de Mn, 0.3 de Zn, 0.11 de Cu, 0.5 de B (H₃BO₃), y 0.12 de Mo. El pH de la SNS se ajustó a 5.5-6.0. Las plantas se fertirrigaron con 1 L de SNS por maceta por día. La radiación fotosintéticamente activa en promedio de los 55 d de evaluación fue de 864 μmol m⁻² s⁻¹, medida entre las 13 y 14 hr.

A las plantas se les cuantificó la materia seca de la raíz (MSR), tallo (MST), hoja (SH) y total (MSTot), el área foliar (AF), la tasa de asimilación neta de CO₂ (Ai), la concentración de N en raíz,

tallo y hoja, 55 días después del trasplante (ddt). Los órganos de las plantas se secaron en una estufa (*FELISA*, Jalisco, México) con circulación de aire forzado a 70 ± 2.0 °C, hasta peso constante, medido con una balanza (Sartorius 1474, Alemania). La *Ai* se midió en ocho plantas con el analizador de gases infrarrojos LI-6400 (LI-COR®, Lincoln, NE, USA), en la hoja madura más próxima al ápice, de 11:30 a 13:30 h. El material vegetal de los órganos se molió (molino, Thomas Wiley Co, Philadelphia, PA, USA) y tamizó (malla no. 60), para determinar la concentración de N por el método semimicro-Kjeldahl, en dos muestras compuestas, cada una de ellas obtenida al mezclar el tejido de cada órgano de dos plantas diferentes, con estos datos se calculó el contenido y uso eficiente del nitrógeno (UEN), según Martínez-Andújar *et al.* (2017).

Como control de calidad de las mediciones de N, se emplearon dos materiales de referencia; el material de control de calidad (MCC) del Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental (hojas de frijol) del Colegio de Postgraduados y el ISP-6 (hojas de perejil) del Programa de Intercomparación de Suelos y Plantas (ISP) de México, este último analizado por los participantes del ISP en 1998. Se obtuvo en los MCC de frijol y perejil 1.54 y 3.02 % de N, que representaron 98.7 y 97.3 % de recuperación de N, respectivamente. El resultado del ISP-6 fue correcto con base en los resultados del Programa de Intercomparación 98.2, con un valor de Z-score menor a 1.

Se usó un diseño experimental completamente al azar, con arreglo de parcelas divididas, con tres tratamientos de N; las dosis de N y los genotipos representaron las parcelas grandes y chicas, con ocho repeticiones por genotipo. Se consideró a una planta como una repetición para las variables MSH, MST, MSR, MSTot, AF y la *Ai*. Se hizo un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$) de The SAS System 9.4.

1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las plantas produjeron los mejores resultados de AF y MSH con la dosis de 4.8 mM L^{-1} de N-NO_3^- , sin embargo, generaron la menor cantidad de MSR y *Ai*, mientras que, con 2.4 mM L^{-1} de N-NO_3^- , presentaron la mayor cantidad de MSR. Asimismo, las plantas que se fertirrigaron con 1.2 mM L^{-1} de N-NO_3^- incrementaron de manera significativa la *Ai* ($p \leq 0.05$) con respecto a la mayor dosis de N, lo cual explica la similitud estadística entre la MSTot. Abenavoli *et al.* (2016) reportan en tomate resultados similares de MSR al evaluar 0.1 y 5 mM L^{-1} de N-NO_3^- . Du *et al.* (2017) evaluaron en un cultivo de tomate las dosis de 250 y 350 kg ha^{-1} de N, y su respuesta a la *Ai*, y

reportan resultados similares a los del presente estudio, e indican que la menor dosis de N incrementó 33 % la producción de MSTot, y en este ensayo, las plantas que crecieron con 1.2 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻ aumentaron 33 % la *Ai*, respecto a la que presentaron las plantas que se abastecieron con 4.8 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻, pero no se observó mayor producción de AF o MSTot (Cuadro 2).

Cuadro 2. Efecto de las dosis de N-NO₃⁻ en el área foliar, materia seca de la hoja, tallo, raíz, total y tasa de asimilación neta de CO₂, 55 días después del trasplante.

N-NO ₃ ^{-†}	AF	Materia seca (g órgano ⁻¹)				<i>Ai</i>
	cm ²	Hoja	Tallo	Raíz	Total	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹
1.2	4154.0 b	25.3 b	15.9 a	39.1 b	80.5 b	13.4 a
2.4	3946.9 b	26.3 b	16.1 a	60.6 a	103.1 a	12.1 ab
4.8	5054.5 a	36.8 a	15.9 a	36.2 b	88.9 ab	10.4 b
CV (%)	14.4	20.5	22.7	15.2	21.3	28.6
DMSH	629.7	4.3	1.5	13.1	16.4	2.3

Medias con letras iguales en las columnas son estadísticamente similares (Tukey; $p \leq 0.05$). [†]N-NO₃⁻ = mmol L⁻¹; *Ai* = Tasa de asimilación neta de CO₂; CV = Coeficiente de variación; DMSH = Diferencia mínima significativa honesta. n = 8.

Los cultivos evaluados y seleccionados en ambientes ricos de nutrimentos, presentan una baja producción de fruto, debido que no muestran adaptaciones al ambiente que limita su crecimiento y desarrollo, tal como la baja disposición de nutrimentos (Xu *et al.*, 2012), por ello, el portainjerto Protector obtuvo una *Ai*, 8 % menor que la FN 457, sin embargo, este material produjo la mayor AF y materia seca en los diferentes órganos, lo cual se debió al mejoramiento genético; mientras que, la FN-367 presentó un AF similar al testigo, pero produjo la mayor cantidad de MSH y MSTot de entre las FN, que se debe a la capacidad de conversión de CO₂ en estructuras carbonadas, y además, se reflejó en una mayor producción de AF y MSH (Ríos-Osorio *et al.*, 2014) (Cuadro 3).

Las plantas presentaron un AF diferente en términos estadísticos entre los tratamientos y genotipos ($p \leq 0.05$). La FN 367 presentó con 4.8 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻, un AF de 6613 cm², 11 % más que Protector, pero Protector con 2.4 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻ generó 25 % más AF que la FN 367; y ambos materiales produjeron en promedio 48.5 g de MSH con 4.8 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻, y con este tratamiento de N, las plantas generaron en promedio, 31 y 28 % más MSH, que con 1.2 y 2.4 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻. La mayor cantidad de MST se obtuvo con Protector al aplicar cualquier dosis de N-

NO₃⁻, con un promedio de los tres tratamientos de 27.4 g, y superó en 52 % a lo que generaron las FN. Las plantas de tomate generaron una cantidad diferente de MSR, tanto entre las dosis como entre los genotipos ($p \leq 0.05$), y, se observó que la cantidad de MST afectó en mayor medida la variable MSTot, ya que Protector en general generó más MSR, que en hoja y tallo, mientras que, las FN generaron con 1.2 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻ más MST, que en hoja y raíz, pero con la dosis de 4.8 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻ produjeron más MSH, que en raíz y tallo, lo cual indica que, las FN al ser abastecidas con más N-NO₃⁻, tienen la capacidad de generar más MSH e incrementar la cantidad de MSTot. Además, se observó que la *Ai* no explica el AF, ni la distribución de la materia seca de los genotipos, ya que la FN 457 y Protector del tratamiento con 1.2 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻ fijaron en promedio 29 % más CO₂ que las plantas de los otros tratamientos (Cuadro 4).

Cuadro 3. Área foliar, materia seca de hoja, tallo, raíz, total y tasa de asimilación neta de CO₂ en familias nativas de tomate, 55 días después del trasplante.

Familia	AF [†]	Materia seca (g órgano ⁻¹)				<i>Ai</i>
	cm ²	Hoja	Tallo	Raíz	Total	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹
nativa						
36	3705.7 c	24.0 c	11.5 b	46.7 b	82.2 bc	11.7 ab
300	3757.8 c	25.2 c	14.1 b	40.7 bc	80.0 bc	10.1 b
367	4949.1 ab	33.1 b	14.2 b	41.2 bc	88.6 b	12.0 ab
457	4137.0 bc	26.7 c	12.7 b	23.6 c	63.1 c	13.6 a
Protector	5376.3 a	38.3 a	27.4 a	74.4 a	140.2 a	12.5 ab
CV (%)	14.4	20.5	22.7	15.2	21.3	28.6
DMSH	1165.4	5.1	3.2	27.5	25.5	3.5

Medias con letras iguales en las columnas son estadísticamente similares (Tukey; $p \leq 0.05$). [†]AF = Área foliar; *Ai* = Tasa de asimilación neta de CO₂; CV = Coeficiente de variación; DMS = Diferencia mínima significativa honesta. n = 8.

Las plantas de tomate presentaron similar concentración de N en hoja y raíz ($p \leq 0.05$), cuando se abastecieron con 1.2 y 4.8 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻, sin embargo, con la dosis de 4.8 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻ las plantas exhibieron en el tallo una concentración de N promedio 30 % mayor, respecto al que mostraron con las otras dosis (Figura 1-A). Asimismo, la FN 367 presentó 15 % más N que Protector, al ser abastecida con 4.8 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻, y, esta misma FN con las dosis de 1.2 y 2.4 mM de N-NO₃⁻ presentó en promedio 15 % más N en la hoja que el testigo (Figura 1-B). Las

plantas presentaron mayor concentración de N en el tallo, con forme se incrementó la dosis de N-NO₃⁻. La FN 36 del tratamiento con 4.8 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻, acumuló 18 % más N que Protector del mismo tratamiento, pero Protector presentó la menor concentración de N al aplicar 1.2 y 2.4 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻ (Figura 1-C).

Cuadro 4. Efecto de la dosis de N-NO₃⁻ en el área foliar, materia seca de hoja, tallo, raíz, total y tasa de asimilación neta de CO₂ en familias nativas de tomate, 55 días después del trasplante.

N-NO ₃ ^{-†}	Familia nativa	AF	Materia seca (g órgano ⁻¹)				Ai
		cm ²	Hoja	Tallo	Raíz	Total	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹
1.2	36	3469.8 cd	21.2 c	11.7 b	44.9 bcde	77.8 cd	13.0 ab
	300	4060.5 bcd	23.0 bc	14.6 b	38.9 bcde	76.6 cd	11.0 ab
	367	4304.6 bcd	26.8 bc	13.9 b	35.8 cde	76.6 cd	13.0 ab
	457	3976.6 cd	24.3 bc	12.8 b	21.2 e	58.3 d	15.1 a
	Protector	4958.6 abcd	31.3 bc	26.7 a	54.9 a-e	112.9 a-c	15.1 a
2.4	36	3638.3 cd	22.8 bc	12.0 b	69.9 a-c	104.8 b-d	11.7 ab
	300	3261.4 d	25.1 bc	15.3 b	63.4 a-d	103.9 b-d	10.5 ab
	367	3929.3 cd	27.2 bc	13.5 b	48.5 bcde	89.3 cd	12.1 ab
	457	3645.9 cd	24.7 bc	12.7 b	31.2 cde	68.7 cd	14.4 ab
	Protector	5259.8 abc	31.9 b	26.9 a	89.9 a	148.7 ab	11.7 ab
4.8	36	4009.0 cd	28.1 bc	10.6 b	25.2 de	63.9 cd	10.3 ab
	300	3951.4 cd	27.5 bc	12.3 b	19.7 e	59.6 d	8.9 b
	367	6613.4 a	45.2 a	15.3 b	39.2 bcde	99.7 bcd	10.8 ab
	457	4788.4 abcd	31.3 bc	12.6 b	18.4 e	62.3 d	11.3 ab
	Protector	5910.6 ab	51.7 a	28.6 a	78.4 ab	158.8 a	10.8 ab
CV (%)		14.4	20.5	22.7	15.2	21.3	28.6
DMSH		1642.4	13.3	11.4	36.8	50.4	6.2

Medias con letras iguales en las columnas son estadísticamente similares (Tukey; $p \leq 0.05$). †N-NO₃⁻ = mmol L⁻¹; AF = Área foliar; Ai = Tasa de asimilación neta de CO₂; CV = Coeficiente de variación; DMS = Diferencia mínima significativa honesta. n = 8.

Las plantas presentaron una concentración de N en la raíz diferente ($p \leq 0.05$) entre tratamientos y genotipos; sin embargo, las FN de tomate del tratamiento con 1.2 mM L^{-1} de N-NO_3^- en la SNS, mostraron una concentración de N en promedio 30 % mayor que Protector del mismo tratamiento, pero al ser fertilizadas con 2.4 mM L^{-1} de N-NO_3^- exhibieron una concentración de N 16 % menor, que el presentado con 4.8 mM L^{-1} de N-NO_3^- (Figura 1-D).

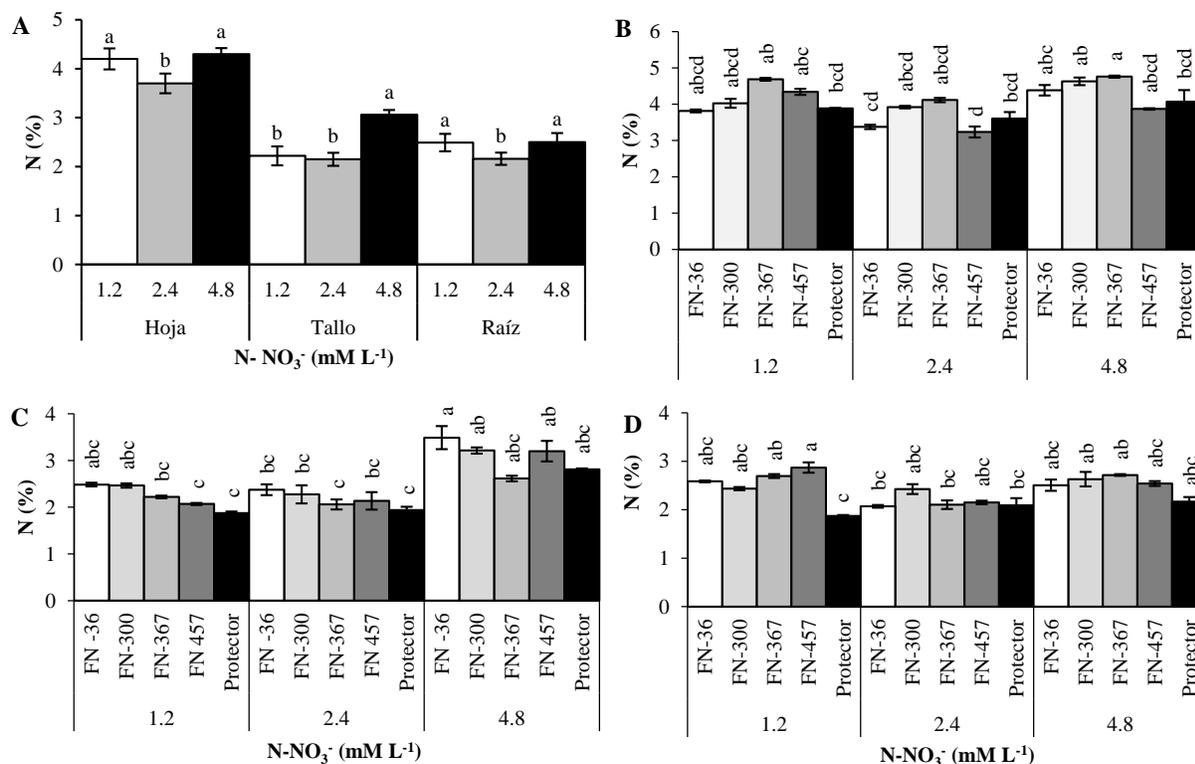


Figura 1. Efecto de la dosis de N-NO_3^- en la concentración de N en hoja, tallo y raíz (A), en hoja (B), tallo (C) y raíz (D) de familias nativas de tomate, 55 días después del trasplante. Letras similares entre las dosis, órganos y dosis×órgano en cada gráfica son estadísticamente iguales (Tukey; $p \leq 0.05$). Barras, media \pm desviación estándar. $n = 2$.

Las FN 300 y 367 presentaron 10 % más concentración de N en hoja, que resto de los materiales. Además, las FN exhibieron en tallo y raíz, una concentración de N, 15 y 20 % superior que Protector. Lo anterior sugiere que las FN tienen mayor capacidad para adquirir el N aplicado, sin embargo, al no ser materiales mejorados genéticamente, falta que esa capacidad de absorción de N, se refleje en conversión de materia seca (Figura 2).

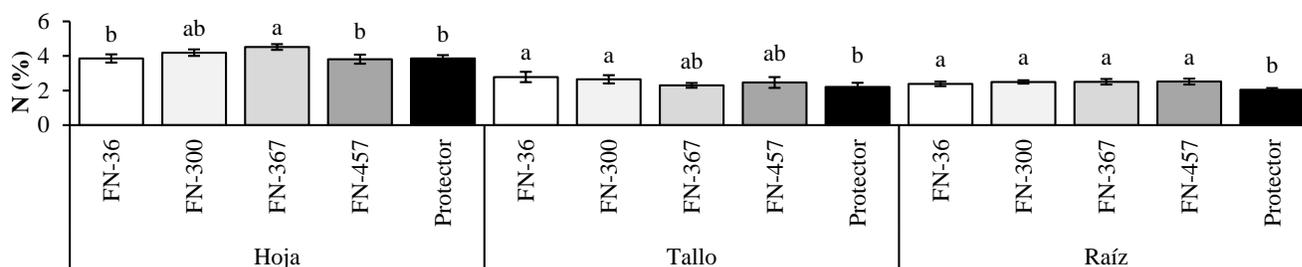


Figura 2. Concentración de N en hoja, tallo y raíz en familias nativas de tomate, 55 días después del trasplante. Letras similares en cada órgano son estadísticamente iguales (Tukey; $p \leq 0.05$). Barras, media \pm desviación estándar. $n = 2$.

Las plantas de tomate del tratamiento con 4.8 mM L^{-1} de N-NO_3^- presentaron un contenido de N en hoja, 36 y 40 % mayor, respecto al que mostraron las plantas de las dosis de 1.2 y 2.4 mM L^{-1} de N-NO_3^- , lo cual se explica por la cantidad de MSH que produjeron las plantas en cada tratamiento. En tallo, la mayor concentración de N se obtuvo al aplicar 4.8 mM L^{-1} de N-NO_3^- , sin embargo, las plantas acumularon una cantidad similar ($p \leq 0.05$) de N entre las dosis de 1.2 y 4.8 mM L^{-1} de N-NO_3^- , mientras que, las raíces acumularon 17 y 33 % más N cuando se abastecieron con 1.2 y 2.4 mM L^{-1} de N-NO_3^- , con respecto al que almacenaron cuando se trataron con 4.8 mM L^{-1} de N-NO_3^- , a pesar de que las plantas presentaron la menor concentración de N con 2.4 mM L^{-1} de N-NO_3^- , generaron la mayor cantidad de MSR.

El contenido total de N, fue similar en términos estadísticos entre las dosis de N ($p \leq 0.05$), lo cual se debió a la cantidad de MSTot y concentración de N en los órganos, e indica que las plantas fertilizadas con la SNS que contiene 4.8 mM L^{-1} de N-NO_3^- , translocan y acumulan el N en las hojas y raíces en lugar de almacenarlo en el tallo, mientras que, las plantas fertilizadas con 1.2 mM L^{-1} de NO_3^- acumulan el N en la raíz, seguido de la hoja y tallo (Cuadro 5).

El mayor UEN en hoja y raíz se obtuvo al aplicar 2.4 mM de N-NO_3^- , mientras que, en tallo aplicar 1.2 o 2.4 mM L^{-1} de N-NO_3^- , las plantas produjeron cantidades similares de materia seca, pero superaron en 28 % a lo que generaron las plantas del tratamiento con 4.8 mM de N-NO_3^- , por consiguiente, a menor dosis de N, mayor es el UEN (Cuadro 4). Chakwizira *et al.* (2016) reportaron en betabel una concentración de N de 2.5 a 3.5 % en hoja y de 0.5 a 1.3 % en raíz, al aplicar en suelo 100 y 200 kg ha^{-1} de N, además, obtuvieron cantidad similares de MSTot después de 60 d. Farneselli *et al.* (2015) reportan que al aplicar en el cultivo de tomate, 100 o 300 kg ha^{-1} de N de un fertilizante comercial (7.5 % de N-NO_3^- , 7.5 % N-NH_4^+ y 15 % de N en forma de urea), las

plantas producen la misma cantidad de MSTot (10.7 y 10.6 Mg ha⁻¹). Abenavoli *et al.* (2016) al evaluar tres genotipos de tomate y dos dosis de NO₃⁻ (0.1 y 5 mM) reportan efectos similares de UEN en hoja con valores de 27 a 17 mg MS mg⁻¹ N, valores que indican que el UEN depende el cultivo y de la dosis de fertilización.

Los resultados del presente estudio indican que las FN presentan la mayor concentración de N en hoja, tallo y raíz, con respecto al material comercial (Figura 2). Sin embargo, en hoja el contenido de N fue similar entre Protector y la FN 367, mientras que, en raíz el contenido de N fue similar entre las FN 36, 300, 367 y Protector. En tallo, el contenido total N de las FN (287-379 mg) indica que, estas prefieren acumular el N en hoja y raíz, para mantener los procesos fisiológicos activos, que acumularlo en el tallo, que es lo que las plantas Protector hacen, ya que para esta variable se obtuvo similitud estadística entre la FN 367 y Protector (Cuadro 6).

Cuadro 5. Efecto de la dosis de N-NO₃⁻ en el contenido y uso eficiente del nitrógeno (UEN) en familias nativas de tomate, 55 días después del trasplante.

N-NO ₃ ^{-†}	Contenido de N (mg N órgano ⁻¹)				UEN (mg de MS mg ⁻¹ N)		
	Hoja	Tallo	Raíz	Total	Hoja	Tallo	Raíz
1.2	1043.8 b	361.9 ab	1 072.6 ab	2 478.4 a	24.3 b	45.5 a	41.1 b
2.4	964.5 b	341.6 b	1 365.2 a	2 671.3 a	27.7 a	47.0 a	46.5 a
4.8	1635.7 a	456.5 a	893.3 b	2 993.8 a	23.2 b	33.2 b	40.2 b
CV (%)	17.6	20.6	22.8	12.4	7.1	9.6	7.7
DMSH	302.1	106.3	403.5	639.8	1.7	6.9	3.8

Medias con letras iguales en las columnas son estadísticamente similares (Tukey; p ≤ 0.05). †N-NO₃⁻ = mmol L⁻¹; CV = Coeficiente de variación; DMS = Diferencia mínima significativa honesta. n = 8.

En cuanto al UEN en hoja, se observó que la FN 367 disminuyó la producción de materia seca en 15 % en comparación con el resto de los materiales, mientras que, en tallo la FN 367, 457 y Protector generaron, en promedio, 15 % más materia seca, que la FN 36 y 300, es decir, presentaron mayor eficiencia en el uso de N. Además, la raíz del material comercial presentó un UEN 17 % mayor que el mostrado por las FN, lo cual explica la mayor producción de MST y el contenido de N en dichos órganos (Cuadro 6).

La FN 367 con la dosis de 4.8 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻ presentó el mayor contenido de N en hoja, y acumuló 32 % más, respecto a la FN 457, y superó en contenido de N a Protector en 18 y 13 % evaluado con las dosis de 1.2 y 2.4 mM L⁻¹ N-NO₃⁻. Asimismo, la FN 36 presentó en el tallo un contenido de N 46, 44 y 20 % mayor que Protector, lo anterior al aplicar 1.2, 2.4 y 4.8 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻, en el orden dado. Además, Protector evaluado con 1.2 y 2.4 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻ acumuló en la raíz menos N respecto al que presentaron las FN, sin embargo, dicho material presentó el mayor UEN en dicho órgano.

Cuadro 6. Contenido y uso eficiente de nitrógeno (UEN) en familias nativas de tomate, 55 días después del trasplante.

