

## Respuesta del clon mexicano de papa 99-39 a potasio en hidroponía e invernadero

Francisco Xavier Flores Gutiérrez<sup>1</sup>  
Román Flores López<sup>2§</sup>  
Martha Elena Mora Herrera<sup>1</sup>  
Omar Franco Mora<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Programa en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales-Universidad Autónoma del Estado de México-Campus Universitario Centro Universitario Tenancingo. Carretera Tenancingo-Villa Guerrero km 1.5, Santa Ana Ixtlahuatzingo, Tenancingo, Estado de México. CP. 52400. Tel. 01(714) 1407724. (fxfloresg@uaemex.mx; marthaelenam@gmail.com). <sup>2</sup>Sitio Experimental Metepec-INIFAP. Carretera Toluca-Zitácuaro km. 4.5, Vialidad Adolfo López Mateos, Col. San José Barbabosa, Zinacantepec, Estado de México. CP. 51350. Tel 01(55) 38718700, ext. 85638. <sup>3</sup>Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento-Facultad de Ciencias Agrícolas-Universidad Autónoma del Estado de México. Campus Universitario 'El Cerrillo'. El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México. CP. 50200. Tel. 01(722) 2965529. (ofrancom@uaemex.mx).

§Autor para correspondencia: flores.roman@inifap.gob.mx.

### Resumen

Con el propósito de determinar el efecto y la dosis óptima de potasio en la producción de minitubérculos del clon mexicano de papa 99-39, se establecieron experimentos en julio y septiembre de 2015, donde se probaron concentraciones de 0 (testigo absoluto), 150, 250 (testigo comercial), 350, 450 y 550 mg L<sup>-1</sup> en solución nutritiva en sistema hidropónico. Los resultados indicaron que la mayor altura de planta e índice de área foliar se encontraron en los tratamientos de mayor concentración de K. La dosis de 350 mg L<sup>-1</sup> de K produjo 19% más tubérculos de diámetro igual o mayor de 15 mm por planta que el testigo comercial y 194% más que el testigo absoluto. La ecuación de segundo orden ( $R^2=0.94$ ) permitió estimar que la dosis óptima para el clon de papa 99-39 fue de 400 mg L<sup>-1</sup> de potasio, con lo que se puede producir hasta 20.67 minitubérculos por planta. Hubo significancia estadística en la interacción fecha x dosis para producción de tubérculos por planta y para el índice de cosecha, con mayor producción en la siembra de julio que en la época de otoño-invierno; contrariamente, se encontró que el índice de cosecha fue mayor en la época de otoño-invierno. Concentraciones elevadas de potasio durante todo el ciclo de cultivo promovieron la producción de un mayor número de tubérculos.

**Palabras clave:** *Solanum tuberosum*, semilla prebásica, solución nutritiva.

Recibido: junio de 2018

Aceptado: agosto de 2018

## Introducción

La producción de minitubérculos en sistemas de producción de material vegetativo de papa, es una fase intermedia entre la multiplicación rápida *in vitro* y la producción de tubérculo semilla en campo (Struik y Weirsema, 1999; Struik, 2007), esta práctica se realiza en México bajo diferentes sistemas de producción como la mezcla de sustratos (Flores-López *et al.*, 2014; Patrón-Ibarra, 2014) y la hidroponía (Lommen, 2007; Urrestarazu, 2013; Flores-López *et al.*, 2016) donde el manejo de la nutrición es determinante para el desarrollo de las plantas, la producción y calidad de tubérculos (Corrêa *et al.*, 2009).

El potasio (K) es un elemento esencial en la productividad de las plantas, tiene influencia en la fotosíntesis, contenido de clorofila, estructura del cloroplasto, anatomía foliar (Zhao *et al.*, 2001) y participa en la movilización de asimilados a los órganos de reserva; este es el nutriente que la papa requiere en mayor cantidad (Perrenoud, 1993), teniendo una función esencial en la translocación y almacenamiento de asimilados ya que la movilización de azúcares a los tubérculos permite obtener una alta producción y calidad, de acuerdo con Wibowo *et al.* (2014); Marschner (1995); Westermann *et al.* (1994). La formación de tubérculos se caracteriza por un cambio en el transporte apoplástico a simplástico de asimilados en la región subapical del estolón en desarrollo (Viola *et al.*, 2001) y los factores que influyen en la tuberización son el balance nutrimental, el genotipo, la temperatura y el fotoperíodo (Struik y Wiersema, 1999; Fernie y Willmitzer, 2001).

Por otro lado, el potasio actúa en la tolerancia a enfermedades, así como en la respuesta a diferentes tipos de estrés, entre ellos sequía, salinidad, frío y algunas plagas (Velasco, 1999; Cooke y Little, 2001; Wang *et al.*, 2013); asimismo, existen reportes de incrementos de contenido de proteína en papas fertilizadas con potasio (Manolov *et al.*, 2016) aunque, las variedades de papa responden de manera diferencial a la aplicación de este nutriente (Muro *et al.*, 1997; Rolot y Seutin, 1999; Corrêa *et al.*, 2009; Chang *et al.*, 2011) por lo que la cantidad de K usado en las soluciones nutritivas para hidroponía en el cultivo de papa ha sido variable, algunos estudios señalan que en el uso de concentraciones de entre 239 a 295 mg L<sup>-1</sup> K, las respuestas fueron diferentes entre las variedades Monalisa y Ágata (Corrêa *et al.*, 2009). Por otra parte, se encontró efecto varietal a dosis de 3.75 mEq L<sup>-1</sup> de K (146 mg L<sup>-1</sup>) (Chang *et al.*, 2011), hasta 7.5 mEq L<sup>-1</sup> de K (292.5 mg L<sup>-1</sup>) (Chang *et al.*, 2012), para los cultivares Superior, Atlantic, Jasim, Harycong y Jayong.

En general, el efecto del K en la producción de tubérculos ha sido diferente para las variedades probadas en los estudios señalados, por lo que es importante generar información específica sobre la nutrición y manejo en invernadero para los cultivares generados y utilizados en México, existen pocos resultados de investigación sobre el manejo hidropónico, la nutrición y la respuesta varietal de las papas en invernadero. Flores-López *et al.* (2009), emplearon concentraciones de 250 mg L<sup>-1</sup> que resultaron convenientes para la producción de minitubérculos en la variedad Gigant; aunque en otros trabajos (Flores-López *et al.*, 2016) con el clon de papa mexicano 020342.1, encontraron que los mejores rendimientos de tubérculos se obtuvieron con dosis de 350 a 400 mg L<sup>-1</sup>. La información hasta ahora obtenida indica que cada variedad o clon requiere de condiciones muy específicas de nutrición con potasio en la producción de minitubérculos, por lo que el objetivo de este trabajo fue determinar el efecto del potasio y la dosis óptima en el rendimiento de minitubérculos del clon avanzado de papa 99-39, obtenido por el INIFAP, en hidroponía bajo condiciones de invernadero.

## Materiales y métodos

Se establecieron experimentos en dos fechas 23 de julio (fecha 1) y el 10 de septiembre (fecha 2) de 2015, en las instalaciones del Sitio Experimental Metepec del INIFAP, ubicadas en el Municipio de Zinacantepec, Estado de México, México, con una referencia geográfica de 19° 17' 28'' de latitud norte y a los 99° 42' 51'' de longitud oeste; a una altitud de 2 726 m (SMN, 2016) y clima templado subhúmedo con lluvias en verano e invierno marcado, la precipitación anual es entre 800 y 1 000 mm y temperatura media anual de 13 °C de acuerdo con INEGI (2009).

Los experimentos se sembraron de forma similar, en invernadero; la temperatura fue registrada con un termómetro Data logger HANNA modelo HII4ICH CE IP67<sup>®</sup>, en el período julio-octubre (fecha 1) la temperatura media fue de 19 °C, con una máxima de 47 °C y mínima de 9 °C, en tanto que entre septiembre y diciembre (fecha 2) la temperatura media fue de 16 °C, la máxima de 38 °C y la mínima de 6 °C. Se utilizaron minitubérculos de 15 a 18 mm de diámetro, libres de patógenos del clon avanzado de papa 99-39 como material vegetativo. Este genotipo es de ciclo intermedio a tardío, con cutícula y pulpa de color blanco, ojos superficiales, forma oblonga, susceptible al tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans* Mont. de Bary) y con un potencial de rendimiento superior a 80 t ha<sup>-1</sup>. Se usaron macetas de 1.8 L, para una densidad de 36 plantas m<sup>-2</sup>, en condiciones de hidroponía, con perlita grado hortícola como sustrato inerte, se sembró un minitubérculo en cada maceta, a 10 cm de profundidad.