Familia nativa	Contenido de N (mg N órgano ⁻¹)				UEN (mg de MS mg ⁻¹ N)		
	Hoja	Tallo	Raíz	Total	Hoja	Tallo	Raíz
36	937.7 c	345.0 b	1288.8 a	2579.9 bc	26.2 a	37.1 b	42.3 b
300	1045.4 c	379.5 b	1149.9 a	2574.9 bc	24.0 ab	38.7 b	40.2 b
367	1539.8 a	318.0 b	1177.8 a	3035.6 ab	22.2 b	44.0 ab	40.6 b
457	1096.4 bc	287.4 b	582.1 b	1965.6 c	26.7 a	42.5 ab	40.3 b
Protector	1453.7 ab	603.4 a	1353.3 a	3416.5 a	26.1 a	46.9 a	49.4 a
CV (%)	17.6	20.6	22.8	12.4	7.1	9.6	7.7
DMSH	247.2	223.9	536.3	545.3	4.3	8.1	7.1

Medias con letras iguales en las columnas son estadísticamente similares (Tukey; $p \leq 0.05$). [†]CV = Coeficiente de variación; DMS = Diferencia mínima significativa honesta. n = 8.

Las plantas presentaron un contenido total de N diferente en términos estadísticos ($p \leq 0.05$) en los resultados de los genotipos; sin embargo, las FN 36, 300 y 367 que se evaluaron con 4.8 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻ en la SNS superaron a Protector en el contenido total de N en 27, 24 y 12 %, con respecto al que mostraron las plantas que se abastecieron con la dosis de 1.2 y 2.4 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻, por lo que las FN al ser fertilizadas con más N-NO₃⁻ (4.8 mM) pueden acumular más N que el material comercial, e indica que dichos materiales tienen potencial para mejorarse genéticamente.

La FN 457 presentó el mayor UEN en hoja cuando se aplicó 2.4 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻, a pesar de acumular menos N en dicho órgano, asimismo, Protector obtuvo el mayor UEN en tallo y raíz al

aplicar 1.2 mM de N-NO₃⁻. Cabe destacar que, a menor concentración y contenido de N, mayor es el UEN y viceversa (Cuadro 7).

Cuadro 7. Efecto de la dosis de N-NO₃⁻ en el contenido y uso eficiente de nitrógeno (UEN) en familias nativas de tomate, 55 días después del trasplante.

N-NO ₃ ⁻	Familia nativa	Contenido de N (mg N órgano ⁻¹)				UEN (mg MS mg ⁻¹ N)		
		Hoja	Tallo	Raíz	Total	Hoja	Tallo	Raíz
1.2	36	38.1 a-d	24.9 a-c	25.9 a-c	88.9 b-f	26.2 a-c	40.2 a-d	38.6 b
	300	40.2 a-d	24.6 a-c	24.4 a-c	89.3 b-e	24.9 a-c	40.6 a-d	41.0 ab
	367	46.9 ab	22.2 bc	26.9 ab	96.0 abc	21.3 c	44.9 a-d	37.2 b
	457	43.4 abc	20.7 c	28.7 a	92.8 abcd	23.0 bc	48.4 ab	34.9 b
	Protector	38.8 a-d	18.7 c	18.7 c	76.2 fg	25.7 a-c	53.4 a	53.5 a
2.4	36	33.8 cd	23.7 bc	20.7 bc	78.2 e-g	29.6 ab	42.3 a-d	46.4 ab
	300	39.2 a-d	22.7 bc	24.8 a-c	86.2 c-g	25.5 a-c	44.5 a-d	48.7 ab
	367	41.1 a-d	20.5 c	21.0 bc	82.7 d-g	24.3 abc	48.9 ab	41.3 ab
	457	32.3 c	21.3 bc	21.5 a-c	75.1 g	31.0 a	47.7 abc	47.7 ab
	Protector	36.1 bcd	19.4 c	20.9 bc	76.3 fg	27.8 abc	51.7 ab	46.5 ab
4.8	36	43.9 abc	34.9 a	25.0 a-c	103.8 a	22.8 bc	28.9 d	40.1 ab
	300	46.3 ab	32.2ab	26.3 ab	104.7 a	21.6 c	31.1 cd	38.3 b
	367	47.6 a	26.2 a-c	27.1 ab	100.8 ab	21.0 c	38.3 bcd	36.8 b
	457	38.7 a-d	31.9 ab	25.4 a-c	96.0 abc	25.8 abc	31.6 cd	36.9 b
	Protector	40.7 a-d	28.1 a-c	21.6 a-c	90.5 bcde	24.8 abc	35.6 bcd	39.4 b
CV (%)		6.4	10.6	7.6	3.4	7.0	9.6	7.7
DMSH		9.5	10.3	7.2	11.9	6.7	12.8	14.1

Medias con letras iguales en las columnas son estadísticamente similares (Tukey; $p \leq 0.05$). [†]N-NO₃⁻ = mmol L⁻¹; CV = Coeficiente de variación; DMS = Diferencia mínima significativa honesta. n = 8.

Ozores-Hampton *et al.* (2015) reportan en hojas de tomate concentraciones de N de 3.5 a 5 %, a los 60 ddt, resultados que coinciden con los obtenidos en el presente estudio. Wang y Xing (2016) indican que, con las concentraciones y contenidos de N de la hoja, obtenidos en la actual investigación, con las dosis de 1.2 o 4.8 mM de N-NO₃⁻, permitirán disminuir la cantidad de NO₃⁻

lixiviados, lo anterior debido a que con menores dosis de N se logró obtener concentraciones de N de 3.5 a 5.0 %, consideradas adecuadas para este cultivo a los 55 d. Por otra parte, los intervalos de concentración crítica de N dependen del genotipo, época del año y edad de la planta, por ello Hernández *et al.* (2009) reportan en hojas de tomate concentraciones de N de 3.6 y 3.8 %, resultados que coinciden con los obtenidos en el presente estudio, para los cinco genotipos cultivados con las tres dosis de N-NO₃⁻. Asimismo, los resultados son el efecto de la concentración de N-NO₃⁻ en la SNS y no del potencial osmótico, ya que la diferencia entre las tres soluciones no superó las 0.2 atmósferas, lo cual bastaría para causar diferencias estadísticas significativas (Juárez *et al.*, 2006).

1.6. CONCLUSIONES

El crecimiento de las plantas de tomate depende de la cantidad que se aplica de fertilizante nitrogenado; y repercute directamente en la absorción y funcionamiento de la raíz, tallo y hoja. En consecuencia, las tasas de aplicación de fertilizantes nitrogenados es uno de los factores a considerar en selección de familias nativas de tomate e incorporarlas a programas de mejoramiento genético; tal como la FN 367, que presentó, concentraciones y contenidos de nitrógeno similares o superiores a los de Protector, sin embargo, en cuanto al UEN la FN 457 presentó la mayor producción de materia seca en hoja y tallo por unidad de nitrógeno en el tejido.

1.7. AGRADECIMIENTOS

Benjamín González Vargas agradece a CONACYT por la beca otorgada para realizar los estudios de Doctorado en Ciencias en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

1.8. LITERATURA CITADA

- Abenavoli, M. R., C. Longo, A. Lupini, A. J. Miller, F. Araniti, F. Mercati, M. P. Princi, and F. Sunseri.** 2016. Phenotyping two tomato genotypes with different nitrogen use efficiency. *Plant Physiology and Biochemistry.* 107: 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.04.021>
- Ahmed, N., N. Mahmud, M. Zaman, Z. Ferdous, and S. Halder.** 2017. Effect of different salinity level on tomato (*Lycopersicon esculentum*) production under climate change condition in Bangladesh. *Annual Research & Review in Biology.* 13: 1-9. <https://doi.org/10.9734/ARRB/2017/33613>

- Borisev, M., B. Krstic, D. Gvozdenovic, and J. Gvozdanovic-Varga.** 2012. Photosynthesis and water use efficiency relations to yield of ten pepper varieties (*Capsicum annuum* L.). Bulgarian Journal of Agricultural Science. 18: 589-594.
- Chakwizira, E., J. M. de Ruiter, S. Maley, and E. Teixeira.** 2016. Evaluating the critical nitrogen dilution curve for storage root crops. Field Crops Research. 199: 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.09.012>
- Colla, G., C. M. C. Suárez, M. Cardarelli, and Y. Rouphael.** 2010. Improving nitrogen use efficiency in melon by grafting. HortScience. 45: 559-565.
- Du, Y. D., H. X. Cao, S. Q. Liu, X. B. Gu, and Y. X. Cao.** 2017. Response of yield, quality, water and nitrogen use efficiency of tomato to different levels of water and nitrogen under drip irrigation in Northwestern China. Journal of Integrative Agriculture. 16: 1153-1161. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61371-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61371-0)
- Farneselli, M., P. Benincasa, G. Tosti, E. Simonne, M. Guiducci, and F. Tei.** 2015. High fertigation frequency improves nitrogen uptake and crop performance in processing tomato grown with high nitrogen and water supply. Agricultural Water Management. 154: 52-58. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.002>
- Frías-Moreno, N., A. Nuñez-Barrios, R. Perez-Leal, A. C. Gonzalez-Franco, A. Hernández-Rodríguez, and L. Robles-Hernández.** 2014. Effect of nitrogen deficiency and toxicity in two varieties of tomatoes (*Lycopersicon esculentum* L.). Agricultural Sciences. 05: 1361-1368. <https://doi.org/10.4236/as.2014.514146>
- García-Velázquez, L., and A. Gallardo.** 2017. El ciclo global del nitrógeno. Una visión para el ecólogo terrestre. Ecosistemas. 26: 4-6. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-1.02>
- He, J.** 2016. Root growth, morphological and physiological characteristics of subtropical and temperate vegetable crops grown in the tropics under different root-zone temperature. Plant Growth. 131-148. <https://doi.org/10.5772/64824>
- Hernández, M. I., N. J. Arozarena, and M. Chailloux.** 2009. Rango crítico de nitrógeno y potasio en hojas indicadoras para dos épocas de plantación en el cultivo protegido del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) híbrido HA-3019. Cultivos Tropicales. 30: 79-86.
- Juárez, H. M. J., C. G. A. Baca, N. L. A. Acevez, P. Sánchez G. P., J. L. Tirado, J. Sahagún, and M. T. Colinas.** 2006. Propuesta para la formulación de soluciones nutritivas en estudios de nutrición vegetal. Interciencia. 31: 246-253.

- Kant, S., Y. M. Bi, and S. J. Rothstein.** 2011. Understanding plant response to nitrogen limitation for the improvement of crop nitrogen use efficiency. *Journal of Experimental Botany*. 62: 1499-1509. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq297>
- Khavari-Nejad, R. A., F. Najafi, and C. Tofighi.** 2009. Diverse responses of tomato to N and P deficiency. *International Journal of Agriculture and Biology*. 11: 209-213.
- Kyriacou, M. C., Y. Rouphael, G. Colla, R. Zrenner, and D. Schwarz.** 2017. Vegetable grafting: The implications of a growing agronomic imperative for vegetable fruit quality and nutritive value. *Frontiers in Plant Science*. 8: 1-23. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00741>
- Larbat, R., C. Paris, J. Le Bot, and S. Adamowicz.** 2014. Phenolic characterization and variability in leaves, stems and roots of micro-tom and patio tomatoes, in response to nitrogen limitation. *Plant Science*. 224: 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.04.010>
- Li, Y., B. Ren, L. Ding, Q. Shen, S. Peng, and S. Guo.** 2013. Does chloroplast size influence photosynthetic nitrogen use efficiency? *PLoS ONE*. 8, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062036>
- Martínez-Andújar, C., J. M. Ruiz-Lozano, I. C. Dodd, A. Albacete, and F. Pérez-Alfocea.** 2017. Hormonal and nutritional features in contrasting rootstock-mediated tomato growth under low-phosphorus nutrition. *Frontiers in Plant Science*. 8: 1-13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00533>
- Masclaux-Daubresse, C., F. Daniel-Vedele, J. Dechorgnat, F. Chardon, L. Gaufichon, and A. Suzuki.** 2010. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: Challenges for sustainable and productive agriculture. *Annals of Botany*. 105: 1141-1157. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq028>
- Misu, H., M. Mori, S. Okumura, S. Kanazawa, N. Ikeguchi, and R. Nakai.** 2018. High-quality tomato seedling production system using artificial light. *SEI Technical Review*. 86: 119-124.
- Ozores-Hampton, M., F. Di Gioia, S. Sato, E. Simonne, and K. Morgan.** 2015. Effects of nitrogen rates on nitrogen, phosphorous, and potassium partitioning, accumulation, and use efficiency in seepage-irrigated fresh market tomatoes. *Journal of Horticultural Science*. 50: 1636-1643.
- Ríos-Osorio, O., J. L. Chávez-Servia, y J. C. Carrillo-Rodríguez.** 2014. Producción tradicional y diversidad de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) nativo: Un estudio de caso en Tehuantepec-Juchitán, México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*. 11: 35.

<https://doi.org/10.22231/asyd.v11i1.50>

- Suárez-Hernández, Á. M., O. Grimaldo-Juárez, A. M. García-López, D. González-Mendoza, and M. V. Huitrón-Ramírez.** 2016. Influence of rootstock on postharvest watermelon quality. *Revista Chapingo Serie Horticultura.* 23: 49-58. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2016.06.019>
- Turhan, A., N. Ozmen, M. S. Serbeci, and V. Seniz.** 2011. Effects of grafting on different rootstocks on tomato fruit yield and quality. *Horticultural Science.* 38: 142-149.
- Wang, X., and Y. Xing.** 2016. Effects of irrigation and nitrogen fertilizer input levels on soil NO₃⁻-N content and vertical distribution in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Scientifica.* 1-16. <https://doi.org/10.1155/2016/5710915>
- Warschefsky, E. J., L. L. Klein, M. H. Frank, D. H. Chitwood, J. P. Londo, E. L. B. von Wettberg, and A. J. Miller.** 2016. Rootstocks: Diversity, domestication, and impacts on shoot phenotypes. *Trends in Plant Science.* 21: 418-437. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.11.008>
- Xu, G., X. Fan, and A. J. Miller.** 2012. Plant nitrogen assimilation and use efficiency. *Annual Review of Plant Biology.* 63: 153-182. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105532>
- Yang, J., S. Liao, Y. Li, B. Cao, Y. Sun, G. Zou, and B. Liu.** 2018. Reducing nitrogen pollution while improving tomato production by controlled-release urea application. *Soil Science and Plant Nutrition.* 00: 1-10. <https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1490630>

CAPÍTULO 2. DÉFICIT DE FÓSFORO Y POTASIO EN FAMILIAS NATIVAS DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.): CONCENTRACIÓN, ACUMULACIÓN Y USO EFICIENTE DE P Y K

2.1. RESUMEN

En el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México, 2018, se realizaron dos ensayos independientes uno de fósforo (P) y otro de potasio (K). El objetivo de cada experimento fue evaluar tres dosis de P (0.1, 0.2 y 0.4 mM L⁻¹) y tres de K (0.7, 1.4 y 2.8 mM L⁻¹) en cuatro familias nativas de tomate 36, 300, 367, 457 y el mejor crecimiento, concentración, contenido y uso eficiente de dichos nutrimentos, con respecto a un portainjerto comercial (Protector). El diseño experimental fue completo al azar en arreglo de parcelas divididas. Se cuantificó el área foliar (AF), la materia seca en hoja, tallo, raíz, contenido y uso eficiente de P (UEP) y K (UEK) en dichos órganos de la planta. Las plantas de tomate presentaron la mayor AF en el experimento de P con la dosis de 0.2 mM L⁻¹ (3854 cm²), mientras que, en el experimento de K, las plantas que crecieron con 0.7 mM L⁻¹ produjeron 18 y 36 % más AF, con respecto al que presentaron las plantas con las dosis de 1.4 y 2.8 mM L⁻¹. En ambos estudios, Protector generó la mayor cantidad de materia seca en hoja, tallo y raíz, respuesta independiente a la dosis de P o K que se empleó, sin embargo, los órganos de este material presentaron la menor concentración P y K, respecto a las FN. Las plantas de la FN 457 y Protector, presentaron un contenido total, UEP y UEK diferente en términos estadísticos en cada ensayo.

Palabras clave: concentración, contenido, uso eficiente de fósforo y potasio, familias nativas de tomate.

2.2. ABSTRACT

At the Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México, 2018, two independent tests were carried out, one for phosphorus (P) and the other for potassium (K). The objective of each experiment was to evaluate three doses of P (0.1, 0.2 and 0.4 mM L⁻¹) and three of K (0.7, 1.4 and 2.8 mM L⁻¹) in four native families 36, 300, 367, 457 and the best growth, concentration, content and efficient use of said nutrients, with respect to a commercial rootstock tomato (Protector). The experimental design was in complete randomized whit divided plots. Were quantified the leaf area (LA), the dry matter in leaf, stem, root, content and efficient use of P (EUP) and K (EUK) in the plants organs. Tomato plants had the highest LA in the P experiment with the dose of 0.2 mM L⁻¹ (3854 cm²), while in the K experiment, the plants that grew with 0.7 mM L⁻¹ produced 18 and 36 % more LA, with respect to that presented by the plants with the doses of 1.4 and 2.8 mM L⁻¹. In both studies, Protector generated the highest amount of dry matter in leaf, stem and root, an independent response to the dose of P or K that was used, however, the organs of this material had the lowest concentration of P and K, compared to the NF. The plants of the NF 457 and Protector presented a total content, EUP and EUK different in statistical terms in each trial.

Keywords: concentration, content and phosphorus and potassium use efficiency; native families of tomato.

2.3. INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los cultivos hortícolas más importantes en México. Dada su producción intensiva enfrenta problemas con el uso indistinto de fertilizantes sintéticos y pesticidas, factores que limitan el crecimiento de los cultivos, la producción, la calidad de los frutos y la salud de los seres humanos, por ejemplo; el exceso de nitratos puede provocar metahemoglobinemia o el síndrome del “niño azul”, donde una molécula de hemoglobina atrofia el transporte de oxígeno y provoca la cianosis (Donoso y Cortés, 2018).

Las plantas crean variaciones en respuesta a un factor de estrés, tal como la falta de nutrimentos, por ello es importante identificar materiales que presenten la mejor aptitud de adaptación a ambientes deficientes de fósforo (P) y potasio (K); nutrimentos que son indispensables para la vida vegetal y animal, y que presentan un rol esencial en la fertilidad del suelo y seguridad alimentaria.

El K no se asimila a los compuestos orgánicos, pero influye en la producción de metabolitos primarios y secundarios. El enfoque para comprender la nutrición vegetal con K se centra en la función y regulación de los transportadores a nivel celular; sin embargo, identificar los órganos de mayor demanda y almacenamiento permitirá que este nutrimento se aplique en la mejor etapa de desarrollo de la planta. Al respecto, las plantas de tomate requieren grandes cantidades de este nutrimento, en el período de antesis y maduración del fruto, y al modificar la dosis de suministro de este ion se pueden modificar los atributos organolépticos del fruto (Alemán *et al.*, 2011; El-Nemr *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2011).

En cuanto al P, la roca fosfórica (RP, recurso no renovable) es la principal fuente de extracción de dicho nutrimento. Actualmente, la industria de los fertilizantes reporta que las reservas de P, disminuyeron, mientras que, aumentó el costo de extracción, procesamiento y de envío (Cordell *et al.*, 2009; Scholz *et al.*, 2013). El consumo de K no es la excepción, se incrementó de 4.5 % por año desde 1999 hasta 2005, a 12 % por año en la última década, y a diferencia del P, las reservas de K (silvinita) son para miles de años; sin embargo, para una producción agrícola sustentable, el éxito dependerá tanto del uso eficiente de los nutrimentos esenciales, como de los benéficos (aluminio, cobalto, sodio, selenio, silicio y titanio) (Alemán *et al.*, 2011; Kaur *et al.*, 2016; Lyu *et al.*, 2017). Mew (2016) reporta, un costo de procesamiento de la RF ex mina de \$135 USD por Mg, y se espera que el requerimiento de P para el 2050 sea 2.4 veces mayor, equivalente al uso de 83.7

millones de Mg de P_2O_5 , y consumo total de P para la producción agrícola de 23 millones de Mg en 2050 (Bouwman *et al.*, 2013), pero se considera que las reservas mundiales de RF son de 71 000 millones de Mg, lo que sugiere una vida útil de 370 años (Chowdhury *et al.*, 2017).

La aplicación excesiva de P en el suelo a través de fertilizantes sintéticos, conlleva a su acumulación y constituye un riesgo para la calidad del agua al provocar el proceso de eutrofización (Chen *et al.*, 2008). Los fertilizantes sintéticos representan un importante porcentaje del costo de producción en los sistemas hidropónicos, sin embargo, permiten ahorrar agua y nutrientes, comparado con la producción en suelo (Rouphael *et al.*, 2016; Moreno-Pérez *et al.*, 2015). Asimismo, el sistema hidropónico abierto permite, que las plantas de tomate en etapa vegetativa incrementen la recuperación del N, P, K, Ca y Mg, en promedio a 71, 47, 57, 60 y 60 % respectivamente, en comparación con la producción en suelo (Pineda-Pineda *et al.*, 2011; Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014). Los cultivos mejorados genéticamente, que se producen en el suelo, presentan una eficiencia de recuperación de P de 20 %, y un uso eficiente del P (UEP, índice de conversión de P total en materia útil) que se incrementó de 33 % en 1961, a 40 % en 2013 (Chen y Graedel, 2016). Asimismo, la producción de alimentos aumentó debido al uso de materiales vegetales mejorados genéticamente, de fertilizantes sintéticos y de nuevas técnicas de riego entre otros factores, lo cual permitió superar la demanda de la población (Vance, 2016); sin embargo, la homeostasis de P y K está regulada en toda la planta (Sung *et al.*, 2015). Por lo anterior, el objetivo de los ensayos fue evaluar tres dosis de suministro de P y tres K, en las familias nativas 36, 300, 367, 457 y un material comercial (Protector, testigo) de tomate, en el crecimiento, concentración, contenido y uso eficiente del P y K. La hipótesis, es que al menos una familia nativa de tomate, tendrá un comportamiento similar al testigo en el crecimiento, concentración, contenido y uso eficiente de P y K.

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

En el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México (2240 m de altitud), en el 2018, se realizaron dos ensayos independientes uno de P y otro de K, en invernadero. Se emplearon las familias nativas (FN) de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) colectadas en México, en los estados de Puebla, Guerrero, Estado de México y Veracruz, denominadas FN 36, FN 300, FN 367 y FN 457. El portainjerto comercial, Protector (Harris Moran®), se empleó como testigo, en los dos ensayos.

Las semillas de los diferentes materiales se sembraron en charolas de unicel de 200 cavidades, de 25 mL por alveolo, con turba (peat moss, Premier) como sustrato. Las plántulas se fertilizaron con la solución nutritiva Steiner (SNS) al 50 % los primeros diez días después de la emergencia (dde), y al 100 % hasta los 40 dde, fecha en la cual se trasplantaron en macetas de polietileno negro, con 5 L de arena como sustrato, para facilitar la extracción de la raíz. Las plántulas presentaron los criterios de calidad mencionados por Mitsu *et al.* (2018). Las plántulas se condujeron a un tallo, y se eliminaron brotes laterales y racimos florales, debido a que el objetivo final de un portainjerto, no fue la producción de frutos, sino proveer al injerto resistencia a plagas y enfermedades del suelo, precocidad e incremento de absorción de agua y nutrimentos entre otros factores (Warschefsky *et al.*, 2016). La arena presentó un $\text{pH}_{(1:2)}$ de 6.0, conductividad eléctrica (CE) de 0.44 dS m^{-1} , densidad aparente de 1.49 g cm^{-3} , y partículas de <0.1 , 0.1 , 0.25 y 0.5 mm , en proporciones de 12, 18, 19 y 32 % en el orden dado, equivalentes al 80 % de la muestra, y el resto lo constituían partículas de $1-4.7 \text{ mm}$. El sustrato presentó 56 y 44 % de material sólido y espacio poroso total, este último subdividido en 9.0, 11.3, 7.4 y 16.0 % de capacidad de aireación, agua de fácil disposición (AFD), agua de reserva (AR) y agua de difícil disposición, en el mismo orden. El sustrato presentó un agua total disponible (AFD + AR) de 18.7 %. Las plantas de cada estudio se fertirrigaron con la SNS, que se modificó a diferentes dosis de suministro de P (0.1 , 0.2 y 0.4 mM L^{-1}) y K (0.7 , 1.4 y 2.8 mM L^{-1}), equivalente a aplicar el 10, 20 y 40 % del P y K de la SNS, que presenta una CE de 2.0 dS m^{-1} .

Los iones NO_3^- , H_2PO_4^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , K^+ y Mg^{2+} , se adicionaron con los fertilizantes comerciales: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, KNO_3 , K_2SO_4 , KH_2PO_4 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y ácido sulfúrico (H_2SO_4), para ajustar el pH a 5.5 - 6.0, y como aporte de sulfatos. Los micronutrientes se incorporaron como quelatos de EDTA (mg L^{-1}), en cantidades de: 3.0 de Fe, 1.4 de Mn, 0.3 de Zn, 0.11 de Cu, 0.5 de B (H_3BO_3) y 0.12 de Mo. Las plantas se fertirrigaron con 1.5 L de SNS por maceta por día. Las plantas estuvieron expuestas a una radiación fotosintéticamente activa promedio de $785 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, que se registró entre las 13 y 14 h.

Las plantas se evaluaron 45 días después del trasplante (ddt), fecha en la que se midió el área foliar (AF) con el integrador de área foliar (LI-3100[®]), la materia seca de hoja (MSH), tallo (MST), raíz (MSR), y la concentración de P total y K en dichos órganos. Las muestras de hoja, tallo y raíz se secaron en una estufa (*Felisa*, Jalisco, México) con circulación de aire caliente a $70 \pm 2.0 \text{ }^\circ\text{C}$,

hasta peso constante. El material vegetal se molió (molino, Thomas Wiley Co, Phyladelphia, PA, USA) y tamizó (malla no. 60), para determinar la concentración de P y K en dos muestras compuestas; cada muestra se obtuvo al mezclar el tejido de los órganos similares de dos plantas, con los datos anteriores se calculó el contenido y uso eficiente de P (UEP) y K (UEK), según Martínez-Andújar *et al.* (2017). Para la determinación de P, se efectuó una digestión en ácido nítrico y perclórico en relación 2:1 (v/v). La determinación de P total se realizó en un espectrofotómetro HP 845, (Santa Clara, CA, USA), y el de K en un espectrofotómetro de absorción atómica (Varian, SpectrAA 220, Palo Alto, CA, USA) (Reddy y Veeranki, 2013).

Como control de calidad de las mediciones de P y K, se emplearon tres materiales de referencia (MR): el material de control de calidad (MCC) del laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental del Colegio de Posgraduados (hojas de frijol); un MCC de hojas de tomate (ISP-8) del Programa de Intercomparación de Suelos y Plantas de México que se envió a los laboratorios participantes en 1999, y un material de referencia certificado (MRC) de hojas de manzana (SRM-1515) del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST, por sus siglas en inglés). Para el MCC de hojas de frijol se obtuvo una concentración de 0.23 y 1.58 % de P y K, en el orden dado, valores dentro del intervalo de la media ± 2 s de los gráficos de control de Shewhart (P, 0.18-0.27 % y K, 1.23-1.98 %). El MCC ISP-8 presentó una concentración de P de 0.31 %, y de K de 2.54 %; resultados correctos con base en los datos del Programa de Intercomparación 99.1, con un valor de Z-score menor a 1. En cuanto al MRC del NIST se obtuvo para P y K, 0.14 y 1.49 % respectivamente, valores confiables según el error cuadrático medio crítico, y similares a lo que obtuvieron los participantes del Programa de Intercomparación de México en 1999 (López *et al.*, 2002).

En cada estudio se empleó un diseño experimental completamente al azar, con arreglo de parcelas divididas, con tres tratamientos, donde las dosis de P y K, y los genotipos representaron las parcelas grandes y chicas respectivamente, con ocho repeticiones por genotipo. Se consideró a una planta como una repetición para las variables MSH, MST, MSR y AF. Se hizo un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$), de SAS System 9.4.

2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las plantas de tomate que crecieron en 0.2 mM L^{-1} de P, produjeron mayor AF con 3854 cm^2 , resultados diferentes en términos estadísticos ($p \leq 0.05$), a lo que produjeron las plantas con las dosis de 0.1 y 0.4 mM L^{-1} (Figura 3-A). La FN 457 y Protector generaron un AF similar ($p \leq 0.05$), mientras que, la FN 300 presentó la menor AF al producir 10 y 40 % menos, que los materiales anteriores (Figura 3-C), asimismo, los resultados indican que la FN 36 generó el 38 % del AF que Protector, ambos abastecidos con las dosis de 0.1 y 0.2 mM L^{-1} de P (Figura 3-E).

En el ensayo de K, se observó que, a menor dosis de este ion, las plantas produjeron mayor AF (Figura 3-B), y Protector superó en 50 y 30 % el AF que produjeron las FN 357 y 467 (Figura 3-D), asimismo, se presentó una tendencia de respuesta en el AF, entre la dosis de K y los genotipos, ya que las plantas de tomate disminuyeron el AF cuando se incrementó la dosis de suministro de K (Figura 3-F); es decir, incrementar de 1.4 a 2.8 mM L^{-1} de K, significó una disminución de 18 y 36 % del AF, respecto al que produjeron las plantas con la dosis de 0.7 mM L^{-1} . Martínez-Andújar *et al.* (2016) reportan para plantas de tomate un AF de 800 a 1400 cm^2 a los 48 ddt, valores inferiores a lo que se obtuvo en las plantas del estudio de K, donde la menor y mayor AF se obtuvo con la FN 300 y Protector respectivamente, y superan dichos valores en 49 y 87 %.

Las plantas de tomate que crecieron con 0.7 mM L^{-1} de K, incrementaron el AF; tal vez, por la mayor disposición de magnesio, el cual compite con la absorción de calcio, en consecuencia, la actividad del K se incrementó, y las plantas absorbieron de manera más fácil este ion, lo cual estimuló la división y expansión celular (Ramírez-Soler *et al.*, 2018).

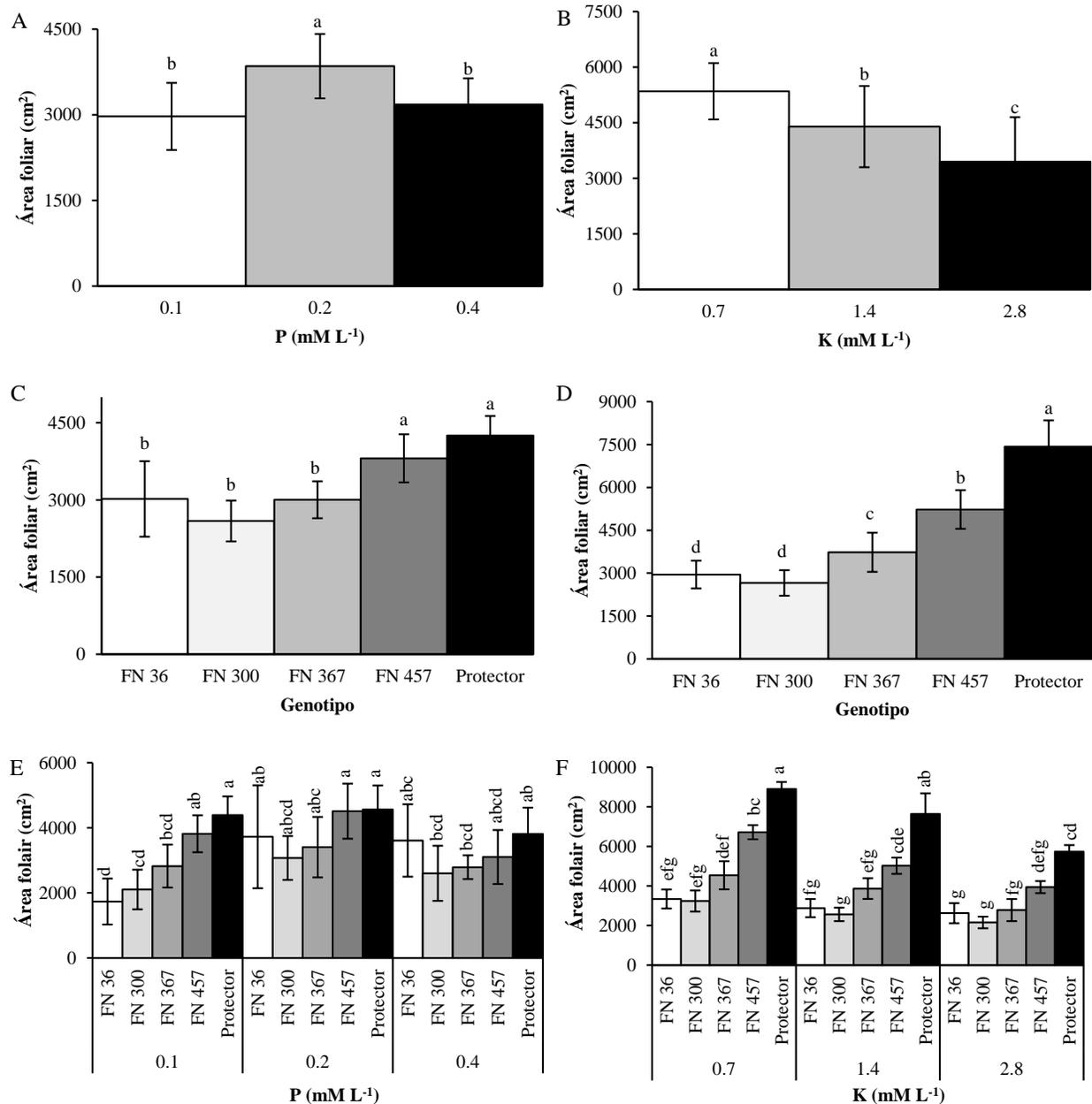


Figura 3. Efecto de la dosis de P (A) y K (B) en familias nativas de tomate (C y D), e interacción dosis×genotipo (E y F) en el área foliar, 45 días después del trasplante. Letras diferentes entre las dosis, genotipo e interacción dosis×genotipo en cada gráfica indican diferencias significativas (Tukey; $p \leq 0.05$). Barras, media \pm desviación estándar. $n = 8$.

La mayor producción de MSH en el estudio de P, se obtuvo al aplicar 0.2 mM L^{-1} con 23 g, mientras que, al suministrar 0.1 mM L^{-1} de P, las plantas produjeron una cantidad de MSH 26 %

menor; asimismo, se observó, que las FN que generaron la menor cantidad de MSH, como la FN 36 (9 g) presentaron la mayor concentración de P (0.67 %) (Figura 4-A). Al respecto, Martínez-Andújar *et al.* (2017) reportan en hojas de tomate concentraciones de P de 0.2 y 0.3 % a los 30 ddt, valores 1.5 menores a lo que se obtuvo en las hojas de tomate con las dosis de 0.1 y 0.2 mM L⁻¹ de P. Díaz-Pérez (2013) reporta en hojas de *Capsicum annum* L., una concentración de P de 0.28 %, valor inferior al que se obtuvo en el estudio de P, al aplicar cualquier dosis de P. Parra *et al.* (2012) reportan en hojas de tomate concentraciones de 0.06 a 0.12 % de P y de 2.5 a 3.6 % de K, lo anterior al aplicar 7 y 9 mM L⁻¹ de K respectivamente; concentraciones de P, 5 veces inferiores a lo que se obtuvo en las hojas en el ensayo de P, sin embargo, en el experimento de K la FN 36 y 300 se ubicaron en el intervalo de concentración que se mencionó con anterioridad (Figura 4, C y D), asimismo, en el ensayo de K, la FN 300 presentó en promedio de los tres tratamientos 54 % más concentración de K, respecto a los otros materiales, y al igual que la FN 36 presentó 56 % menos MS, respecto a Protector (Figura 4-D).

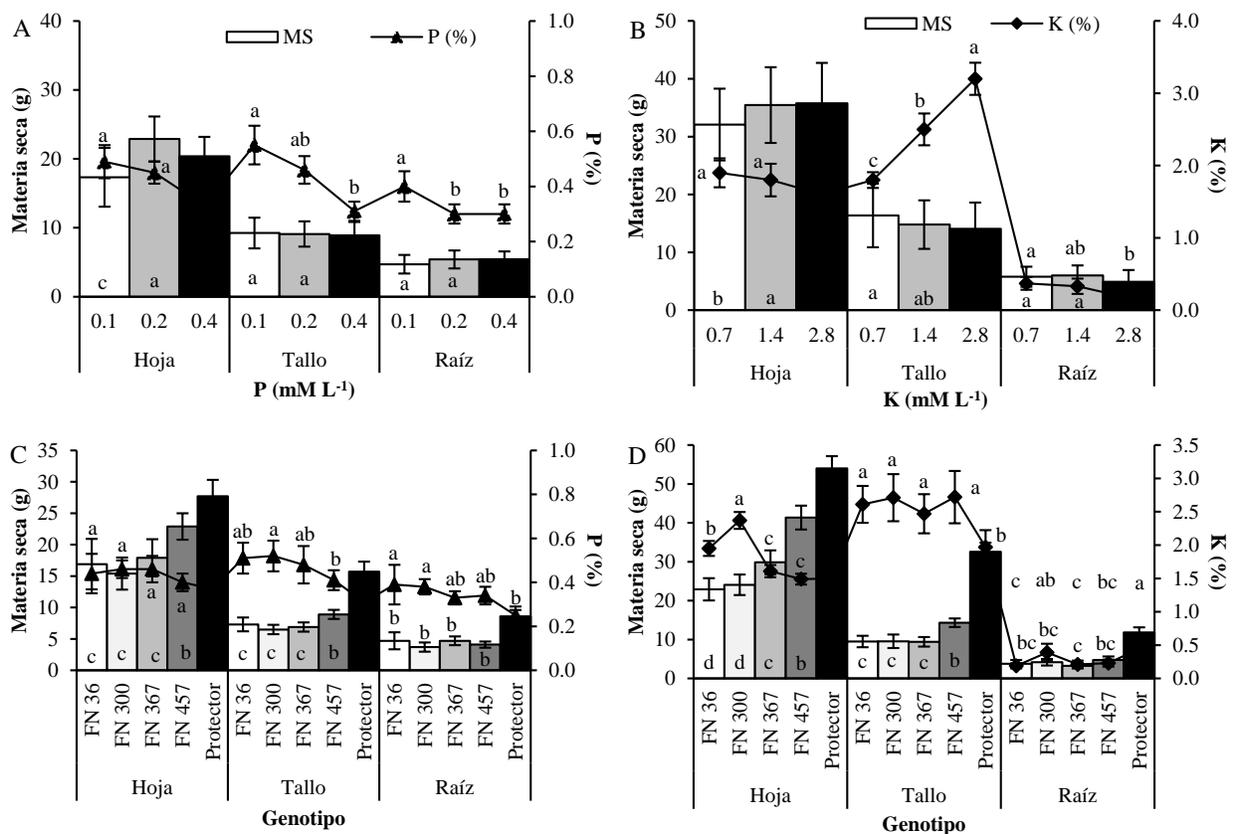


Figura 4. Efecto de la dosis de P y K en la materia seca y concentración de P y K en hoja, tallo y raíz (A y B), y en la hoja, tallo y raíz de familias nativas de tomate (C y D), 45

días después del trasplante. Letras diferentes entre las dosis de fósforo y potasio para los órganos y entre los genotipos de cada gráfica indican diferencias significativas (Tukey; $p \leq 0.05$). Barras, media \pm desviación estándar, $n = 8$. Línea, media \pm desviación estándar, $n = 2$.

Las FN acumularon más de 2 % de K en la hoja, lo cual las hace mejores que Protector. El aumento en el crecimiento vegetativo, la tasa fotosintética y el contenido de clorofila se ven favorecidos con el suministro de K^+ , el cual activa la piruvato quinasa en las hojas de tomate, que cataliza la glucólisis y gluconeogénesis (El-Nemr *et al.*, 2012), dicho resultado se observó en la MSH, y no en la MST y MSR. Schwarz *et al.* (2013) no reportan diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en la acumulación de MS aérea (108 - 140 g) y de raíz (6 - 10 g) en plantas de tomate que se fertilizaron con 4 y 8 $mM L^{-1}$ de K a los 128 ddt, resultados que coinciden parcialmente con lo obtenido en el estudio de K, donde la FN 300, 457 y Protector acumularon 2.8 veces más MSR en 45 d (Figura 4-D).

En cuanto a la MS y concentración de P en el tallo se observa en la Figura 5-C, que, a pesar de incrementar la dosis de P, la concentración se mantuvo constante entre genotipos y dosis evaluadas; asimismo, las FN presentaron en promedio de los tres tratamientos 37 % más P que Protector. La concentración de K en el tallo aumentó conforme se incrementó la dosis de este ion en la SNS, y sobresalieron las FN 300 y 457 con la dosis de 2.8 $mM L^{-1}$, que superaron en 28 % la concentración que presentó Protector en el tallo (Figura 3-D). Parra *et al.* (2012) reportan en tallos de tomate concentraciones de 0.24 % para P y 2.3 % para K, al aplicar 7 y 9 $mM L^{-1}$ de K, resultados de P similares a lo que se obtuvo en el presente estudio en los tallos, ya que las FN que crecieron con 0.1 y 0.2 $mM L^{-1}$ de P, presentaron una concentración 50 % mayor que el que mostraron los materiales que menciona dicho autor.

En los tratamientos de 1.4 y 2.8 $mM L^{-1}$ de K, los tallos de las FN acumularon 35 y 50 % más K, que el tallo de Protector de los mismos tratamientos, y sugiere que, en condiciones de deficiencia de K, las FN son más eficientes en la absorción y distribución de este nutriente, que el material comercial, además, el tallo de las plantas de tomate juega un rol como almacenador y distribuidor de este ion (Figura 4-B y Figura 5-D).

En la Figura 5, E y F se presenta la acumulación de MS y la concentración de P y K para la raíz, y se puede observar que, Protector generó la mayor cantidad de MSR que las FN, mientras que, en el experimento de P, con la dosis de 0.4 mM L^{-1} , la FN 36 presentó una cantidad similar ($p \leq 0.05$) de MSR que el testigo, sin embargo, las FN 36, 300 y 457 que se abastecieron con 0.1 mM L^{-1} de P, presentaron en la raíz una concentración de P, 46, 25 y 17 % mayor que el que exhibió la raíz de Protector del mismo tratamiento, y la FN 300 que se fertilizó con 0.2 mM L^{-1} de P, presentó en la raíz una concentración de P, 46 % mayor que el de la raíz de Protector de su respectivo tratamiento, además, las FN y Protector presentaron en la raíz, una concentración de P similar en términos estadísticos ($p \leq 0.05$) con el suministro 0.4 mM L^{-1} de P.

Las FN 300, 367 y Protector presentaron una concentración de K similar ($p \leq 0.05$) en la raíz con valores de 0.69, 0.32 y 0.39 % respectivamente, lo anterior al aplicar 0.7 mM L^{-1} de K; asimismo, no se obtuvieron diferencias significativas en la concentración K en la raíz al aplicar 2.8 mM L^{-1} de K, entre las FN y Protector, con un valor promedio de 0.17 % (Figura 5-F), lo anterior coincide con lo reportado por Martínez-Andújar *et al.* (2016) quienes indican que para prevenir una reducción de MS se necesitan 2 mM L^{-1} de K en la solución nutritiva. Al respecto Chiou y Lin (2011) mencionan que el identificar genotipos con mayor capacidad de adquisición y uso de P y K, sin sacrificar el rendimiento biológico, permitirán comprender como las plantas responden ante una variación externa de estos nutrientes, dicho lo anterior, las FN presentaron una capacidad de absorción de P y K similar que el material comercial.

Oosterhuis *et al.* (2013) reportan que el incremento en la demanda de nutrientes en cultivos modernos, se debe principalmente a que estos llegan a su madurez fisiológica más temprano que los materiales no estables genéticamente (como las FN), en consecuencia, necesitan más P y K, e indican que es lógico que los cultivos con madurez temprana no acumulen la cantidad suficiente de nutrientes en la raíz o tallo, y por efecto necesitan su incorporación permanente y constante. Al respecto, el material comercial que se empleó en estos estudios respalda dicha teoría, debido a que lo que adquirió de P o K, se transformó rápidamente en hidratos de carbono, lo cual explica la mayor producción de MSH, MST y MSR. Zörb *et al.* (2014) mencionan que, la concentración de K varía mucho, y que depende del sitio, año, cultivo y tipo de fertilizante, sin embargo, indican que la concentración adecuada para un óptimo crecimiento de la planta puede ser de 0.4 a 4.3 %, o de

0.5 a 2 % en hoja, ante tal escenario se podría considerar que las FN se encuentran en el intervalo establecido como óptimo, y que la FN 457 y Protector produjeron cantidades similares de MS.

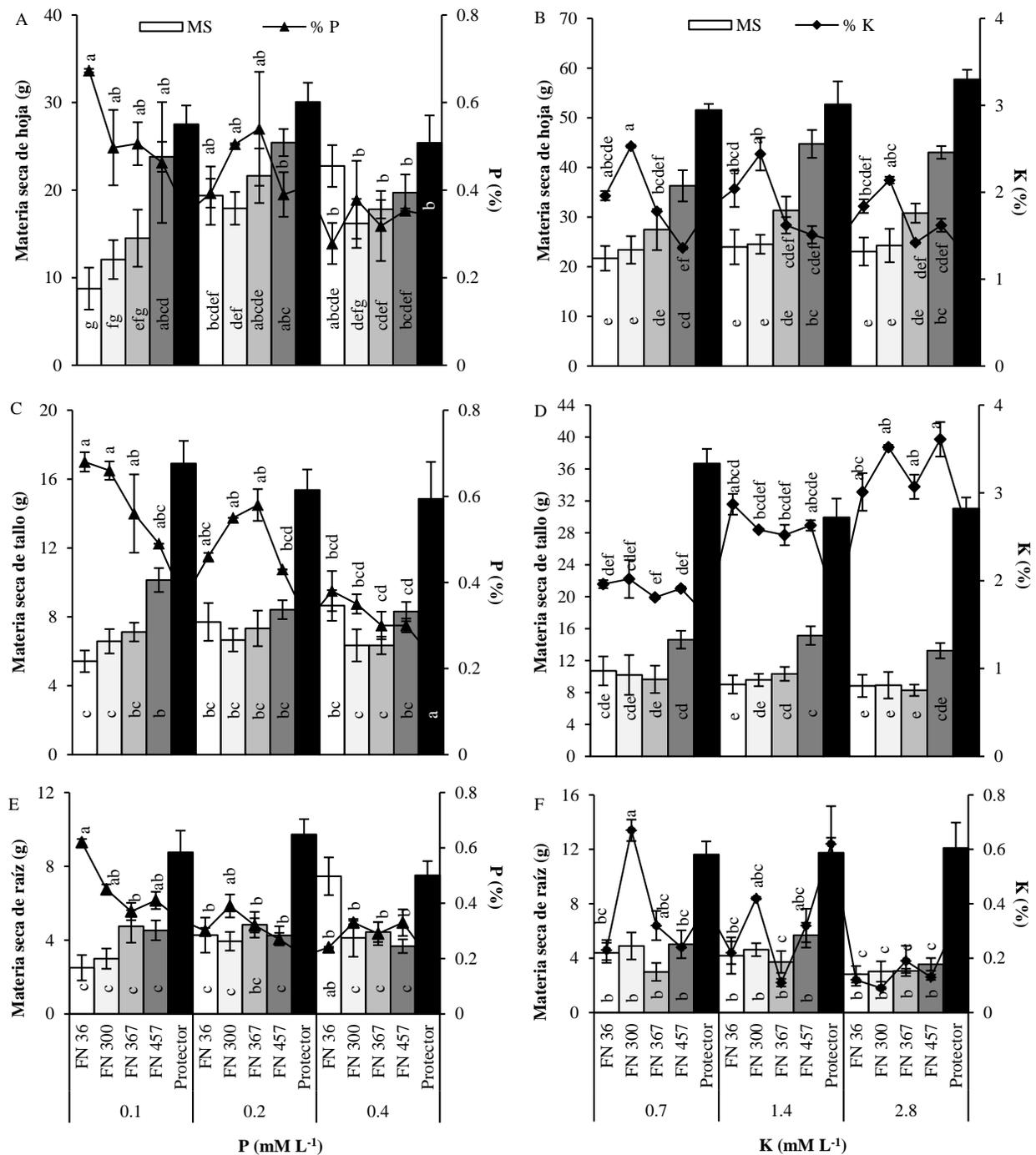


Figura 5. Efecto de la dosis de P y K en la interacción dosis×genotipo en la materia seca (MS) y concentración de P y K en hoja (A y B), tallo (C y D) y raíz (E y F) en familias nativas de tomate expuestas a diferentes dosis de P (A, C y E) y K (B, D y F), 45 días después

del trasplante. Letras diferentes en la interacción dosis×genotipo en cada gráfica indican diferencias significativas (Tukey; $p \leq 0.05$). Barras, media \pm desviación estándar, $n = 8$. Línea, media \pm desviación estándar, $n = 2$.

Las plantas presentaron un contenido de P y K similar ($p \leq 0.05$) en la hoja, raíz y total entre las dosis de P y K que se evaluaron, sin embargo, en el tallo presentaron contenidos diferentes en términos estadísticos. Al respecto, las plantas del tratamiento con 0.4 mM L^{-1} de P en la SNS, presentaron en el tallo una acumulación de P, 45 y 37 % menor, que el que exhibieron las plantas en el tallo que crecieron con 0.1 y 0.2 mM L^{-1} de P. Por otra parte, los tallos de las plantas que se abastecieron con 2.8 mM L^{-1} de K, acumularon 30 % más K, que los tallos de las plantas de los otros tratamientos (Cuadro 8). Chiou y Lin (2011) mencionan que las plantas desarrollan diversos mecanismos para almacenar y movilizar tanto el P como el K interno, y mejoran su adquisición para asegurar su supervivencia ante una deficiencia, lo anterior sugiere que el tallo juega un rol fundamental en la redistribución de estos dos nutrientes.

Las hojas presentaron similar UEP y UEK, independientemente de la dosis que se utilizó en cada estudio (Cuadro 8). Los tallos mostraron en promedio un UEP 37 % mayor al aplicar 0.4 mM L^{-1} de P, que el que presentaron los tallos de los otros tratamientos, y aconteció algo similar con el UEP en la raíz, ya que al suministrar 0.2 o 0.4 mM L^{-1} , se produjo 32 y 37 % más MS por mg de P en el tejido, que al aplicar 0.1 mM L^{-1} . Con relación a la dosis de 0.7 mM L^{-1} de K, las plantas produjeron 42 y 24 % más MS en los tallos, que con las dosis 1.4 y 2.8 mM L^{-1} , y los resultados indican que con 2.8 mM L^{-1} de K, las plantas producen más MS en la raíz, que al proporcionar 0.7 mM L^{-1} . Fan *et al.* (2011) reportan para plantas de tomate que se fertilizaron con 10 y 30 mM L^{-1} de K cantidades similares de MS, a lo que se obtuvo en el presente estudio en hoja y raíz, y mencionan que, un incremento en la dosis de este ion, no produce más MS, sino que este elemento se acumula en hojas y raíces, y los resultados del presente estudio sugieren que también en tallo.

El suministro constante de P y K es crítico para el crecimiento y desarrollo de las plantas, sin embargo, en suelo, la producción agrícola es inestable, ya que depende de diversos factores como: disposición de agua, pH, CE, materia orgánica y microorganismos, por lo anterior las plantas crean sistemas que les permiten obtener de manera continua los nutrientes, y los distribuyen en función de la demanda, sin afectar el contenido total y la producción de MS (Shahzad *et al.*, 2018), lo anterior respalda los resultados que se obtuvieron en los estudios de P y K (Cuadro 9).

Cuadro 8. Efecto de la dosis de P y K en el contenido y uso eficiente del P (UEP) y K (UEK) en familias nativas de tomate, 45 días después del trasplante.

Dosis	Contenido (mg órgano ⁻¹)				Uso eficiente (mg de MS mg ⁻¹ de P o K)		
	Hoja	Tallo	Raíz	Total	Hoja	Tallo	Raíz
Fósforo							
0.1	77.8 a	45.9 a	18.3 a	142.1 a	213.2 a	194.3 b	240.1 b
0.2	101.5 a	39.9 ab	13.9 a	155.3 a	229.5 a	225.2 b	351.5 a
0.4	70.0 a	25.4 b	14.3 a	109.7 a	311.3 a	334.9 a	377.1 a
CV (%)	25.7	15.7	25.5	17.5	14.9	10.8	18.7
DMSH	42.8	17.4	6.0	48.4	159.1	102.9	77.2
Potasio							
0.7	595.9 a	286.7 b	21.7 a	904.5 a	55.0 a	54.4 a	323.2 b
1.4	601.3 a	331.3 b	24.4 a	956.9 a	57.9 a	42.1 b	429.7 ab
2.8	563.3 a	429.1 a	10.5 a	1002.9 a	62.5 a	32.2 c	737.9 a
CV (%)	13.7	16.3	44.2	7.9	7.9	9.5	31.5
DMSH	73	51.4	21.8	113.8	11.0	4.6	369.3

Medias con letras iguales en las columnas para cada nutrimento son estadísticamente similares (Tukey; $p \leq 0.05$). †P y K = mmol L⁻¹; CV = Coeficiente de variación; DMS = Diferencia mínima significativa honesta. n = 8.

Fan *et al.* (2011) reportan contenidos de K en hoja y raíz de 2725 y 966 mg g⁻¹ de MS, e indican que las hojas acumulan 2.8 veces más que la raíz, esto después de 125 d de evaluación en portainjertos de tomate denominados ZS-5 y Edkawi, pero los resultados K del presente ensayo, demuestran que las FN son más eficientes que los portainjertos antes mencionados, ya que al emplear las dosis de 0.7, 1.4 y 2.8 mM L⁻¹ de K, estas acumularon 27, 25 y 50 veces más este ion en las hojas que en la raíz, lo cual las hace más eficientes en la absorción y translocación de dicho nutrimento.

Huang *et al.* (2013) al evaluar 0.6 y 6 mM L⁻¹ de K, en el cultivo de sandía (*Citrullus lanatus* L.) por 20 d, presentaron en la parte aérea un contenido de 91 y 139 mg, y un contenido en la raíz de 13 y 23 mg, y mencionan que con 0.6 mM L⁻¹ las plantas produjeron 15 % más MS aérea y

radical, que con 6 mM L^{-1} , dichos resultados son similares a lo que se obtuvo en el estudio de K, para la producción de MS en hoja y tallo para las dosis de 0.7 y 2.8 mM L^{-1} . Las plantas presentaron un contenido similar ($p \leq 0.05$) de P en la hoja (64 a 100 mg), tallo (34 a 44 mg) y raíz (13 a 20 mg), entre los genotipos, sin embargo, se obtuvieron diferencias en el contenido total de P, donde la FN 36 presentó 30 % menos P, que los otros materiales. Por otra parte, las plantas mostraron una cantidad similar de MSH en términos estadísticos entre los genotipos. Asimismo, las plantas de la FN 367 y Protector del experimento de P presentaron una capacidad similar ($p \leq 0.05$) para producir MSR (Cuadro 9).

Las plantas presentan adaptaciones morfológicas, fisiológicas y bioquímicas en la raíz, que les permiten adquirir el P del suelo, lo cual se puede observar con el aumento del peso seco de la raíz, con producción de aerénquima, con mayor producción de pelos radiculares y con la asociación con hongos micorrícicos (Gao *et al.*, 2010), al respecto, los resultados de P indican que a pesar de obtener diferencias estadísticas entre las diferentes dosis de P en la distribución de este nutrimento en hoja, tallo y raíz (Cuadro 8), solo se presentaron diferencias en términos estadísticos el contenido total de P entre Protector y FN 36, lo que sugiere que las plantas almacenan y distribuyen parte de este nutrimento a los órganos de mayor demanda (Cuadro 9). Sung *et al.* (2015) mencionan que, las plantas deficientes en P mejoran su uso, a través de la movilización, desde diferentes compartimentos subcelulares, tal es el caso de las plantas de las FN que prefieren producir más MS en la hoja, que en la raíz. Protector presentó un contenido de K en la hoja, tallo, raíz y total de superior al que acumularon las FN, pero la FN 367, 457 y Protector presentaron un similar UEK de la hoja, sin embargo, Protector, presentó en el tallo y raíz un UEK 25 y 44 % mayor y menor que el de las FN respectivamente (Cuadro 9).

Cuadro 9. Contenido y uso eficiente de fósforo y potasio (UEP y UEK) en familias nativas de tomate, 45 días después del trasplante.

Familia nativa	Contenido (mg órgano ⁻¹)				Uso eficiente (mg MS mg ⁻¹ P o K)		
	Hoja	Tallo	Raíz	Total	Hoja	Tallo	Raíz
Fósforo							
FN 36	64.3 a	36.0 a	13.7 a	114.0 b	255.7 a	210.9 bc	302.1 b
FN 300	78.7 a	34.5 a	14.5 a	127.6 ab	224.7 a	206.7 c	265.5 b
FN 367	77.7 a	35.2 a	13.9 a	126.7 ab	237.8 a	237.0 bc	316.9 ab
FN 457	94.6 a	35.3 a	14.8 a	144.7 ab	255.8 a	257.8 b	308.8 b
Protector	100.2 a	44.5 a	20.6 a	165.4 a	282.6 a	345.0 a	421.1 a
CV (%)	25.7	15.7	25.5	17.5	14.9	10.8	18.7
DMSH	39.2	10.7	7.3	43.8	69.1	50.3	110.9
Potasio							
FN 36	464.5 b	255.5 c	7.1 bc	727.0 c	51.8 b	39.8 b	611.0 a
FN 300	571.7 b	235.4 c	20.8 b	827.9 c	42.6 c	39.3 b	490.0 ab
FN 367	481.6 b	228.2 c	5.3 c	715.2 c	62.8 a	42.6 b	624.8 a
FN 457	610.0 b	384.8 b	11.3 bc	1006.1 b	67.4 a	39.4 b	512.2 ab
Protector	806.6 a	641.4 a	49.9 a	1497.7 a	68.0 a	53.4 a	246.7 b
CV (%)	13.7	16.3	44.2	7.9	7.9	9.5	31.5
DMSH	147.9	105.1	15.3	139.7	8.5	7.5	288

Medias con letras iguales en las columnas para cada nutriente son estadísticamente similares (Tukey; $p \leq 0.05$). †CV = Coeficiente de variación; DMS = Diferencia mínima significativa honesta. n = 8.

Alemán *et al.* (2011) reportan que el aumento de los niveles de K en la SNS favorece la translocación de fotoasimilados y compuestos nitrogenados a los órganos de mayor demanda a través del floema, y que una deficiencia de K disminuye la fijación de CO₂, debido a la acumulación de sacarosa en las hojas, y por consecuencia se reduce la MS, al respecto, estos argumentos coinciden con lo obtenido en el presente estudio, ya que las plantas generaron diferente cantidad de MSH entre las dosis de 0.7 y 2.8 mM L⁻¹ de K, con 32 y 35 g, las cuales fijaron 10.9 y 11.9

$\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ respectivamente, valores similares en términos estadísticos (valores no mostrados), por otra parte las FN presentaron un contenido de K en las hojas, 4 veces mayor que lo reportado por Martínez-Andújar *et al.* (2016) (Cuadro 9). Pineda-Pineda *et al.* (2015) reportan en plantas de tomate un contenido de P y K de 123 y 748 mg, respectivamente, después de 40 d, dichos valores son 15 y 26 % menores a lo que acumularon las plantas de las dosis con 0.1 y 0.2 mM L^{-1} de P, mientras que, las plantas en el estudio de K, al proporcionar 0.7, 1.4 o 2.8 mM L^{-1} superaron dichos contenidos en 30, 27 y 30 %; y la FN 457 acumuló 15 y 25 % más P y K, que lo indicado anteriormente.

Las plantas mostraron un contenido de P similar en la hoja y raíz entre los tratamientos y genotipos, con valores de 43-112 y 11-27 $\text{mg P } \text{órgano}^{-1}$, mientras que, Protector del tratamiento de 0.1 y 0.2 mM L^{-1} de P, acumuló en el tallo, en promedio 44 % más P que su similar del tratamiento con 0.4 mM L^{-1} de P. Además, el contenido total de P fue similar estadísticamente entre tratamientos y genotipos, excepto para los materiales Protector y FN 367 que se fertilizaron con 0.1 y 0.4 mM L^{-1} de P. Los genotipos que presentaron el mejor UEP en hojas son varios, pero sobresalió en cada tratamiento la FN 457 y Protector, mientras que, en tallo, la FN 367, 457 y Protector del tratamiento con 0.4 mM L^{-1} de P, produjeron el mayor UEP que los otros genotipos de los otros tratamientos. Al igual que en la hoja, la FN 36 y 300 del tratamiento con 0.1 mM L^{-1} de P presentaron similar UEP en raíz (Cuadro 10).

Cuadro 10. Efecto de la dosis de P en el contenido y uso eficiente de fósforo (UEP) en familias nativas de tomate, 45 días después del trasplante.

P [†]	Familia nativa	Contenido (mg P órgano ⁻¹)				UEP (mg MS mg ⁻¹ P)		
		Hoja	Tallo	Raíz	Total	Hoja	Tallo	Raíz
0.1	36	43.9 a	36.8 abcd	13.5 a	94.3 ab	148.6 c	147.8 e	160.9 c
	300	65.9 a	45.4 ab	15.0 a	126.4 ab	204.3 bc	152.0 e	224.1 bc
	367	66.0 a	44.0 abc	15.3 a	125.3 ab	198.3 bc	189.9 de	277.1 abc
	457	110.9 a	45.8 ab	20.4 a	177.2 ab	226.0 abc	202.2 de	244.3 abc
	Protector	102.1 a	57.4 a	27.4 a	186.9 a	288.8 abc	279.4 bcd	294.0 abc
0.2	36	86.4 a	35.3 abcd	11.6 a	133.4 ab	254.8 abc	216.9 cde	333.1 abc
	300	94.8 a	36.7 abcd	12.9 a	144.4 ab	197.9 bc	182.9 de	265.8 abc
	367	112.5 a	44.4 abc	13.9 a	170.9 ab	190.7 bc	173.9 de	313.7 abc
	457	101.2 a	36.1 abc	11.7 a	149.1 ab	258.4 abc	233.9 bcde	369.7 abc
	Protector	112.4 a	46.9 ab	19.3 a	178.6 ab	245.5 abc	318.1 bc	475.0 a
0.4	36	62.4 a	35.8 abcd	16.0 a	114.3 ab	363.8 a	267.9 bcd	412.4 ab
	300	75.3 a	21.2 cd	15.6 a	112.1 ab	271.8 abc	285.1 bcd	306.4 abc
	367	54.5 a	17.0 d	12.4 a	83.9 b	324.3 ab	347.0 ab	359.8 abc
	457	71.7 a	23.8 bcd	12.1 a	107.7 ab	282.9 abc	337.1 ab	312.3 abc
	Protector	86.0 a	29.2 bcd	15.2 a	130.5 ab	313.4 ab	437.2 a	494.3 a
CV (%)		25.7	15.7	25.5	17.5	14.9	10.8	18.7
DMSH		70.6	12.7	16.6	98.4	107.6	57.6	112.2

Medias con letras iguales en las columnas son estadísticamente similares (Tukey; $p \leq 0.05$). [†]P = mmol L⁻¹; CV = Coeficiente de variación; DMS = Diferencia mínima significativa honesta. n = 8.

Las FN 300, 36 y 457, y 457 evaluadas con 0.7, 1.4 y 2.8 mM L⁻¹ de K, presentaron similar contenido de K en hoja, que Protector; sin embargo, la FN 457 y Protector exhibieron el mayor UEK en hoja. El mayor contenido de K en tallo y raíz se obtuvo en Protector al suministrar cualquier dosis, asimismo, fue el material que acumuló la mayor cantidad de K en la planta, con un valor promedio de los tres tratamientos de 1507 mg, seguido de la FN 457 con 1005 mg. Los materiales con mayor UEK en tallo y raíz fueron las FN evaluadas con 0.7 y 2.8 mM L⁻¹ de K, respectivamente, lo que sugiere que, a mayor dosis de K, se incrementa la MSR, mientras que, en tallo será lo contrario; y, las FN generaran más MS cuando se expongan a dosis bajas de K (Cuadro 11).

Cuadro 11. Efecto de la dosis de K en el contenido y uso eficiente de potasio (UEK) en familias nativas de tomate, 45 días después del trasplante.

K [†]	Familia nativa	Contenido (mg K órgano ⁻¹)				UEK (mg MS mg ⁻¹ K)		
		Hoja	Tallo	Raíz	Total	Hoja	Tallo	Raíz
0.7	36	417.4 cd	201.4 e	11.1 bcd	630.0 d	50.9 cdef	50.9 abcd	457.5 abcd
	300	630.4 abcd	205.9 e	41.2 ab	877.6 cde	39.5 f	50.7 abcd	150.7 d
	367	514.2 bcd	186.8 e	6.8 bcd	707.9 d	56.1 bcdef	55.2 ab	332.1 bcd
	457	487.9 bcd	285.4 cde	10.3 bcd	783.6 de	73.2 ab	52.4 abc	416.1 bcd
	Protector	929.9 a	554.0 b	39.2 bc	1523.2 a	55.1 bcdef	62.7 a	259.2 bcd
1.4	36	601.9 abcd	265.3 de	5.9 cd	873.1 cde	49.9 def	34.9 de	488.5 abcd
	300	535.6 bcd	237.1 de	18.5 bcd	791.1 de	41.4 f	38.7 bcde	240.5 cd
	367	469.9 bcd	252.1 de	3.5 d	725.4 d	61.9 abcdef	39.8 bcde	905.0 ab
	457	644.9 abcd	398.1 bcde	19.2 bcd	1062.3 bcd	66.9 abcde	38.0 cde	336.2 bcd
	Protector	753.9 ab	504.1 bc	74.7 a	1332.7 ab	69.6 abc	59.0 a	178.3 d
2.8	36	374.1 d	299.7 cde	4.1 d	677.9 d	54.4 bcdef	33.6 e	887.0 abc
	300	548.9 bcd	263.2 de	2.5 d	814.7 de	46.8 ef	28.4 e	1078.8 a
	367	460.7 bcd	245.8 de	5.6 cd	712.1 d	70.4 ab	32.7 e	637.1 abcd
	457	697.0 abcd	470.9 bcd	4.4 d	1172.3 bc	61.9 abcde	27.8 e	784.0 abcd
	Protector	735.9 abc	865.9 a	35.8 bcd	1637.6 a	79.3 a	38.3 bcde	302.5 bcd
CV (%)		13.7	16.3	44.2	7.9	7.9	9.5	31.5
DMSH		139.8	311.9	34.5	304.6	7.6	25.6	756.8

Medias con letras iguales en las columnas son estadísticamente similares (Tukey; $p \leq 0.05$). [†]K = mmol L⁻¹; CV = Coeficiente de variación; DMS = Diferencia mínima significativa honesta. n = 8.

2.6. CONCLUSIONES

El crecimiento de las plantas de tomate depende de la cantidad que se suministra de fertilizante fosfatado y potásico, y se observará en la producción de materia seca y función de cada órgano. En consecuencia, las dosis de fertilizantes proporcionan información para seleccionar familias nativas de tomate, con la mejor aptitud de crecimiento. La FN-457 presentó un contenido total de P y K similar a Protector, por lo que dicha FN se puede considerar para su uso como portainjerto, además, se puede incorporar a programas de mejoramiento genético.

2.7. AGRADECIMIENTOS

Benjamín González Vargas agradece a CONACYT por la beca otorgada para realizar los estudios de Doctorado en Ciencias en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

2.8. LITERATURA CITADA

- Alemán, F., M. Nieves-Cordones, V. Martínez, and F. Rubio.** 2011. Root K⁺ acquisition in plants: The *Arabidopsis thaliana* model. *Plant and Cell Physiology*, 52: 1603–1612. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcr096>
- Bouwman, L., K. K. Goldewijk, K. W. Van Der Hoek, A. H. W. Beusen, D. P. Van Vuuren, J. Willems, M. C. Rufino, and E. Stehfest.** 2013. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900-2050 period. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 110: 20882-20887. <https://doi.org/10.1073/pnas.1012878108>
- Chakwizira, E., J. M. Ruiter, S. Maley, and E. Teixeira.** 2016. Evaluating the critical nitrogen dilution curve for storage root crops. *Field Crops Research*. 199: 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.09.012>
- Chen, M., and T. E. Graedel.** 2016. A half-century of global phosphorus flows, stocks, production, consumption, recycling, and environmental impacts. *Global Environmental Change*. 36: 139-152. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.12.005>
- Chen, M., J. Chen, and F. Sun.** 2008. Agricultural phosphorus flow and its environmental impacts in China. *Science of the Total Environment*. 405: 140-152. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.031>
- Chiou, T. J., and S. I. Lin.** 2011. Signaling network in sensing phosphate availability in plants.

Annual Review of Plant Biology. 62: 185-206. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103849>

- Chowdhury, R. B., G. A. Moore, A. J. Weatherley, and M. Arora.** 2017. Key sustainability challenges for the global phosphorus resource, their implications for global food security, and options for mitigation. *Journal of Cleaner Production.* 140: 945-963. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.012>
- Cordell, D., J. O. Drangert, and S. White.** 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change.* 19: 292-305. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>
- Díaz-Pérez, J. C.** 2013. Bell pepper (*Capsicum annum* L.) crop as affected by shade level: Microenvironment, plant growth, leaf gas exchange, and leaf mineral nutrient concentration. *HortScience.* 48: 175-182.
- Donoso, M. R., and A. S. Cortés.** 2018. Exposición a nitratos en agua y su relación con disfunción de la glándula tiroides: revisión sistemática ¿Existen riesgos para la salud de la población? *Revista Médica de Chile.* 146: 223-231. <https://doi.org/10.4067/s0034-98872018000200223>
- El-Nemr, M. A., A. M. M. H. El-Baky, S. R. Salman, and W. A. El-Tohamy.** 2012. Effect of different potassium levels on the growth, yield and quality of tomato grown in sand-ponic culture. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences.* 6: 779-784. <https://doi.org/10.14597/infraeco.2018.2.1.016>
- Fan, M., Z. Bie, A. Krumbein, and D. Schwarz.** 2011. Salinity stress in tomatoes can be alleviated by grafting and potassium depending on the rootstock and K-concentration employed. *Scientia Horticulturae.* 130: 615-623. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.08.018>
- Gao, N., Y. Su, J. Min, W. Shen, and W. Shi.** 2010. Transgenic tomato overexpressing ath-miR399d has enhanced phosphorus accumulation through increased acid phosphatase and proton secretion as well as phosphate transporters. *Plant and Soil.* 334: 123-136. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0219-3>
- Huang, Y., J. Li, B. Hua, Z. Liu, M. Fan, and Z. Bie.** 2013. Grafting onto different rootstocks as a means to improve watermelon tolerance to low potassium stress. *Scientia Horticulturae.* 149: 80-85. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.02.009>
- Kaur, S., N. Kaur, K. H. M. Siddique, and H. Nayyar.** 2016. Beneficial elements for agricultural

crops and their functional relevance in defence against stresses. *Archives of Agronomy and Soil Science*. 62: 905-920. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1101070>

López, R. R. M., J. D. Etchevers B., H. Vaquera H., and C. Hidalgo M. 2002. Inter-laboratory comparison of plant analysis accuracy in Mexico. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 33: 2729-2737. <https://doi.org/10.1081/CSS-120014476>

Lyu, S., X. Wei, J. Chen, C. Wang, X. Wang, and D. Pan. 2017. Titanium as a beneficial element for crop production. *Frontiers in Plant Science*. 8: 1-19. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00597>

Martínez-Andújar, C., A. Albacete, A. Martínez-Pérez, J. M. Pérez-Pérez, M. J. Asins, and F. Pérez-Alfocea. 2016. Root-to-shoot hormonal communication in contrasting rootstocks suggests an important role for the ethylene precursor aminocyclopropane-1-carboxylic acid in mediating plant growth under low-potassium nutrition in tomato. *Frontiers in Plant Science*. 7: 1-16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01782>

Martínez-Andújar, C., J. M. Ruiz-Lozano, I. C. Dodd, A. Albacete, and F. Pérez-Alfocea. 2017. Hormonal and nutritional features in contrasting rootstock-mediated tomato growth under low-phosphorus nutrition. *Frontiers in Plant Science*. 8: 1-13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00533>

Mew, M. C. 2016. Phosphate rock costs, prices and resources interaction. *Science of the Total Environment*. 542: 1008-1012. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.045>

Misu, H., M. Mori, S. Okumura, S. Kanazawa, N. Ikeguchi, and R. Nakai. 2018. High-quality tomato seedling production system using artificial light. *SEI Technical Review*. 86: 119-124.

Moreno-Pérez, E. C., F. Sánchez-Castillo, J. Gutiérrez-Tlaque, L. González-Molina, and J. Pineda-Pineda. 2015. Greenhouse lettuce production with and without nutrient solution recycling. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 21: 43-55. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2013.12.047>

Oosterhuis, D. M., D. A. Loka, and T. B. Raper. 2013. Potassium and stress alleviation: Physiological functions and management of cotton. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 176: 331-343. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200414>

Parra, T. S., P. G. Mendoza, and R. M. Villarreal. 2012. Relación nitrato/amonio/urea y concentración de potasio en la producción de tomate hidropónico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 3: 113-124.

- Pineda-Pineda, J., A. Ramírez-Arias, F. Sánchez-Castillo, A. M. Castillo-González, L. A. Valdez-Aguilar, and J. M. Vargas-Canales.** 2011. Extraction and nutrient efficiency during the vegetative growth of tomato under hydroponics conditions. *Acta Horticulturae*. 997-1005. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.893.112>
- Ramírez-Soler, C. H., S. Magnitskiy, M. M. S. Esperanza, and L. M. Melgarejo.** 2018. Efecto de dosis de nitrógeno, fósforo y potasio sobre el crecimiento del tomate de árbol (*Solanum betaceum* Cav.) en etapa vegetativa. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 12: 31-40. <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2018v12i1.7469>
- Reddy, D. D., and K. Veeranki.** 2013. Simple and inexpensive water extraction method for assaying potassium concentration in tobacco plant tissue. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 44: 962-970. <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.747603>
- Rey, J., A. M. Otalvaro, M. P. Chaparro, L. Prieto, and A. López.** 2018. Residuos de plaguicidas organofosforados en la cadena productiva del brócoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) y coliflor (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis*) en Colombia: Aproximación a un perfil de riesgo. *Revista Colombiana de Ciencias Agrícolas*. 2: 156-165. <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2018v12i1.7352>
- Rouphael, Y., G. Raimondi, R. Caputo, and S. Pascale.** 2016. Fertigation strategies for improving water use efficiency and limiting nutrient loss in soilless *Hippeastrum* production. *HortScience*. 51: 684-689. <https://doi.org/10.21273/hortsci.51.6.684>
- Sánchez-Castillo, F., E. C. Moreno-Pérez, J. Pineda-Pineda, J. M. Osuna, J. E. Rodríguez-Pérez, and T. Osuna-Encino.** 2014. Hydroponic tomato (*Solanum lycopersicum* L.) production with and without recirculation of nutrient solution. *Agrociencia*. 48: 185-197. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952014000200005
- Scholz, R. W., A. E. Ulrich, M. Eilittä, and A. Roy.** 2013. Sustainable use of phosphorus: A finite resource. *Science of the Total Environment*. 461-462- 799-803. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.043>
- Schwarz, D., G. B. Öztekin, Y. Tüzel, B. Brückner, and A. Krumbein.** 2013. Rootstocks can enhance tomato growth and quality characteristics at low potassium supply. *Scientia Horticulturae*. 149: 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.06.013>
- Shahzad, R., P. W. Harlina, M. Ayaad, M. Ewas, E. Nishawy, Fahad, H. Subthain, and M. H. Amar.** 2018. Dynamic roles of microRNAs in nutrient acquisition and plant adaptation under

nutrient stress: A review. *Plant OMICS*. 11: 58-79.
<https://doi.org/10.21475/poj.11.01.18.pne1014>

Sung, J., S. Lee, Y. Lee, S. Ha, B. Song, Kim, B. M. Waters, and H. B. Krishnan. 2015. Metabolomic profiling from leaves and roots of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants grown under nitrogen, phosphorus or potassium-deficient condition. *Plant Science*. 241: 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.09.027>

Vance, C. P. 2016. Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition. *Plant nutrition in a world of declining renewable resources*. *Plant Physiology*. 127: 390-397. <https://doi.org/10.1104/pp.010331.390>

Xu, G., F. Zhang, S. G. Shah, Y. Ye, and H. Mao. 2011. Use of leaf color images to identify nitrogen and potassium deficient tomatoes. *Pattern Recognition Letters*. 32: 1584-1590. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2011.04.020>

Zörb, C., M. Senbayram, and E. Peiter. 2014. Potassium in agriculture-status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*. 171: 656-669. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008>

CAPÍTULO 3. COMPETITIVIDAD AGRONÓMICA DE LA FAMILIA NATIVA DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) COMO PORTAINJERTO EN DÉFICIT DE FÓSFORO

3.1. RESUMEN

Las familias nativas (FN) de tomates (*Solanum lycopersicum* L.) mexicanos se emplean en la producción como variedades locales en varias comunidades rurales del país, pero un posible uso inmediato es como portainjertos. El objetivo de este experimento fue evaluar el efecto del suministro de fósforo en el crecimiento, rendimiento, concentración de fósforo y calidad del fruto de los genotipos sin injertar Cid y FN-457, e injertados Cid/Protector y Cid/FN-457, en invernadero e hidroponía. El diseño experimental fue completamente al azar, con arreglo de parcelas divididas, y los tratamientos fueron las dosis de 0.5 y 1.0 mM L⁻¹ de fósforo. Las dosis de fósforo produjeron una respuesta diferente ($p \leq 0.05$) en el crecimiento, rendimiento y fisiología de las plantas, pero no se modificó la calidad del fruto. Las plantas injertadas Cid/Protector y Cid/FN-457 produjeron 77 y 85% más fruto que el híbrido Cid; y 68 y 88% más que la FN-457 sin injertar ($p \leq 0.05$). El Cid/FN-457 mantuvo el crecimiento, rendimiento y la calidad del fruto similar a Cid/Protector. El Cid/FN-457 se puede emplear en condiciones de escasez de P para aumentar el rendimiento con respecto al Cid sin injertar e injertada sobre Protector.

Palabras clave: déficit de fósforo, familia nativa de tomate, injerto, portainjerto, rendimiento.

3.2. ABSTRACT

The native families (NF) of mexican tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) are used in production as local varieties in several rural communities in the country, but a possible immediate use is as rootstocks. The objective of this experiment was to evaluate the effect of phosphorous supply on the growth, yield, phosphorus concentration and fruit quality of the ungrafted genotypes Cid and FN-457, and grafted Cid/Protector and Cid/NF-457, in greenhouse and hydroponics. The experimental design was of randomized whit divided plots and the treatments were the doses of 0.5 and 1.0 mM L⁻¹ of phosphorus. The phosphorus doses produced a different response ($p \leq 0.05$) in the growth, yield and physiology of the plants, but the quality of the fruit was not modified. The Cid/Protector and Cid/NF-457 grafted plants produced 77 and 85% more fruit than the Cid hybrid; and 68 and 88% more than the NF-457 without grafting ($p \leq 0.05$). The Cid/FN-457 maintained the growth, yield and quality of the fruit similar to Cid/Protector. Cid/FN-457 can be used in conditions of low P to increase the yield with respect to Cid without grafting and grafted on Protector

Keywords: concentration of phosphorus, phosphorus deficit, native families of tomato, grafting, rootstock, yield.

3.3. INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los cultivos más importantes en México por el consumo *per cápita*, la producción y exportación del producto, y en adición, este país es el centro de domesticación (Peralta y Sponer, 2007). En 2018, en México se sembraron 49 200 ha de tomate que produjeron 3.7 millones de Mg (SIAP, 2018).

Las plantas de tomates nativos de México desarrollaron resistencia al estrés biótico y abiótico, y por tradición se emplean en la producción como variedades locales en varias comunidades rurales del país (Ríos-Osorio *et al.*, 2014), o como fuentes para el mejoramiento genético (Cookson *et al.*, 2014). Sin embargo, la tolerancia al estrés se relaciona con la morfología de la raíz que puede mejorar la absorción de nutrimentos, como el fósforo (P), cuando la disponibilidad es baja (Suchoff *et al.*, 2017).

Las plantas de tomates nativos mexicanos se emplean como portainjertos; es decir, pueden desarrollar mayor volumen radicular, que proporciona al vástago, el vigor, la capacidad de aumentar el rendimiento de fruto de la variedad élite y disminuye el estrés biótico y abiótico que causa el suelo infértil, contaminantes químicos (elementos pesados o pesticidas), falta o exceso de agua y presencia de patógenos (enfermedades causadas por insectos, hongos, bacterias o nematodos) (Velasco-Alvarado *et al.*, 2017).

El injerto en plantas hortícolas se empleó por primera vez para controlar *Fusarium* en sandía (*Citrullus lanatus* Thunb. Matsum. y Nakai) (López-Elías *et al.*, 2008). Sin embargo, esta técnica se utiliza en plantas como el melón (*Cucumis melo* L.) (Liu *et al.*, 2011), pepino (*Cucumis sativus* L.) (Maršić y Jakše, 2010), pimiento (*Capsicum annuum* L.) (Leal-Fernández *et al.*, 2013), berenjena (*Solanum melongena* L.) (Kawaguchi *et al.*, 2008), y tomate (Haberal *et al.*, 2016). En la actualidad, la técnica del injerto se utiliza para estudiar la absorción de agua (Nilsen *et al.*, 2014), la tolerancia a salinidad (Huang *et al.*, 2013), a elementos tóxicos (Balal *et al.*, 2017) y la absorción de nutrimentos (Nawaz *et al.*, 2016), entre otros factores.

El injerto ofrece varias ventajas, pero la técnica limita a algunos productores de tomate debido al costo del injerto, de envío y adquisición de semilla, y la escasa infraestructura de instalaciones (King *et al.*, 2010). Barrett *et al.* (2012) reportan un costo de planta injertada y no injertada de

\$14.5 y \$3.2 MXN, mientras que, la semilla de los portainjertos híbridos de tomate es importada y costosa; asimismo, los fertilizantes fosfatados representan un costo importante en la producción agrícola; se estima que en 2018 se emplearon 47 millones de Mg de P₂O₅ (Heuer *et al.*, 2017). Comprender estos problemas permitirá producir portainjertos alternativos eficientes en la adquisición de P, a un menor costo para los productores de tomate. Por lo anterior, el objetivo fue evaluar el efecto del suministro de fósforo en el crecimiento, rendimiento, concentración de fósforo en los diferentes órganos de la planta y la calidad del fruto de los genotipos sin injertar Cid y FN-457, e injertados Cid/Protector y Cid/FN-457, en invernadero e hidroponía. La hipótesis planteada fue que el genotipo Cid/FN-457 tendrá una respuesta similar en crecimiento, rendimiento, concentración de P en hoja, tallo, raíz y fruto, y mantendrá la calidad del fruto que Cid y Cid/Protector, y presentará una respuesta superior que el de la familia nativa 457 sin injertar.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en un invernadero ubicado en Texcoco, Estado de México (2240 m de altitud). Las dosis de P fueron 0.5 y 1.0 mM L⁻¹ y cuatro genotipos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.): Cid, FN-457, Cid/Protector y Cid/FN-457. Se emplearon los portainjertos Protector (testigo, Harris Moran[®]), y la FN-457 (colecta del estado de Veracruz, México). Las plántulas injertadas y no injertadas se adquirieron en la empresa Agrícola Zarattini S. A. de C.V., y cumplen los criterios de calidad establecidos por Misu *et al.* (2018).

Los materiales vegetales se trasplantaron 35 d después de la siembra (dds), en macetas de polietileno negro con 10 L de arena como sustrato, para facilitar la extracción de la raíz. La arena presentó un pH de 6.0, conductividad eléctrica (CE) de 0.44 dS m⁻¹, densidad aparente de 1.49 g cm⁻³, y partículas <0.1, 0.1, 0.25 y 0.5 mm, en una proporción de 12, 18, 19 y 32% en ese mismo orden, que en conjunto constituían el 81% de la muestra, y el resto lo constituían partículas de 1 a 4.7 mm. El sustrato presentó 56 y 44% de material sólido y espacio poroso total, este último subdividido en 9.0, 11.3, 7.4 y 16.0% en capacidad de aireación, agua de fácil disposición (AFD), agua de reserva (AR) y agua de difícil disposición, en el orden dado; y presentó 18.7% (AFD + AR) de agua total disponible. Las plántulas se condujeron a un tallo, y se fertirrigaron con la solución nutritiva Steiner (SNS), la cual se modificó en dos concentraciones de P, cada una equivalente a aplicar el 50 y 100% del P que contiene la SNS que presenta una CE de 2.0 dS m⁻¹.

El P se agregó como KH_2PO_4 , mientras que, los demás iones se agregaron con los fertilizantes comerciales: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, KNO_3 , K_2SO_4 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Los micronutrientes se incorporaron como quelatos de EDTA (mg L^{-1}) en cantidades de: 3.0 de Fe, 1.4 de Mn, 0.3 de Zn, 0.11 de Cu, 0.5 de B (H_3BO_3) y 0.12 de Mo. El pH de la SNS se ajustó a 5.5-6.0 con H_2SO_4 . Se aplicaron 1.5 L de SNS por maceta por d, los primeros 20 d después del trasplante (ddt) y se incrementó a 2.5 L d^{-1} hasta el fin del estudio.

A los 90 ddt se cuantificó por planta, el número total de frutos (NTF) y con déficit de calcio (NFD Ca^{2+}), el peso fresco de frutos con (PFFD Ca^{2+}) y sin déficit de calcio (PFFSD), el rendimiento (kg), la materia seca de hojas (MSH), tallos (MST), raíces (MSR), frutos sin déficit de calcio (MSFSD), total (MSTot, suma de MSH, MST, MSR y MSFSD), el área foliar (AF, se midió con el integrador de área foliar LI-3100[®]), y la tasa de asimilación neta de CO_2 (A_i) se determinó en dos plantas con el analizador de gases infrarrojos LI-6400 (LI-COR[®], Lincoln, NE, USA), en la hoja madura más próxima al ápice de la planta, entre las 11:30 y 12:30 h, momento en el cual, se registró un valor medio de radiación fotosintética activa de $560 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. La calidad de los frutos se midió con la firmeza (penetrómetro, Wagner Force FDK 160, Italia), los sólidos solubles totales (°brix, se determinaron con el refractómetro portátil PAL-1, Atago, Tokio, Japón), el color (L, c y h, se determinaron con el colorímetro, Precision NR20XE 3NH, Tecnology Co. LTD. SCM.) y el contenido de licopeno según Padrón *et al.* (2012).

Los órganos de las plantas se secaron en una estufa (*FELISA*, Jalisco, México) con circulación de aire forzado a $70 \pm 2.0 \text{ }^\circ\text{C}$, hasta peso constante. El material vegetal se molió (molino, Thomas Wiley Co, Philadelphia, PA, USA) y tamizó (malla no. 60). Después de la digestión en ácido nítrico y perclórico en relación 2:1 (v/v), se realizó la determinación de P total en dos muestras de hoja, tallo, raíz y fruto en un espectrofotómetro HP 845 (Santa Clara, CA, USA).

Como control de calidad de las mediciones de P se emplearon dos materiales de referencia; un material de control de calidad (MCC) del Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental (hojas de frijol) del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo; y el MCC, IPE 100 (hojas de pasto) que analizaron los participantes del Programa de Intercomparación de Plantas de la Universidad de Wageningen (Internacional Plant-Analytical Exchange), en el periodo 2003.1. Para el MCC de frijol se obtuvo 0.25% de P, valor dentro del intervalo con $0.23\% \pm 2s$, con un nivel de

confianza del 95%, con valores mínimo y máximo de 0.185 y 0.275%. Para el IPE 100, se obtuvo 12.36 cmol kg⁻¹, con un valor Z-score de 0.08, valor correcto según los datos que obtuvieron los participantes en el periodo 2003.1 (12.40 cmol kg⁻¹ y s de 0.45).

El diseño experimental fue completo al azar, con arreglo de parcelas divididas, con dos tratamientos de P. Las dosis y los genotipos representaron las parcelas grandes y chicas, con cuatro repeticiones por genotipo, y una planta se consideró como una repetición. Con los datos se realizó un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$), de SAS System 9.4.

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las plantas generaron diferente NTF (Figura 6-A, B y C) y similar PFFD de calcio (Figura 6-G, H e I) entre las dosis de P, genotipos e interacción (dosis×genotipo) ($p \leq 0.05$). En la Figura 6-A, B y C se observa que con la dosis de 0.5 mM L⁻¹ de P, las plantas de tomate produjeron 40% más NTF que con el suministro de 1.0 mM L⁻¹, y los materiales Cid/Protector y Cid/FN-457 generaron 13 y 27% más frutos que Cid y FN-457 sin injertar. El material Cid/FN-457 con la dosis de 1.0 mM L⁻¹ de P produjo 59% más frutos respecto a Cid/Protector, por lo cual, se debería considerar para la producción de tomate, y, además, permitirá disminuir el costo de producción, debido a que la FN-457 es libre de uso, por no contar con registro de derecho de obtentor.

Las plantas produjeron 34% más NFD de calcio con 1.0 mM L⁻¹ de P, que cuando se aplicó 0.5 mM L⁻¹ de P ($p \leq 0.05$) (Figura 6-D, E y F). Bhatt *et al.* (2009) reportan que, las plantas de tomate acumulan más nutrientes y fotoasimilados en la parte vegetativa, y menor cantidad de estos en las yemas florales y flores, como consecuencia de una baja fijación de CO₂, lo cual se observó en las plantas del tratamiento con 0.5 mM L⁻¹ de P, que fijaron 25% menos CO₂ que las plantas tratadas con 1.0 mM L⁻¹ de P, y como respuesta las yemas florales presentaron menor actividad metabólica, y produjeron 27 y 33% más NFD (Figura 6-D) y PFFD (Figura 6-G) de calcio.

La FN-457 produjo una cantidad 30% menor de NTF que los otros genotipos, sin embargo, en los resultados de la interacción dosis×genotipo, generó similar AF y tasa de fijación de CO₂ que el resto de los materiales, por lo que, este genotipo en condiciones de suficiencia nutrimental desarrolla la parte aérea vegetal (hoja y tallo), y no gasta energía en formación y desarrollo del

fruto, pero ya presentes, la planta no produce frutos con deficiencia de calcio, y las plantas de Cid, produjeron 88 y 46% más frutos con esta característica, que Cid/Protector y Cid/FN-457.

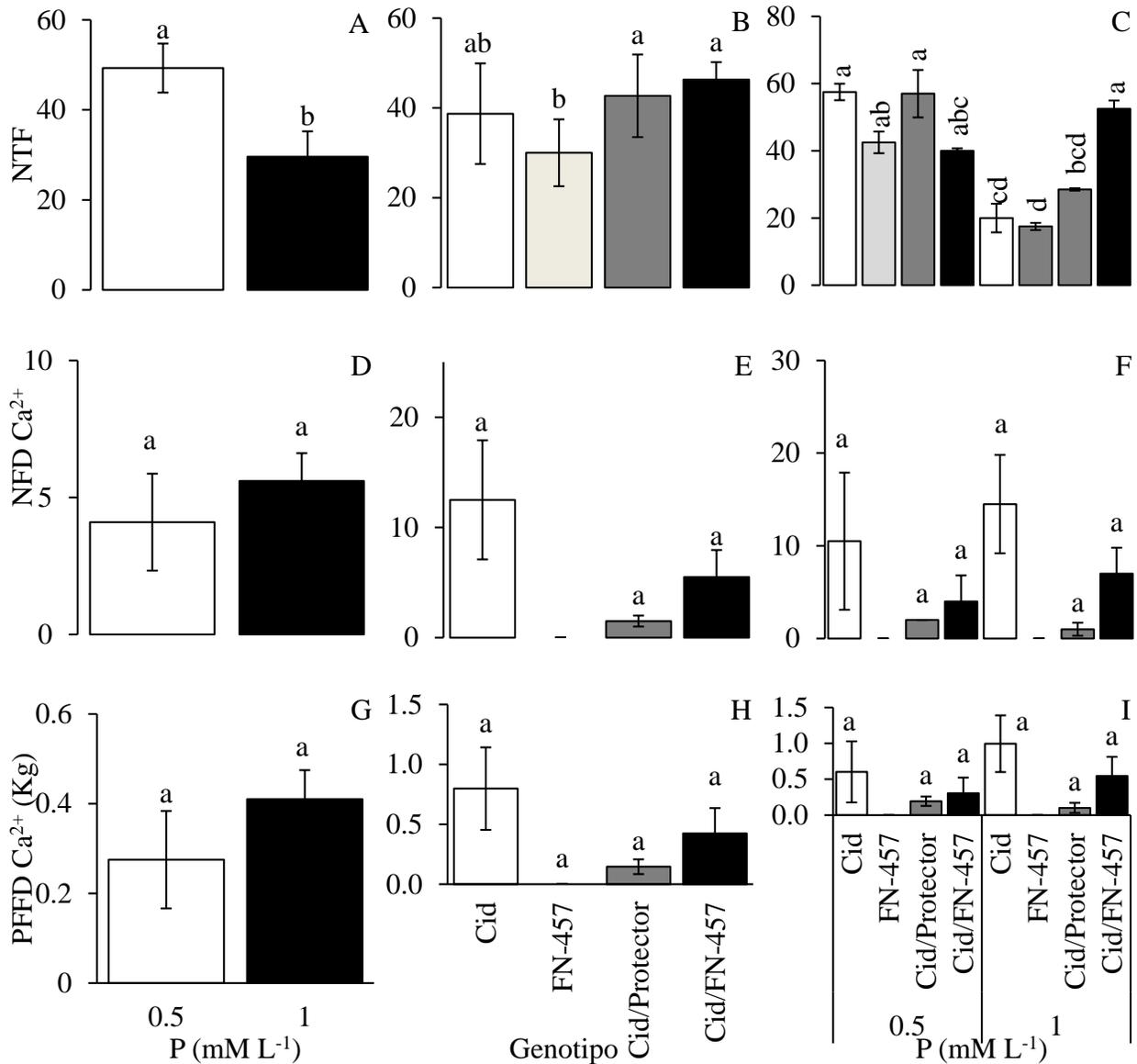


Figura 6. Efecto de la dosis de fósforo (A, D y G), del genotipo (B, E y H) y dosis×genotipo (C, F e I) en el número total de frutos (NTF) (A, B y C), frutos (NFD Ca²⁺) (D, E y F) y peso fresco de frutos con déficit de Ca²⁺ (PFFD Ca²⁺) (G, H e I) por planta, 90 días después del trasplante. Letras diferentes entre las dosis, genotipos y dosis×genotipo en cada gráfica indican diferencias significativas (Tukey; p ≤ 0.05). Barras, media ± desviación estándar. n = 4.

Las plantas de tomate produjeron similar PFFSD de calcio (verdes y maduros), entre las dosis de 0.5 y 1.0 mM L⁻¹ de P (Figura 7-A); pero, la FN-457 produjo en promedio 44% menos kg de frutos que Cid y plantas injertadas (Cid/Protector y Cid/FN-457) ($p \leq 0.05$) (Figura 7-B), sin embargo, se observó, que la FN-457 mantuvo el orden de distribución de fotoasimilados similar al de los otros materiales (frutos>hojas>tallo>raíz), y favoreció la producción de MS en los frutos y limitó el crecimiento y desarrollo de las hojas.

Las plantas de Cid y Cid/Protector produjeron con 1.0 mM L⁻¹ de P, más de 5.0 kg de fruto, mientras que, con la dosis de 0.5 mM L⁻¹ de P, estos materiales produjeron 10% menos frutos (kg), para presentar al final del estudio una cantidad similar que el Cid/FN-457 del tratamiento con 0.5 mM L⁻¹ de P (Figura 7-C), y dado el costo de la semilla de Protector (\$13.83 MXN por pieza), será mejor cultivar tomate con Cid/FN-457 para disminuir el costo de inversión. Los materiales Protector y FN-457 que se emplearon como portainjertos incrementaron el NTF, y disminuyeron el PFFSD y MSFSD de calcio por planta, debido a que estos materiales proporcionaron a través del xilema y floema, el agua, las hormonas, moléculas orgánicas y el P suficiente al vástago, para incrementar el rendimiento de fruto (Suchoff *et al.*, 2018).

El PFFSD de calcio, indica que no habría una respuesta significativa ($p \leq 0.5$) en la materia seca de mismos frutos (MSFSD de calcio); sin embargo, los resultados de dosis de P y dosis×genotipo avalan dicho resultado (Figura 7-D y F), mientras que, la respuesta por genotipo, indica que los frutos de las plantas Cid y FN-457 acumularon 25 y 57% más agua que los frutos de Cid/Protector y Cid/FN-457 (Figura 7-E), y sugiere, que los frutos de estas plantas pueden presentar mayor cantidad de azúcares (glucosa y fructosa), ácidos orgánicos y nutrimentos, que los frutos de los otros materiales.

Las plantas que se fertilizaron con 0.5 y 1.0 mM L⁻¹ de P, produjeron un rendimiento de fruto similar ($p \leq 0.05$), con valores de 3.6 y 3.7 kg planta⁻¹ (Figura 8-A). Sin embargo, los genotipos Cid/Protector y Cid/FN-457 produjeron en promedio 43% más frutos (kg) que Cid y FN-457 (Figura 8-B). Además, el rendimiento de tomate por planta en la interacción dosis×genotipo, indica que, tanto Cid/Protector y Cid/FN-457 producen cantidades similares de fruto que van de 5.3 a 6.6 kg planta⁻¹, mientras que, las plantas de la FN-457 y Cid que se fertilizaron con 1.0 mM L⁻¹ de P, produjeron 42 y 47% del rendimiento, que sus similares del tratamiento con 0.5 mM L⁻¹ de P

(Figura 8-C). La FN-457 presentó similar capacidad de absorción y uso de P que el Cid, al manifestar una respuesta equivalente a la variación del suministro de P (0.5 y 1.0 mM L⁻¹), sin disminuir el rendimiento de fruto (Figura 8-B y C).

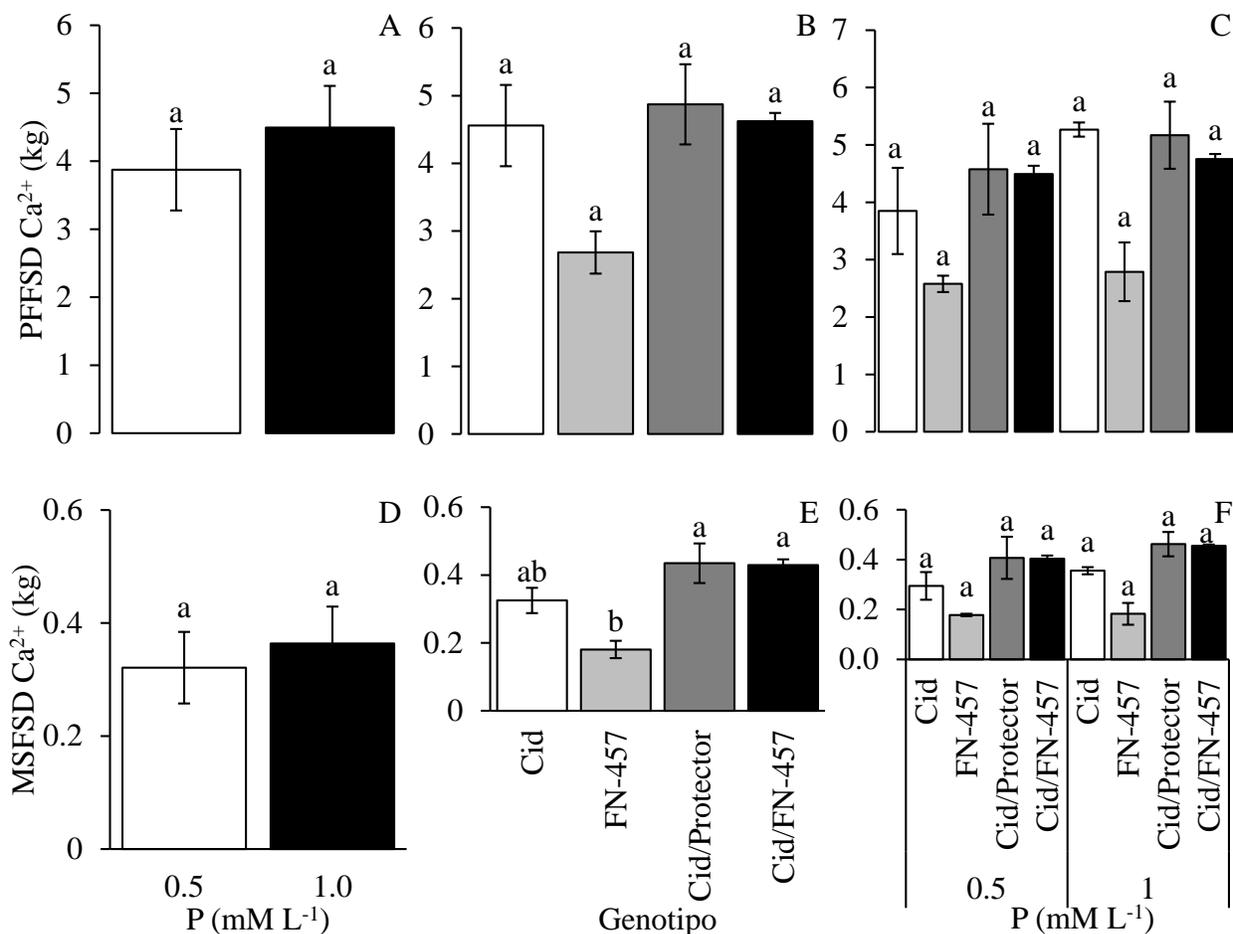


Figura 7. Efecto de la dosis de fósforo (A y D), del genotipo (B y E) y dosis×genotipo (C y F) en el peso fresco de frutos (PFFSD Ca²⁺) (A, B y C) y materia seca de frutos sin déficit de calcio (MSFSD Ca²⁺) (D, E y F) por planta, 90 días después del trasplante. Letras diferentes entre las dosis, genotipos y dosis×genotipo en cada gráfica indican diferencias significativas (Tukey; p ≤ 0.05). Barras, media ± desviación estándar. n = 4.

Los sistemas de producción agrícolas de tomate, que utilizan plantas injertadas incrementan el rendimiento de fruto, debido al portainjerto, dicha característica se observó al emplear a la FN-457 como portainjerto. Las plantas injertadas Cid/FN-457 produjeron un rendimiento de fruto 68 y 75% mayor que Cid, con el suministro de 0.5 y 1.0 mM L⁻¹ de P (p ≤ 0.05) (Figura 8-B). Las

plantas injertadas sobre materiales silvestres, presentan disminución del vigor del vástago (Doñas-Uclés *et al.*, 2015), sin embargo, dicho problema no se presentó u observó en el estudio; es decir, la FN-457 como portainjerto, proporcionó la cantidad suficiente de agua, el P, las hormonas (auxinas, citocininas, etileno y ácido jasmónico) y redistribuyó los fotoasimilados de la raíz al vástago (Cid) para mantener el rendimiento de fruto similar al de las plantas Cid/Protector (Figura 8-B y C).

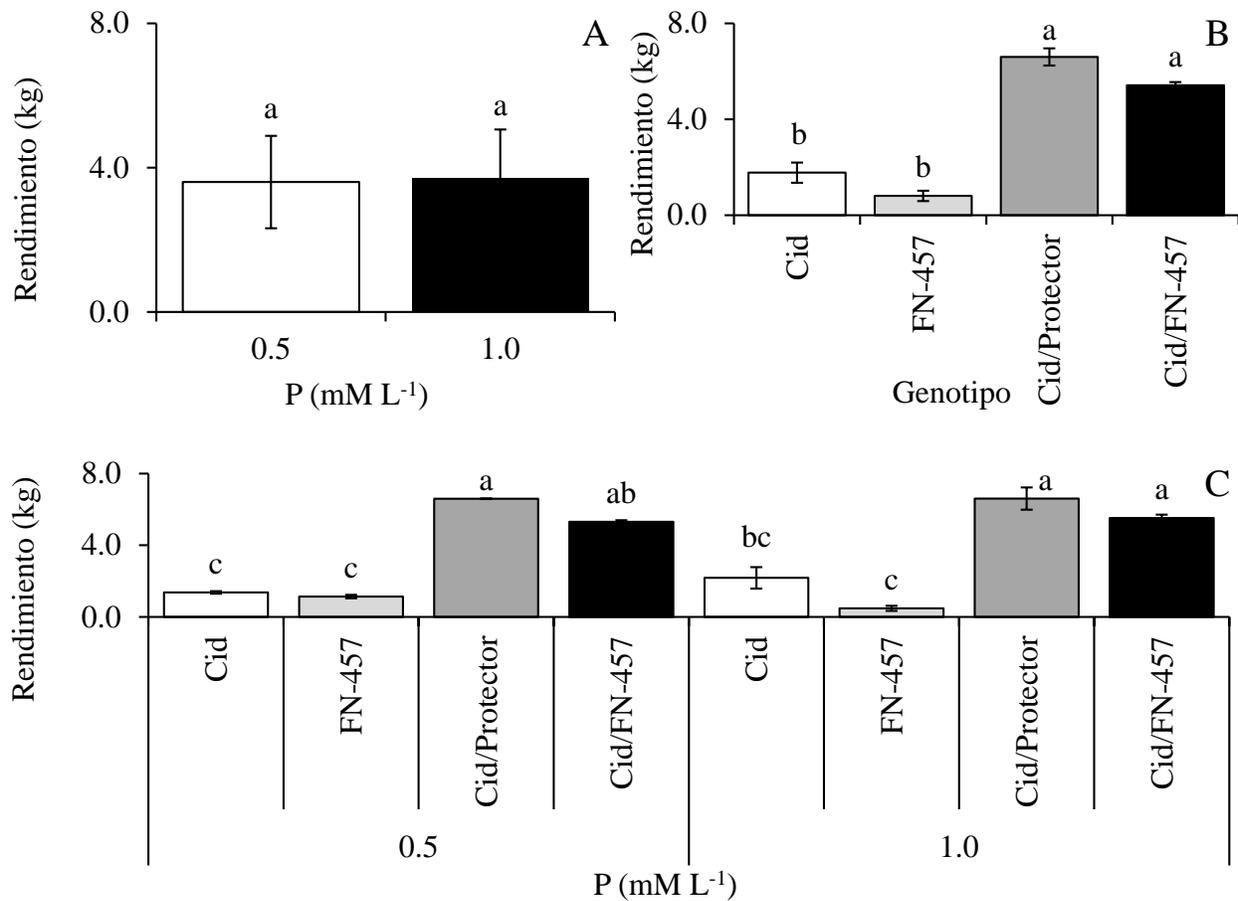


Figura 8. Efecto de la dosis de fósforo (A), del genotipo (B) y dosis×genotipo (C) en el rendimiento de fruto por planta, 90 días después del trasplante. Letras diferentes entre las dosis, genotipos y dosis×genotipo en cada gráfica indican diferencias significativas (Tukey; $p \leq 0.05$). Barras, media \pm desviación estándar. $n = 4$.

Los materiales que conforman la interacción vástago/portainjerto son vigorosos y en general no provocan la precocidad en la cosecha del fruto, sin embargo, los genotipos Cid/Protector y Cid/FN-457 produjeron un rendimiento de fruto superior, debido a que la cosecha de los frutos inicio 35 d

antes que el de las plantas sin injertar. Las plantas presentaron a los 90 ddt una cantidad similar de NTF entre los genotipos Cid, Cid/Protector y Cid/FN-457 ($p \leq 0.05$) (Figura 6-B), lo que indica que, estos materiales presentaron la misma capacidad de amarre y cuajado del fruto, pero los portainjertos promovieron la diferenciación floral, el crecimiento y desarrollo de los frutos, y por consecuencia incrementaron el rendimiento de fruto de estas plantas. Los días a aparición de la primera flor (44.6 dds), se reduce por efecto del portainjerto, debido a que estos promueven la diferenciación reproductiva de las plantas injertadas, que ocasiona la proteína móvil *Flowering locus T*, descubierta en 2007, y por consecuencia las plantas injertadas producen más frutos y son cosechados antes que los de las plantas sin injertar (Melnyk y Meyerowitz, 2015).

Las plantas de tomate produjeron cantidades diferentes de MSH y MST entre los tratamientos de P ($p \leq 0.05$). Las plantas que se abastecieron con 1.0 mM L^{-1} de P, generaron 25 y 27% más MS que sus similares que crecieron con 0.5 mM L^{-1} de P; sin embargo, las plantas presentaron similares cantidades de MSR y MSTot entre las dosis de P ($p \leq 0.05$). Lo anterior, se debió a que las plantas compensaron la distribución de fotoasimilados y limitaron el crecimiento y desarrollo de las hojas y tallos, para garantizar el crecimiento del fruto y raíz, lo cual coincide con los resultados de AF y Ai, ya que las plantas de tomate que se abastecieron con 0.5 mM L^{-1} de P, fijaron 25% más CO_2 que las plantas que se fertilizaron con 1.0 mM L^{-1} de P, y como consecuencia, estos materiales generaron 33% menos AF (Cuadro 12). El AF y Ai, explican la diferencia en el NTF, ya que las plantas que crecieron con 0.5 mM L^{-1} de P, produjeron más frutos por planta, menor MSH, MST y AF, pero presentaron similares PFFSD y MSFSD de calcio y rendimiento (kg de fruto) entre tratamientos.

Las plantas injertadas presentarán una interacción portainjerto×injerto×ambiente, por ello, el crecimiento dependerá el sistema radicular del portainjerto, que proporciona el agua y nutrimentos en proporción a la demanda del injerto, que se relaciona con la cantidad de agua que este transpira, en suma, lo anterior explica la menor MSH y MST que produjeron las plantas tratadas con 0.5 mM L^{-1} de P (Velasco-Alvarado *et al.*, 2017) (Cuadro 12).

La deficiencia de P, disminuye el crecimiento aéreo (hoja y tallo), debido a la inducción de genes de respuesta de inanición de P, pero las plantas con bajo suministro de P (como la FN-457), que presentan el gen *PHOI-Low* pueden presentar un crecimiento aéreo similar al de una planta

que crece y se desarrolla en condiciones de suficiencia de P (Heuer *et al.*, 2017), tal como el que presentaron las plantas del tratamiento con 0.05 mM L⁻¹ de P, que limitaron el crecimiento de la hoja, tallo y raíz, pero presentaron una cantidad similar de MSTot, lo cual se debió a la cantidad de MS que acumularon los frutos de este tratamiento.

Cuadro 12. Efecto de las dosis de fósforo en la materia seca de hoja, tallo, raíz, total, área foliar y tasa de asimilación neta de CO₂, 90 días después del trasplante.

P-PO ₄ [†]	Materia seca (g órgano ⁻¹)				AF	<i>Ai</i>
	Hoja	Tallo	Raíz	Total	cm ²	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹
0.5	88.3 b	53.5 b	20.6 a	483.5 a	10200.1 b	16.6 a
1.0	118.1 a	74.0 a	20.7 a	576.7 a	15254.4 a	12.5 b
CV (%)	22.3	20.2	26.7	15.6	17.5	7.9
DMS	27.0	13.0	6.3	101.3	2671.8	1.4

Medias con letras diferentes en las columnas indican diferencia estadística (Tukey; $p \leq 0.05$). [†]P-PO₄⁻ = mmol L⁻¹; MSTot = MSH + MST + MSR + MSF; AF = Área foliar; *Ai* = Tasa de asimilación neta de CO₂; CV = Coeficiente de variación; DMS = Diferencia mínima significativa. n = 4.

Los genotipos generaron similar MSH, MST, MSR, AF y *Ai* ($p \leq 0.05$), pero las plantas Cid/Protector y Cid/FN-457 acumularon 58 y 62% más MSTot que la FN-457 lo cual es diferente en términos estadísticos ($p \leq 0.05$). La FN-457 sin injertar presentó una cantidad similar de MSTot que el Cid, por lo tanto, presentó la misma capacidad para usar el P (0.5 y 1.0 mM L⁻¹) que este material. Los materiales injertados pueden presentar incompatibilidad, y menor crecimiento de la planta, producción y calidad de los frutos (Haberal *et al.*, 2016), sin embargo, estas características no se observaron en las plantas injertadas, ya que generaron similares cantidades de MSTot, AF y *Ai*, que Cid sin injertar (Cuadro 13).

Las plantas de tomate generaron cantidades similares de MSH, MST, MSR y MSTot en los resultados de dosis×genotipo ($p \leq 0.05$). Sin embargo, las plantas de Cid, FN-457, Cid/Protector y Cid/FN-457 que se fertirrigaron con la SNS de contiene 0.5 mM L⁻¹ de P, produjeron en promedio 34% menos AF, pero fijaron 23, 30, 15 y 30% más CO₂, en el orden dado, que las plantas del tratamiento con 1.0 mM L⁻¹ de P (Cuadro 14). El vástago de la planta injertada puede incrementar la fijación de CO₂ cuando posee un sistema de raíz vigoroso, que a su vez causa un resultado

positivo en el rendimiento (Guan *et al.*, 2014), tal como se observó en los genotipos Cid/Protector y Cid/FN-457.

Cuadro 13. Materia seca de hoja, tallo, raíz, total, área foliar y tasa de asimilación neta de CO₂ en genotipos de tomate, 90 días después del trasplante.

Genotipo	Materia seca (g órgano ⁻¹)				AF	<i>Ai</i>
	Hoja	Tallo	Raíz	Total [†]	cm ²	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹
Cid	103.3 a	68.8 a	22.1 a	519.4 ab	13887.6 a	14.7 a
FN-457	113.9 a	61.9 a	23.8 a	380.2 b	12977.4 a	14.6 a
Cid/Protector	94.5 a	59.4 a	15.7 a	604.1 a	12201.5 a	14.0 a
Cid/FN-457	101.5 a	64.9 a	21.1 a	616.8 a	11841.4 a	15.1 a
CV (%)	22.3	20.2	26.7	15.6	17.5	7.9
DMS	28.2	15.7	8.9	202.7	5345.6	2.8

Medias con letras diferentes en las columnas indican diferencia estadística (Tukey; $p \leq 0.05$).

[†]MSTot = MSH + MST + MSR + MSF; AF = Área foliar; *Ai* = Tasa de asimilación neta de CO₂;

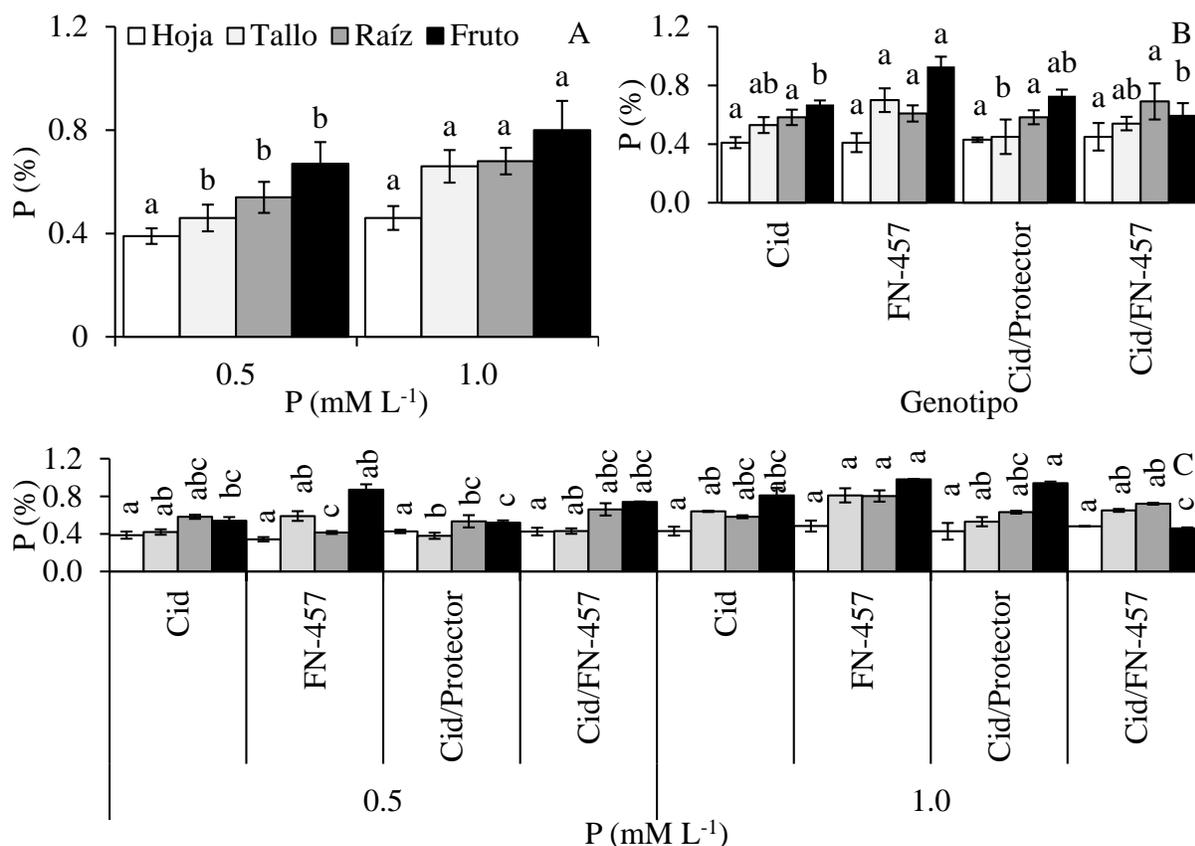
CV = Coeficiente de variación; DMS = Diferencia mínima significativa. n = 4.

Cuadro 14. Efecto de la dosis de fósforo en genotipos de tomate en la materia seca de hoja, tallo, raíz, total, área foliar y tasa de asimilación neta de CO₂, 90 días después del trasplante.

P-PO ₄ [†]	Genotipo	Materia seca (g órgano ⁻¹)				AF	<i>Ai</i>
		Hoja	Tallo	Raíz	Total	cm ²	μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹
0.5	Cid	98.4 a	58.9 a	25.3 a	477.3 a	11041.1 b	16.6 abc
	FN-457	96.3 a	50.0 a	22.2 a	346.5 a	9690.2 b	17.2 ab
	Cid/Protector	70.8 a	48.5 a	14.7 a	542.3 a	9675.4 b	15.1 abc
	Cid/FN-457	87.7 a	56.2 a	20.3 a	567.9 a	10424.1 b	17.7 a
1.0	Cid	108.3 a	78.8 a	19.0 a	561.5 a	16734.1 a	12.8 abc
	FN-457	131.7 a	73.8 a	25.4 a	413.7 a	16294.5 a	12.1 c
	Cid/Protector	117.2 a	70.0 a	16.5 a	665.8 a	14727.5 a	12.9 abc
	Cid/FN-457	115.3 a	73.6 a	21.8 a	665.8 a	13258.8 a	12.5 bc
CV (%)		22.3	20.2	26.7	15.6	17.5	7.9
DMS		62.4	31.5	13.5	324.7	5393.2	1.6

Medias con letras diferentes en las columnas indican diferencia estadística (Tukey; $p \leq 0.05$). $^{\dagger}P-PO_4^- = \text{mmol L}^{-1}$; $MST_{\text{Tot}} = MSH + MST + MSR + MSF$; $AF = \text{Área foliar}$; $A_i = \text{Tasa de asimilación neta de } CO_2$; $CV = \text{Coeficiente de variación}$; $DMS = \text{Diferencia mínima significativa}$. $n = 4$.

Las hojas de tomate presentaron una concentración de P similar entre las dosis de P ($p \leq 0.05$). Sin embargo, las plantas que se fertilizaron con 1.0 mM L^{-1} de P, presentaron en el tallo, raíz y fruto una concentración de P, 30, 22 y 16% mayor que el que mostraron los órganos de las plantas que crecieron con 0.5 mM L^{-1} de P (Figura 9-A).



Los genotipos presentaron una concentración de P similar en hoja y raíz con valores de 0.4-0.45 y 0.58-0.69 ($p \leq 0.05$), pero la FN-457 sin injertar presentó en el tallo una concentración promedio de P, 28% mayor que los otros materiales, mientras que, los frutos mostraron una

concentración de P, 28, 22 y 35% mayor a la que presentaron los frutos del Cid, Cid/Protector y Cid/FN-457 (Figura 9-B). Lo anterior indica que la FN-457 sin injertar acumula este nutrimento en el fruto y tallo, y después lo redistribuye y transloca a las hojas y raíces, en consecuencia, genera menor AF, y cuando se utilizó como portainjerto, el Cid/FN-457 presentó mayor concentración de P en el orden de raíz> fruto> tallo> hoja (Figura 9-B).

Las plantas del Cid/FN-457 del tratamiento con 0.5 mM L⁻¹ de P, presentaron en los tallos una concentración de P, 8, 28 y 10% menor que Cid, FN-457 y Cid/FN-457 del mismo tratamiento, y una concentración 11% mayor que Cid/Protector del tratamiento con 1.0 mM L⁻¹ de P. Asimismo, la FN-457 del tratamiento con 0.5 mM L⁻¹ de P, presentó en la raíz una concentración de P 44% mayor, que su similar del tratamiento con 1.0 mM L⁻¹. La FN-457 sin injertar que se fertilizó con 1.0 mM L⁻¹ de P, presentó en los frutos una concentración de P, 11, 4 y 54% mayor, que los frutos de los materiales Cid, Cid/Protector y Cid/FN-457 del mismo tratamiento ($p \leq 0.05$) (Figura 9-C).

Los frutos presentaron una firmeza, color (luminosidad, croma y hue°) y contenido de licopeno similar entre las dosis de P, con valores promedio de 2.45 kgf, 54.2, 47.4, 45.3 y 77.5 µg g⁻¹ pulpa ($p \leq 0.05$), es decir, la dosis de 0.5 mM L⁻¹ de P, no perjudicó de manera negativa la calidad de los frutos; sin embargo, las plantas de este tratamiento, produjeron frutos con 7.5% más SST (sucrosa, glucosa, fructosa, ácidos orgánicos, etc.), que los frutos de las plantas que se fertirrigaron con 1.0 mM L⁻¹ de P. Además, los frutos presentaron una luminosidad blanca (L), un color rosado-anaranjado (c) y exhibieron un cambio de color a rojo (ángulo de tono de 45) (Cuadro 15).

Cuadro 15. Efecto de la dosis de fósforo en la firmeza, sólidos solubles totales, parámetros de color y licopeno en frutos de tomate, 90 días después del trasplante.

P-PO ₄ [†]	Firmeza	SST	Parámetros de color			Licopeno
	kgf	°brix	Luminosidad	Croma	Hue°	µg g ⁻¹ pulpa
0.5	2.5 a	5.4 a	54.4 a	47.3 a	45.5 a	76.9 a
1.0	2.4 a	5.0 b	54.1 a	47.6 a	45.2 a	78.1 a
CV (%)	19.1	4.5	2.7	3.2	4.1	9.8
DMS	0.4	0.3	1.4	1.5	1.6	6.1

Medias con letras diferentes en las columnas indican diferencia estadística (Tukey; $p \leq 0.05$). \dagger P- $\text{PO}_4^- = \text{mmol L}^{-1}$; SST = Sólidos solubles totales; CV = Coeficiente de variación; DMS = Diferencia mínima significativa. $n = 10$.

Las plantas del Cid produjeron frutos con una firmeza 22% superior a la que mostraron los frutos del Cid/FN-457, mientras que, los frutos de la FN-457 mostraron en promedio 17% más SST, que los frutos del Cid/Protector y Cid/FN-457; y Cid, produjo frutos en promedio 7% menos luminosos, que los frutos de la FN-457, Cid/Protector y Cid/FN-457. Además, los frutos de las plantas Cid y FN-457 presentaron un color rojo 30% menos intenso, que el que exhibieron los frutos de las plantas Cid/Protector y Cid/FN-457, sin embargo, los frutos de estos materiales mostraron una coloración 14% más anaranjada-roja que los frutos de Cid y FN-457 (Cuadro 16).

El color, es un parámetro subjetivo, e indica que los frutos de los genotipos Cid y FN-457 se cosecharon en etapa verde-rosado o rosado, y los frutos de Cid/Protector y Cid/FN-457 se colectaron en etapa rosado-rojo (Padrón *et al.*, 2012), y demuestra que, los portainjertos no modificaron el color de los frutos. Los frutos de las plantas Cid y FN-457 acumularon más agua (Figura 7-E), sin embargo, presentaron similar firmeza y mayor contenido de SST ($p \leq 0.05$) que los frutos de Cid/Protector y Cid/FN-457 (Cuadro 16).

Cuadro 16. Firmeza, sólidos solubles totales, parámetros de color y licopeno de frutos de diferentes genotipos de tomate, 90 días después del trasplante.

Genotipo	Firmeza	SST [†]	Parámetros de color			Licopeno
	kgf	°brix	Luminosidad	Croma	Hue°	$\mu\text{g g}^{-1}$ pulpa
Cid	2.8 a	5.4 b	51.7 b	39.0 b	52.3 a	78.2 a
FN-457	2.4 ab	5.8 a	55.0 a	39.0 b	50.2 a	78.4 a
Cid/Protector	2.4 ab	4.8 c	55.1 a	55.6 a	39.4 b	76.9 a
Cid/FN-457	2.2 b	4.9 c	55.2 a	56.1 a	39.5 b	76.4 a
CV (%)	19.1	4.5	2.7	3.2	4.1	9.8
DMS	0.3	0.2	1.1	1.1	2.4	5.6

Medias con letras diferentes en las columnas indican diferencia estadística (Tukey; $p \leq 0.05$). \dagger SST = Sólidos solubles totales; CV = Coeficiente de variación; DMS = Diferencia mínima significativa. $n = 10$.

Los frutos de tomate presentaron una firmeza similar en la interacción dosis×genotipo en términos estadísticos con valores de 2 a 2.9 kgf ($p \leq 0.05$). Sin embargo, los frutos del Cid y FN-457 del tratamiento con 0.5 mM L⁻¹ y los de la FN-457 que se fertilizó con 1.0 mM L⁻¹ de P, mostraron mayor contenido de SST, respecto a la cantidad de SST que se cuantificaron en los frutos de los otros genotipos. A pesar de obtener diferencias estadísticas en la luminosidad de los frutos ($p \leq 0.05$), estos presentaron valores positivos mayores de 50%, sin embargo, las plantas Cid y FN-457 que se fertirrigaron con 0.5 y 1.0 mM L⁻¹ de P, presentaron frutos de color anaranjado-rojo, es decir, exhibieron un color 30% menos rojo, que los frutos de las plantas Cid/Protector y Cid/FN-457 de sus respectivos tratamientos (Cuadro 17).

Cuadro 17. Efecto de la dosis de fósforo en la firmeza, sólidos solubles totales, parámetros de color y licopeno en frutos de diferentes genotipos de tomate, 90 días después del trasplante.

P-PO ₄ [†]	Genotipo	Firmeza	SST	Parámetros de color			Licopeno
		kgf	°brix	Luminosidad	Croma	Hue°	µg g ⁻¹ pulpa
0.5	Cid	2.9 a	5.6 ab	51.3 c	39.5 b	51.5 a	75.6 a
	FN-457	2.4 a	6.0 a	55.1 ab	38.2 b	51.1 a	82.4 a
	Cid/Protector	2.5 a	4.9 c	54.9 ab	54.8 a	39.7 b	75.1 a
	Cid/FN-457	2.3 a	5.0 bc	56.3 a	56.6 a	39.8 b	74.5 a
1.0	Cid	2.8 a	5.2 bc	52.1 bc	38.5 b	53.0 a	80.8 a
	FN-457	2.3 a	5.5 ab	54.9 ab	39.8 b	49.3 a	74.4 a
	Cid/Protector	2.4 a	4.7 c	55.3 ab	56.5 a	39.2 b	78.6 a
	Cid/FN-457	2.0 a	4.8 c	54.0 abc	55.6 a	39.1 b	78.3 a
	CV (%)	19.1	4.5	2.7	3.2	4.1	9.8
	DMS	0.9	0.3	2.1	2.1	3.6	10.8

Medias con letras diferentes en las columnas indican diferencia estadística (Tukey; $p \leq 0.05$). †P-PO₄ = mmol L⁻¹; SST = Sólidos solubles totales; CV = Coeficiente de variación; DMS = Diferencia mínima significativa. n = 10.

La calidad de la fruta, se considera como parte inherente al material comercial, pero ciertas combinaciones vástago/portainjerto pueden afectar el color, la firmeza, los SST y concentración

nutrimental (Guan *et al.*, 2014); sin embargo, las dosis de suministro de P y los portainjertos, no modificaron estas propiedades del fruto. El color rojo del fruto de tomate se determina por la proporción de dos pigmentos, el licopeno y β -caroteno. El licopeno, por lo tanto, determina la intensidad de color rojo de la epidermis del fruto, al respecto, los frutos de tomate de los diferentes materiales presentaron un contenido de licopeno similar entre las dosis de P (Cuadro 15), genotipos (Cuadro 16) e interacción dosis \times genotipo (Cuadro 17) ($p \leq 0.05$). Turhan *et al.* (2011) reportan como adecuado para la mayoría de los frutos de tomate un contenido de licopeno de $50 \mu\text{g g}^{-1}$ pulpa, sin embargo, los frutos en este experimento presentaron 39% más licopeno que dicho valor, mientras que, los frutos de la FN 457 sin injertar mostraron un contenido de licopeno 57% mayor.

Las plántulas injertadas y no injertadas de este estudio se adquirieron a un precio de \$18.0 y \$6.0 MXN, además, la SNS significó una inversión de \$0.478 y \$0.489 MXN L^{-1} , para las dosis de 0.5 y 1.0 mM L^{-1} de P. Asimismo, las semillas de Cid y Protector se adquirieron a un precio de \$2.875 y \$13.83 MXN, en el orden dado; mientras que, las semillas de la FN-457, proceden de un trabajo de conservación que llevo a cabo el Dr. Porfirio Ramírez Vallejo (QEPD), denominado: Valoración integral de la diversidad de germoplasma nativo de jitomate mexicano (*Solanum lycopersicum* L.), y actualmente el material se resguarda en el Laboratorio de Fisiotécnica Vegetal Avanzada del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

Para establecer un cultivo de tomate con los materiales Cid, FN-457, Cid/Protector y Cid/FN-457, se consideró un porcentaje de germinación de 85% y una supervivencia de las plantas injertadas de 85%; con los datos anteriores, se calculó el costo ha^{-1} (33 000 plantas); para ello se necesitará invertir en los cultivos una cantidad de \$654 637, \$198 000, \$12 899 601 y \$1 963 912 MXN. Además, se consideró que las plantas de tomate se fertirrigaron con 2.5 L d^{-1} de SNS por 90 d, por consiguiente, se emplearán 7 425 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ de SNS, equivalente a un costo de elaboración de la SNS de \$354 801.8 y \$363 154.9 para las dosis de 0.5 y 1.0 mM L^{-1} de P.

Con el costo de la planta y el de la SNS, para la dosis de 1.0 mM L^{-1} de P, se calculó una inversión para los cultivos de Cid, FN-457, Cid/Protector y Cid/FN-457 de \$1 017 792, \$561 155, \$13 262 756 y \$2 327 067 MXN, en el mismo orden; y estos cultivos fertirrigados con la SNS que contiene 0.5 mM L^{-1} de P, requerirán de una inversión de \$1 009 439, \$552 801, \$13 254 402 y \$2 318 714 MXN.

Con el rendimiento de fruto (Figura 3-C), una densidad de 3.3 plantas m⁻² y una dosis de 0.5 mM L⁻¹ de P, se estimó un rendimiento de fruto para los genotipos Cid, FN-457, Cid/Protector, Cid/FN-457 de 44.8, 37.3, 217.7 y 174.9 Mg ha⁻¹; y estos materiales, generarán 71.6, 16.5, 217.8 y 182.2 Mg ha⁻¹ al aplicar 1.0 mM L⁻¹ de P, en ese mismo orden. Adicionalmente, se consideró un precio de venta de \$22 MNX kg⁻¹ de tomate, por lo cual, se infiere que el agricultor tendrá ganancias económicas con la FN-457 y Cid/FN-457 tratadas con 0.5 mM L⁻¹ de P, de \$267 578 y \$1 529 085 MXN, y con los materiales Cid y Cid/FN-457 que se fertilizaron con 1.0 mM L⁻¹ de P, generarán dividendos de \$557 627 y \$1 383 885 MXN.

3.6. CONCLUSIONES

Las dosis de fósforo produjeron un crecimiento diferente de las plantas de tomate, por consecuencia se modificó el rendimiento, la concentración de P en la hoja y fruto, sin embargo, no alteraron la calidad del fruto. El genotipo Cid/FN-457 presentó un similar crecimiento, rendimiento, concentración de P en los diferentes órganos y calidad del fruto que Cid/Protector. Los productores de tomate pueden utilizar el genotipo Cid/FN-457 en condiciones de escasez de P para aumentar su rendimiento, con respecto al Cid sin injertar e injertada sobre Protector.

3.7. AGRADECIMIENTOS

Benjamín González Vargas agradece a CONACYT por la beca otorgada para realizar los estudios de Doctorado en Ciencias en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

3.8. LITERATURA CITADA

- Balal, R. M., M. A. Shahid, C. Vincent, L. Zotarelli, G. Liu, N. S. Mattson, B. Rathinasabapathi, J. J. Martínez-Nicolas, and F. García-Sánchez.** 2017. Kinnow mandarin plants grafted on tetraploid rootstocks are more tolerant to Cr-toxicity than those grafted on its diploids one. *Environmental and Experimental Botany*. 140: 8-18.
- Bhatt, R. M., N.K. Srinivasa R., K. K. Upreti, and H. S. Shobha.** 2009. Floral abscission and changes in sucrose phosphate synthase and invertase activities in water deficient tomato. *Indian Journal Plant Physiology*. 14: 370-376.

- Barrett, C. E., X. Zhao, and A. W. Hodges.** 2012. Cost benefit analysis of using grafted transplants for root-knot nematode management in organic heirloom tomato production. *HortTechnology*. 22: 252-257.
- Cookson, S. J., M. J. Clemente M., C. Hevin, L. Z. Nyamba M., S. Delrot, N. Magnin, C. Trossat-Magnin, and N. Ollat.** 2014. Heterografting with nonself rootstocks induces genes involved in stress responses at the graft interface when compared with autografted controls. *Journal of Experimental Botany*. 65: 2473-2481.
- Doñas-Uclés, F., D. Pérez-Madrid, C. Amate-Llobregat, E. M. Rodríguez-García, and F. Camacho-Ferre.** 2015. Production of pepper cultivar palermo grafted onto serrano de Morelos 2, Jalapeño, and three commercial rootstocks. *HortScience*. 50: 1018-1022.
- Guan, W., X. Zhao, D. W. Dickson, M. L. Mendes, and J. Thies.** 2014. Root-knot nematode resistance, yield, and fruit quality of specialty melons grafted onto *Cucumis metulifer*. *HortScience*. 49: 1046-1051.
- Haberal, M., D. A. Körpe, D. A., Ö. D. İşeri, and F. I. Sahin.** 2016. Grafting tomato onto tobacco rootstocks is a practical and feasible application for higher growth and leafing in different tobacco–tomato unions. *Biological Agriculture and Horticulture*. 32: 248-257.
- Heuer, S., R. Gaxiola, R. Schilling, L. Herrera-Estrella, D. López-Arredondo, M. Wissuwa, E. Delhaize, and H. Rouached.** 2017. Improving phosphorus use efficiency: A complex trait with emerging opportunities. *The Plant Journal*. 90: 868-885.
- Huang, Y., J. Li, B. Hua, Z. Liu, M. Fan, and Z. Bie.** 2013. Grafting onto different rootstocks as a means to improve watermelon tolerance to low potassium stress. *Scientia Horticulturae*. 149: 80-85.
- Kawaguchi, M., A. Taji, D. Backhouse, and M. Oda.** 2008. Anatomy and physiology of graft incompatibility in solanaceous plants. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 83: 581-588.
- King, S. R., A. R. Davis, X. Zhang, and K. Crosby.** 2010. Genetics, breeding and selection of rootstocks for Solanaceae and Cucurbitaceae. *Scientia Horticulturae*. 127: 106-111.
- Leal-Fernández, C., H. Godoy-Hernández, C. A. Núñez-Colín, J. L. Anaya-López, S. Villalobos-Reyes, and J. Z. Castellanos.** 2013. Morphological response and fruit yield of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) grafted onto different commercial rootstocks. *Biological Agriculture and Horticulture*. 29: 1-11.

- Liu, Y. F., H. Y. Qi, C. M. Bai, M. F. Qi, C. Q. Xu, J. H. Hao, Y. Li, and T. L. Li.** 2011. Grafting helps improve photosynthesis and carbohydrate metabolism in leaves of muskmelon. *International Journal of Biological Sciences*. 7: 1161-1170.
- López-Elías, J., A. R. F. Romo A., y J. G. Domínguez S.** 2008. Evaluación de métodos de injerto en sandía (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. y Nakay) sobre diferentes patrones de calabaza. *IDESIA (Chile)*. 26: 13-18.
- Maršić, N. K., and M. Jakše.** 2010. Growth and yield of grafted cucumber (*Cucumis sativus* L.) on different soilless substrates. *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 8: 654-658.
- Melnyk, C. W., and E. M. Meyerowitz.** 2015. Plant grafting. *Current Biology*. 25: R183–R188.
- Misu, H., M. Mori, S. Okumura, S. Kanazawa, S. Ikeguchi, N., and R. Nakai.** 2018. High-quality tomato seedling production system using artificial light. *SEI Technical Review*. 119-124.
- Nawaz, M. A., M. Imtiaz, Q. Kong, F. Cheng, W. Ahmed, Y. Huang, and Z. Bie.** 2016. Grafting: A technique to modify ion accumulation in horticultural crops. *Frontiers in Plant Science*. 7: 1-15.
- Nilsen, E. T., J. Freeman, R. Grene, and J. Tokuhisa.** 2014. A rootstock provides water conservation for a grafted commercial tomato (*Solanum lycopersicum* L.) line in response to mild-drought conditions: A focus on vegetative growth and photosynthetic. *PLOS ONE*. 9: 1-22.
- Padrón, P. C. A., G. M. Padrón L., A. I. Montes H., y R. A. Oropeza G.** 2012. Determinación del color en epicarpio de tomates (*Lycopersicum esculentum* Mill.) con sistemas de visión computarizada durante la maduración. *Agronomía Costarricense*. 36: 97-111.
- Ríos-Osorio, O., J. L. Chávez-Servia, y J. C. Carrillo-Rodríguez.** 2014. Producción tradicional y diversidad de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) nativo: Un estudio de caso en Tehuantepec-Juchitán, México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*. 11: 35-51.
- SIAP (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera).** 2018. Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Ciudad de México. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (febrero 2020).
- Suchoff, D. H., C. C. Gunter, and F. J. Louws.** 2017. Comparative analysis of root system morphology in tomato rootstocks. *Horticulture Technology*. 27: 319-324.

- Suchoff, D. H., C. C. Gunter, J. R. Schultheis, R. L. Hassell, and F. J. Louws.** 2018. The effect of grafting on nitrogen use in determinate field-grown tomatoes. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 94: 102-109.
- Turhan, A., N. Ozmen, M. S. Serbeci, and V. Seniz.** 2011. Effects of grafting on different rootstocks on tomato fruit yield and quality. *Horticultural Science*. 38: 142-149.
- Velasco-Alvarado, M. J., R. Lobato-Ortiz, J. J. García-Zavala, R. Castro-Brindis, S. Cruz-Izquierdo, T. Corona-Torres, and M. K. Moedano-Mariano.** 2017. Mexican native tomatoes as rootstocks to increase fruit yield. *Chilena Journal of Agricultural Research*. 77: 187-193.
- Peralta, I. E., and D. M. Spooner.** 2007. History, origin and early cultivation of tomato. p. 1-24. In Razdan, M.K., and A. K. Mattoo, (eds.) *Genetic improvement of Solanaceous crops*. Vol. 2. Tomato. Science Publishers, Enfield, New Hampshire, USA.

DISCUSIÓN GENERAL

La demanda nutrimental de las plantas se modifica según el estado fenológico de las mismas. En el cultivo de tomate, se identificó que, a partir de la aparición de flores (25-30 ddt) disminuye el crecimiento de las raíces y se modifica la capacidad de absorción y traslocación nutrimental, que conlleva a una disminución de la concentración de N, P y K en hojas, tallos y raíces (Bouzo y Domingo, 2012).

Las plantas C3 requieren grandes cantidades de N, debido a que, la Rubisco demanda del 20 al 30 % del N total de la hoja, en comparación con la demanda de la fosfoenolpiruvato carboxilasa (PEPcase) de las plantas C4 que demanda del 12 a 15 % del N de la hoja.

Las plantas requieren cantidades adecuadas, y no excesivas de nutrientes para lograr un adecuado crecimiento y desarrollo. La concentración “óptima” de N en los diferentes órganos de la planta de tomate depende de la edad de la misma, y son muy variables (Cuadro 18). Las plantas de tomate pueden considerarse en estado deficiente de N cuando las hojas presentan menos de 2.0 %. La disposición baja de N en la solución del suelo o menor capacidad de absorción de las raíces afecta de manera negativa la producción de las plantas y la competitividad ecológica. Las plantas con deficiencia de N suelen mostrar menor AF (hojas pequeñas) y hojas cloróticas. Al respecto, con la dosis de 1.2 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻, las plantas produjeron un AF 18 % menor, respecto al AF que generaron las plantas con la dosis de 4.8 mM L⁻¹ de NO₃⁻; sin embargo, presentaron una MSTot similar en términos estadísticos ($p \leq 0.05$) entre las dos dosis (Cuadro 2), además, se observó que a menor suministro de NO₃⁻ (1.2 mM L⁻¹) la fijación de CO₂ aumentó 33 % con respecto a la mayor dosis.

Con bajo suministro de N, las hojas pueden ser de menor tamaño, pero pueden mantener la fijación de CO₂ y el crecimiento de la raíz mediante el transporte de fotoasimilados. Al mismo tiempo, las plantas pueden remobilizar el NO₃⁻, para mantener el metabolismo del N y aumentar la capacidad de absorción de agua y nutrientes de la solución del suelo, pero el desabasto continuo de N, provoca la descomposición de los ácidos nucleicos y proteínas de las hojas (senescencia de la hoja), debido a la desintegración de la Rubisco que conduce a una disminución de la capacidad de fijación de CO₂, inhibiendo finalmente el crecimiento de la planta. Afortunadamente, las plantas han creado estrategias de respuesta ante las variaciones de disponibilidad de N, es decir, presentan

adaptaciones metabólicas y fisiológicas, que dependen de los cambios en la expresión genética, que ocurre en minutos dependiendo de la concentración de NO_3^- , tal es el caso de la FN 367 que produjo similar AF (4949 $\text{cm}^2/\text{planta}$) y Ai (12 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) que el material mejorado genéticamente (Protector) (Cuadro 3).

Cuadro 18. Concentraciones óptimas de nitrógeno, fósforo y potasio en hoja, tallo y fruto en plantas de tomate en condiciones de suficiencia.

Nutrimiento	H	T	F	D	Fecha de muestreo	Fuente
		%				
Nitrógeno	3.9-4.5	1.8-3.0	2.2-3.1	<2.0	55 ddt	Bouzo y Domingo (2012).
	3.3-3.6				45-60 ddt	Rodríguez <i>et al.</i> (1998).
	3.3-3.7					Castellanos (2009).
	1.8-5.0	1.3-2.8	2.18		36 ddt	Parra <i>et al.</i> (2012).
	2.0-2.5				120 ddt	Souri y Dehnavard (2018).
Fósforo	0.4-0.5	0.4-0.7	0.4-0.6	<0.2		Bouzo y Domingo (2012).
	0.5-0.7					Castellanos (2009)
	0.04-0.1	0.1-0.16	0.2		35ddt	Parra <i>et al.</i> (2012).
Potasio	3.5-5.0	5.5-6.0	4.0-4.5	<1.5		Bouzo y Domingo (2012).
	3.5-5.0				45 ddt	Castellanos (2009).
	2.1-3.8	1.8-3.4	2.11		35 ddt	Parra <i>et al.</i> (2012).
	3.5-4.0			<3.5		Hernández <i>et al.</i> (2009).

H = Hoja; T = Tallo; F = Fruto; D = Deficiencia.

La limitación de N conduce a una represión coordinada de los genes involucrados en la fotosíntesis, síntesis de clorofila y de proteínas plastídicas. Algunos cambios morfológicos que desarrollan las plantas, ante la limitación de N, es el desarrollo de un sistema radical más abundante, dado por una vía de señalización que estimula el alargamiento de las raíces laterales.

La absorción de NO_3^- en la raíz esta mediada por dos familias de transportadores, el NRT2 y NRT1, los cuales son transportadores de alta y baja afinidad, y son activados cuando las concentraciones de NO_3^- en la solución del suelo son menores de 100 μM y mayores de 1 mM. Estos transportadores llevan el NO_3^- a través de la membrana plasmática mediado por un sistema

simporte con protones H^+ , que requiere del gasto de ATP para mantener el gradiente de protones en la membrana plasmática (Abouelsaad *et al.*, 2016).

Las plantas presentaron diferentes concentraciones de N en hoja, tallo y raíz entre las dosis, genotipos e interacción dosis×genotipo. A pesar de dichas diferencias, las plantas mostraron similar contenido total de N, lo cual indica cambios genéticos, fisiológicos y metabólicos originados principalmente por el ambiente, que limitan la producción de MS según el genotipo y el grado de déficit de NO_3^- al que esté sometido, al respecto a menor dosis de NO_3^- (1.2 mM L^{-1}) se obtuvo en el tallo un UEN 27 % mayor, mientras que, con el suministro intermedio (2.4 mM L^{-1}), se obtuvo el mayor UEN en hojas y raíces (Cuadro 5). Asimismo, la FN 367 presentó un AF similar a Protector, y dicha FN produjo los mejores valores de MSH y MSTot, debido tal vez a la capacidad de conversión de CO_2 en estructuras carbonadas y compuestos de N en la hoja.

El uso eficiente (UE) de nutrimentos puede tener varios significados en el contexto de la producción de cultivos. En general, el UE es la relación entre la producción de total de biomasa o rendimiento de grano y la entrada de N, sin embargo, se puede dividir en eficiencia de absorción (EA: capacidad de la planta para remover el nutrimento de la solución del suelo) y en eficiencia de utilización del nutrimento (EU: capacidad para usar el nutrimento y generar biomasa o rendimiento de grano). Los cultivos requieren grandes cantidades de N, sin embargo, se estima que el UEN es inferior o igual a 50 %, lo que conlleva a pérdidas de N que perjudican negativamente el suelo y agua. En consecuencia, el fitomejoramiento destinado al desarrollo de nuevos genotipos con mejor eficiencia (procesos fisiológicos que afectan la absorción de N de la solución del suelo, la traslocación, asimilación y redistribución de N) en el uso de N son prioritarios, por lo que identificar materiales vegetales que crezcan y rindan en ambientes con baja disponibilidad de N son necesarios para un resultado exitoso en la agricultura. Las FN de tomate se adaptan a suelos que presentan baja disposición de nutrimentos, y cuando se emplean en la producción intensiva no presentan los mejores rendimientos de fruto, comparado con las plantas mejoradas genéticamente. Al respecto, las FN presentaron menor AF, MSH, MST y MSR, pero concentraciones superiores de N en hoja, tallo y raíz, respecto a Protector, lo cual las hace candidatas a mejoramiento genético, por presentar los mecanismos necesarios para absorber el NO_3^- .

En el ensayo de N, las plantas de los tratamientos con 1.2, 2.4 y 4.8 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻ producirán 1000 g de materia seca cuando almacenen 9.0, 8.2 y 10.3 g de N-NO₃⁻ en el tejido, mientras que, en los ensayos de fósforo y potasio, las plantas generaran la misma cantidad de materia seca con las dosis de 0.1, 0.2 y 0.4 mM L⁻¹ de P y 0.7, 1.4 y 2.8 mM L⁻¹ de K, cuando acumulen 1.5, 1.2 y 0.9 g de P, y 2.3, 1.8 y 1.2 g de K respectivamente, lo anterior al considerar una distribución y producción similar de materia seca a la obtenida en cada estudio. En el ensayo de N se puede inferir, que con las dosis de 1.2 y 2.4 de N-NO₃⁻ se puede ahorrar 13.4 y 20.3 % del N-NO₃⁻ aplicado, con respecto a la dosis de 4.8 mM L⁻¹ para producir la misma cantidad de MS. Sin embargo, en los ensayos de P y K, se obtuvo que, a mayor suministro de estos nutrientes, menor será la cantidad que se necesita aplicar, para que las plantas produzcan 1000 g de MS.

En cuanto a los genotipos del ensayo de N, se obtuvo que, Protector puede producir con 8.1 g de N-NO₃⁻, 1000 g de MS, mientras que, los demás genotipos necesitaran en promedio 9.3 g, es decir tendrán que acumular 13.5 % más N. La tendencia a generar más MS se mantuvo en el experimento de P, donde Protector puede generar 1000 g de MS con 0.95 g de P en el tejido, mientras que, las familias nativas de tomate necesitaran acumular en el tejido vegetal en promedio 1.3 g de P (27 % más P), para producir la misma cantidad de MS. Sin embargo, en el ensayo de K las familias nativas producirán 1000 g de MS, cuando acumulen en promedio 1.5 g de K, pero Protector necesitará acumular 44.5 % más K en el tejido, para producir la misma cantidad de MS.

Los resultados de la interacción dosis×genotipo para el uso eficiente de nitrógeno, fósforo y potasio (Figura 10), indica que, para que una planta de tomate genere 1000 g de MS, está necesita acumular entre 0.8-2.2 g de P y de 7.5-11.0 g de N-NO₃⁻ (Figura 10-A), y de 0.9-4.5 g de K y de 7.5-11.0 g de N-NO₃⁻ (Figura 10-B), mientras que, para obtener la misma cantidad de MS los genotipos necesitaran acumular mínimo y máximo; 0.8-2.2 g de P y de 0.8-4.5 g de K (Figura 10-C). Asimismo, se puede observar que, las FN de tomate crecidas en 2.4 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻ en la SNS, producen 1000 g de MS con menos fertilizante nitrogenado y fosfatado, con respecto a las plantas que se abastecieron con 4.8 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻ (Figura 10-A). Por otra parte se puede observar que algunos materiales necesitan acumular en el tejido mayor cantidad de N (11 g), pero menor contenido de K (0.9 g), como la FN-300 que se fertilizó con 4.8 mM L⁻¹ de N-NO₃⁻ y con 2.8 mM L⁻¹ de K⁺ para producir 1 kg de MS, y otros materiales como la FN-367 fertilizada con 2.4

mM L⁻¹ de N-NO₃⁻ y con 1.4 mM L⁻¹ de K⁺ respectivamente, necesita acumular menor cantidad de N (8.7 g) y K (1.0 g) para producir la misma cantidad de MS (Figura 10-B).

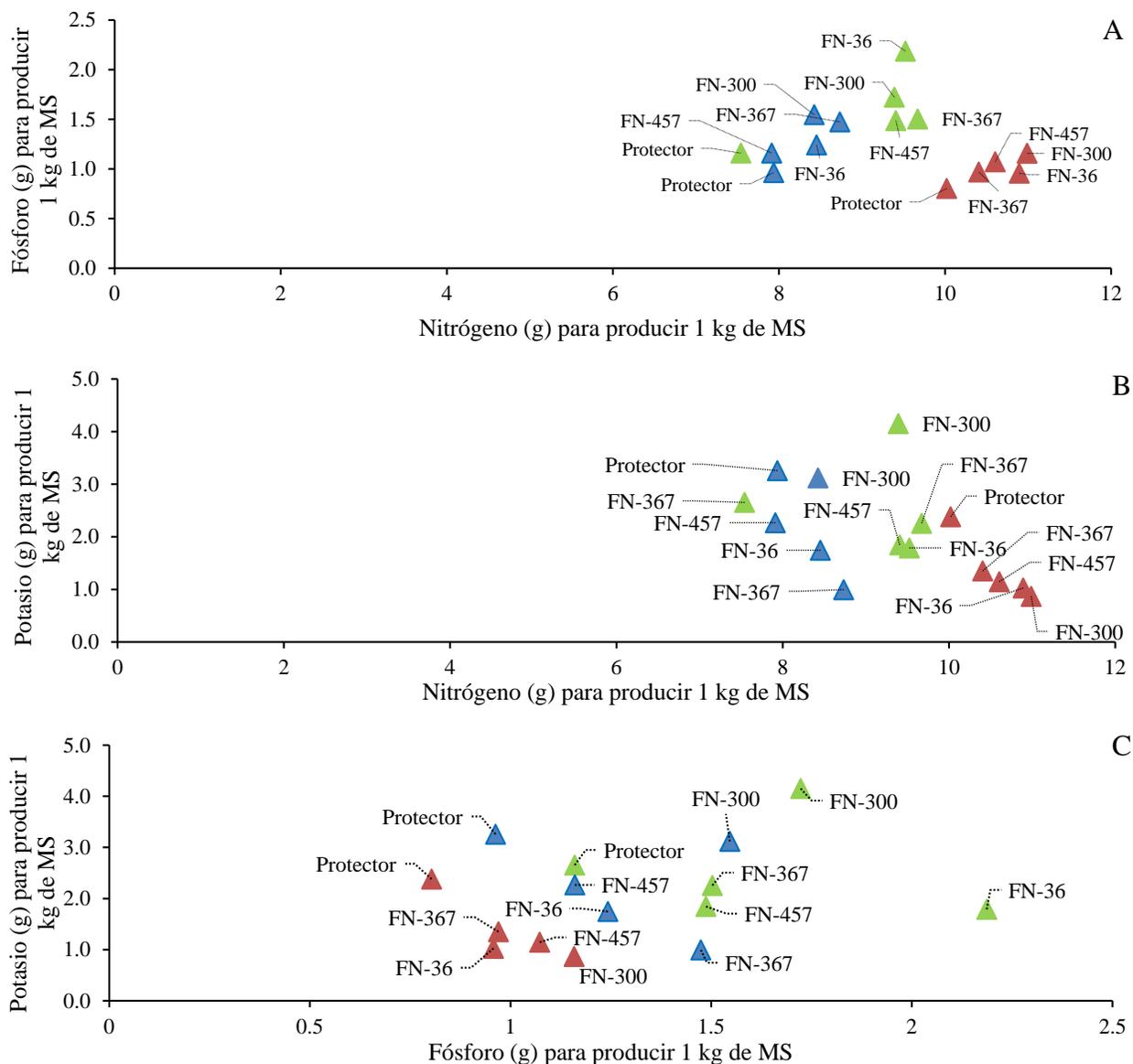


Figura 10. Relación del fertilizante fosfatado/nitrogenado (g) (A), potásico/nitrogenado (B) y fosfatado/potásico (C), para obtener 1 kg de materia seca en familias nativas de tomate. Marcadores de color verde, azul y rojo en A, indican suministro de N y P bajo (1.2 y 0.1 mM L⁻¹), medio (2.4 y 0.2 mM L⁻¹) y alto (4.8 y 0.4 mM L⁻¹), en B, indican suministro de N y K bajo (1.2 y 0.7 mM L⁻¹), medio (2.4 y 1.4 mM L⁻¹) y alto (4.8 y 2.8 mM L⁻¹), y en C, indican suministro de P y K bajo (0.1 y 0.7 mM L⁻¹), medio (0.2 y 1.4 mM L⁻¹) y alto (0.4 y 2.8 mM L⁻¹).

El P y K fueron los nutrientes que menos acumulan las plantas de tomate, con respecto al N, para producir 1 kg de MS; al respecto, la FN-300 que se fertilizó con 0.4 mM L^{-1} de P y con 2.8 mM L^{-1} de K produce con 0.9 y 1.2 g de P y K en el tejido 1 kg de MS, pero la misma FN fertilizada con 0.1 mM L^{-1} de P y con 0.7 mM L^{-1} de K necesitará acumular 1.7 y 4.2 g de estos nutrientes en el tejido para generar la misma cantidad de MS (Figura 10-C).

El P, a diferencia del N no se reduce en las plantas, sino que se mantiene en su forma oxidada más alta. Después de la absorción (principalmente como H_2PO_4^-), el fosfato puede permanecer como fosfato inorgánico (Pi), esterificarse por medio de un grupo hidroxilo a una cadena de carbono (C-O-P), o unirse a otro fosfato por el enlace pirofosfato rico en energía como el ATP. El Pi captado por las raíces se incorpora en cuestión de pocos minutos en fósforo orgánico, pero puede liberarse nuevamente como Pi en el xilema.

Las hojas de las plantas con deficiencia de P, presentan el Pi en el citosol y cloroplastos, es decir, en el conjunto metabólico. En las hojas la concentración total de P puede variar en un factor de 20 sin afectar la fijación de CO_2 , debido a que la concentración de Pi en el citosol está regulada por la homeostasis de fosfato, donde el Pi de la vacuola actúa como amortiguador. En consecuencia, la fotosíntesis y el reparto de carbono se ven afectadas por la concentración de Pi del estroma y cloroplastos, y por su distribución entre cloroplastos y citosol. Para una fijación de CO_2 máxima y mínima se necesita una concentración de Pi en los cloroplastos de 2.0 a 2.5 mM, y de 1.4 a 1.9 mM respectivamente. Durante la fijación de CO_2 , el ciclo de Calvin requiere de 5/6 de los productos de carboxilación, para generar la ribulosa bifosfato (RuBP, aceptor del CO_2). Sin embargo, una exportación excesiva de triosas fosfato inducida por la alta concentración de Pi en el citosol, conduce al agotamiento de estos metabolitos, por consecuencia se acumulan grandes cantidades de almidón en los cloroplastos (característica típica de la deficiencia de P), en cambio al emplear a las triosas fosfato para la síntesis de almidón se disminuye la actividad del ciclo de Calvin (menor fijación de CO_2) y se limita la formación de la RuBP.

Se considera que las plantas en etapa vegetativa crecen y se desarrollan de manera “óptima” cuando presentan una concentración de P mayor de 0.2 % en la hoja y de 0.4 a 0.7 % en el tallo (Cuadro 18), sin embargo, algunas plantas evolucionan en suelos deficientes de P, y presentan concentraciones de P similares a las de una planta que se abasteció continuamente con este

nutrimento, pero desarrollan menor AF, MSH, MST y MSR, así como menor contenido de clorofila y crecimiento de raíz debido a la falta de división celular.

La menor AF causada por el déficit de P, se debe a la menor conductividad hidráulica (transporte principalmente de agua y nutrimentos por los vasos del xilema) de la raíz, causada por la disminución del área o grosor de los vasos del xilema, por la modificación del sistema morfológico de la raíz, debido a la falta de expresión de genes que codifican las acuaporinas o por el menor transporte de P desde las raíces a la parte aérea, sin embargo, las raíces pueden seguir creciendo, con adaptaciones morfológicas, como la producción de aerénquima. La respuesta adaptativa de las plantas sometidas al déficit de P es amplia, con cambios en la tasa de crecimiento aéreo, senescencia prematura de hojas e inhibición o retraso de la formación de órganos reproductivos (menor número de flores y semillas). Sin embargo, dicho comportamiento no se observó en los genotipos evaluados en el ensayo de P, donde Protector generó con la menor (0.1 mM L^{-1}) y mayor dosis de P (0.4 mM L^{-1}) la mayor AF ($4253 \text{ cm}^2/\text{planta}$), pero la misma relación de materia seca aérea (MSH + MST) y materia seca de raíz (5.4), que las FN (5.1), lo cual indica que para producir más MS aérea, las plantas necesitan incrementar en la misma proporción la cantidad de MSR, para mantener el área fotosintéticamente activa, y que esta, distribuya y almacene los nutrimentos y fotoasimilados para un óptimo crecimiento.

La fertilización con K, se relaciona con el aumento del rendimiento en los cultivos. Después del N, el K es el nutrimento requerido en mayor cantidad por las plantas. Cuando el K se encuentra en cantidades deficientes el crecimiento de las plantas se retrasa, y se incrementa su acumulación en hojas maduras y tallos, y en condiciones de deficiencia severa las hojas se pueden tornar amarillas y necróticas, y dependiendo de la intensidad de luz a la cual están expuestas las hojas, los haces vasculares se pueden lignificar. Sin embargo, en el ensayo de K, las plantas fertilizadas con 0.7 mM L^{-1} , no mostraron un incremento en la concentración de K en la hoja (1.9 %), con respecto al de las plantas que crecieron en la dosis de 2.8 mM L^{-1} (1.6 %), pero se observó que a menor suministro de K las plantas produjeron mayor AF (11 %). Asimismo, con la menor dosis de K, se incrementó la MST sin observarse mayor concentración K en el mismo órgano, y viceversa, las plantas tratadas con 2.8 mM L^{-1} , generaron menor MST, pero presentaron mayor concentración de K.

La concentración de K se ubica en 100 mM en el citosol y en 200 mM en los cloroplastos. Este nutrimento es importante para las funciones metabólicas y no se puede reemplazar por otro catión inorgánico. La concentración de K en la vacuola puede variar de 10 a 200 mM, y puede ser de 500 mM en las células guarda de los estomas. La función del K es la expansión y los procesos de turgencia celular (esta última función se puede reemplazar parcialmente por otros cationes como sodio, magnesio, calcio o por compuestos orgánicos como el azúcar). El K actúa directamente como soluto, cambiando el potencial osmótico de los compartimentos celulares, y por consecuencia, la turgencia.

La deficiencia de K provoca la disminución de la fijación de CO₂ al pasar de 35 a 15 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹, debido al aumento del potencial del agua en la hoja (al pasar de -1.0 a -3.0), y al aumento de la resistencia del estoma al CO₂. Al respecto, las plantas tratadas con 0.7, 1.4 y 2.8 mM L⁻¹ de K, presentaron una fijación de CO₂ de 11.8, 10.9 y 10.4 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ respectivamente. Al disminuir la fijación de CO₂ y la formación de fotoasimilados, se incrementa la producción de electrones que da como resultado la formación de O₂, y estos a su vez especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés), que puede originar la senescencia prematura de las hojas. Sin embargo, lo anterior se puede modificar al incrementar la concentración de CO₂ a 1000 mg L⁻¹ en el ambiente, lo cual estimulará a las hojas y fijaran más de tres veces CO₂.

En plantas C3, la apertura estomática se encuentra relacionada con la degradación de azúcares o almidón, que contribuyen a la rápida osmorregulación de las células guarda, particularmente cuando existe déficit de K en la hoja. Sin embargo, los resultados de concentración de K en las hojas de las FN 36 y 367 que crecieron con 0.7, 1.4 y 2.8 mM L⁻¹ de K, presentaron un valor superior a 2 %, mientras que, en los tallos la concentración de este nutrimento fue superior a 1.8 %, valores similares a los que reporta Parra *et al.* (2012) (Cuadro 18).

Los ensayos de N, P y K permitieron identificar a la FN 457 como la mejor candidata a portainjerto por presentar concentraciones óptimas de N, P y K, además presentó similares valores de UEN en hoja y tallo, UEP en hoja y UEK en hoja y raíz que Protector. Por lo anterior, en el cuarto ensayo, se evaluaron las dosis de 0.5 y 1.0 mM L⁻¹ de P, y los genotipos de tomate Cid, FN 457, Cid/Protector y Cid/FN-457.

Adicionalmente, se identificó que a los 90 ddt la mayor demanda de P independientemente de la dosis de P, fue en orden de frutos>raíz>tallo>hoja, con concentraciones de P de 0.67-0.8 %, 0.54-0.68 %, 0.46-0.66 % y 0.39-0.46 %, asimismo, la baja concentración de P en las hojas (0.39 y 0.46 %) se debe a la demanda del fruto, el cual requiere P para la formación de nuevas estructuras como semillas, que involucra creación y desarrollo de nuevo tejido (división celular). Dicho orden de demanda por los diferentes órganos de la planta se mantuvo en los genotipos evaluados, resultados que coinciden con lo reportado por Betancourt y Pierre (2013) que indican que el P, es el tercer nutriente que más se acumula en los frutos, por detrás del K y N.

En condiciones de suficiencia de P, las plantas pueden desarrollar mayor número de flores, y los frutos pueden ser de mayor peso, consecuencia de un mejor desarrollo de la raíz, que aumenta la capacidad de las plantas a absorber agua y nutrientes. Las plantas injertadas produjeron frutos que presentaron similares características de calidad del fruto, tanto con el injerto y con la FN 457; al respecto, los frutos presentaron similar cantidad de SST (°brix) ($p \leq 0.05$), con valores de 4.8-5.8, y son similares a los que reporta Coutinho *et al.* (2014) con un valor promedio de 4.4 °brix, por lo que la fertilización con P no afecta la calidad de los frutos.

CONCLUSIONES GENERALES

Evaluar la productividad de las plantas cultivadas de manera intensiva y las cultivadas de forma tradicional, así como la calidad del fruto es imprescindible para mejorar el bienestar humano; sin embargo, para lograr tal objetivo es necesario desarrollar sistemas agrícolas sustentables, lo cual se puede lograr al emplear materiales vegetales eficientes en la absorción y uso de nitrógeno, fósforo y potasio.

Al respecto, el crecimiento de las plantas de tomate depende en gran medida de la cantidad que se aplica de fertilizante nitrogenado, fosfatado y potásico; y repercute directamente en la absorción y funcionamiento de la raíz, tallo y hoja. En consecuencia, las tasas de aplicación de los nutrientes son uno de los factores a considerar para seleccionar familias nativas de tomate e incorporarlas a programas de mejoramiento genético, tal como la FN 367, que presentó concentraciones y contenidos de nitrógeno similares o superiores a los de Protector, sin embargo, en cuanto al uso eficiente de nitrógeno, fósforo y potasio, la FN 457 generó la mayor cantidad de materia seca en hoja y tallo por unidad de nutriente en el tejido. Asimismo, se identificó a la FN

457 con potencial para ser usada como portainjerto; debido a que, al ser injertada con el Cid, el material resultante logró incrementar el rendimiento de fruto y preservó las características de calidad del fruto. Por lo anterior, los productores de tomate pueden utilizar a la FN 457 de tomate como portainjerto en condiciones de escasez de fósforo para aumentar el rendimiento.

LITERATURA CITADA

- Abouelsaad, I., D. Weihrauch, and S. Renault.** 2016. Effects of salt stress on the expression of key genes related to nitrogen assimilation and transport in the roots of the cultivated tomato and its wild salt-tolerant relative. *Scientia Horticulturae*. 211: 70-78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2016.08.005>
- Betancourt, P., and F. Pierre.** 2013. Extracción de macronutrientes por el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* Mill. var. Alba) en casas de cultivo en Quíbor, Estado Lara. *Bioagro*. 25: 181-188.
- Bouzo, C. A., y E. D. Astegiano.** 2012. Efectos de diferentes agroecosistemas en la dinámica de nitrógeno, fósforo y potasio en un cultivo de tomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 3: 907-924.
- Castellanos, J. Z.** 2009. Manual de producción de tomate en invernadero. Editorial Intagri, S. C. 477 p.
- Coutinho, E. L. M., V. Orioli J., J. Silva E., A. M. Coutinho N., and S. Cardoso S.** 2014. Nutrición, producción y calidad de frutos de tomate para procesamiento en función de la fertilización con fósforo y potasio. *Agrociencia*. 18: 40-46.
- Hernández, M. I., N. J. Arozarena, y M. Chailloux.** 2009. Rango crítico de nitrógeno y potasio en hojas indicadoras para dos épocas de plantación en el cultivo protegido del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) híbrido HA-3019. *Cultivos Tropicales*. 30: 79-86.
- Parra, T. S. P. Lara M., M. Villarreal R., y S. Hernández V.** 2012. Crecimiento de plantas y rendimiento de tomate en diversas relaciones nitrato/amonio y concentraciones de bicarbonato. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 35: 143-153.
- Rodríguez, M. Ma. N., G. Alcántar G., A. Aguilar S., J. D. Etchevers B., J. A. Santizó R.** 1998. Estimación de la concentración de nitrógeno y clorofila en tomate mediante un medidor portátil de clorofila. *Terra Latinoamericana*. 16: 135-141.
- Souri, M. K., and S. Dehnavard.** 2018. Tomato plant growth, leaf nutrient concentrations and fruit quality under nitrogen foliar applications. *Advances in Horticultural Science*. 32: 41-47.