Las soluciones empleadas tuvieron las siguientes concentraciones de nutrimentos en mg L<sup>-1</sup>: N= 200, P= 80, Ca= 100, Mg= 75, más microelementos, además de las concentraciones de potasio a evaluar. El pH de la solución se mantuvo entre 5.5 y 6 con ácido sulfúrico 98%. Durante el desarrollo del cultivo se aplicaron fungicidas e insecticidas para el control preventivo de plagas y enfermedades, considerando lo señalado por Flores-López *et al.* (2009).

Los experimentos se establecieron bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, los tratamientos de potasio evaluados fueron: 0 (testigo absoluto), 150, 250, 350, 450 y 550 mg L<sup>-1</sup>, donde 250 mg K L<sup>-1</sup> se consideró como testigo comercial (Flores-López *et al.*, 2009). La parcela experimental consistió de 16 macetas, de las que se muestrearon al azar 10, mismas que constituyeron la parcela útil. Las dos fechas de cultivo se analizaron como serie de experimentos, de acuerdo con el procedimiento señalado por Martínez-Garza (1996), cuando la prueba de F del análisis de varianza mostró diferencias estadísticas se aplicó la prueba de Tukey.

A la cosecha se evaluó el número de tubérculos menores de 15 mm y mayores o iguales de 15 mm de diámetro (Flores-López *et al.*, 2014), número y peso fresco total de tubérculos por planta. El peso seco total fue la suma del peso seco de hojas, tallos, estolones, raíces y tubérculos y el índice de cosecha (IC) fue la relación entre peso seco de tubérculos sobre el peso seco total (Flores-López *et al.*, 2009). Además, se evaluó el índice de verdor (SPAD), con un SPAD-502 Konika Minolta<sup>®</sup>, el índice de área foliar (IAF) se determinó con un Ceptómetro Lineal modelo LP-80AccuPAR<sup>®</sup>, la altura de planta (AP), se midió desde la base del tallo hasta el punto de crecimiento de mayor altura. Estas tres variables se evaluaron a los 40, 55, 70, 85 y 100 días después de la emergencia (DDE). El análisis de varianza, comparación de promedios por Tukey ( $p < 0.05$ ) y coeficientes de correlación de Pearson se realizaron con el Software Estadístico InfoStat, Di Rienzo *et al.* (2015).

## Resultados y discusión

### Altura de planta

La comparación de promedios de las dos fechas de cultivo, para la variable altura de planta se presenta en el Cuadro 1, el análisis de varianza mostró diferencias estadísticas ( $p \leq 0.01$ ) en las cinco fechas evaluadas durante el ciclo de cultivo del clon avanzado de papa 99-39. En general, el testigo absoluto (0 mg L<sup>-1</sup>) tuvo la menor altura; incluso a los 100 días después de la emergencia las plantas tuvieron menor longitud que a los 70 y 85 DDE, debido a que se promediaron los dos ciclos y en septiembre a diciembre las plantas fueron de menor altura. Es notable que entre 250 y 550 mg L<sup>-1</sup> K, la longitud del tallo fue superior al testigo absoluto; a los 40 días después de emergencia las plantas sin potasio midieron 10 cm menos que el tratamiento con mayor concentración, a los 55 DDE el testigo absoluto midió 18 cm menos que el tratamiento 550 mg L<sup>-1</sup> K, a los 70 DDE la diferencia fue de 24 cm, a los 85 DDE esa medida fue de 26 cm y al final del ciclo el testigo absoluto tuvo plantas con 22 cm de altura contra 54 cm del tratamiento 550 mg L<sup>-1</sup>, el testigo comercial (250 mg L<sup>-1</sup> K) no mostró diferencias significativas con los tratamientos de mayor concentración. Para el clon 99-39 el potasio fue un factor determinante en la altura de las plantas, el tratamiento sin potasio mostró las plantas de menor altura y es coincidente con lo señalado por Beukema y Van der Zaag (1990) en el sentido de que la falta de potasio provoca enanismo en las plantas de papa.

**Cuadro 1. Efecto del potasio en hidroponía e invernadero sobre la altura de planta, el índice de área foliar y los valores SPAD de plantas del clon de papa 99-39 en evaluaciones hachas a los 40, 55, 70, 85 y 100 días después de la emergencia (DDE).**

Variable	Tratamiento (mg L <sup>-1</sup> K)	DDE				
		40	55	70	85	100
Altura de planta (cm)	0	12.4 e *	18.6 d	27.9 d	29.3 e	22.3 d
	150	17.3 d	29 c	37.8 c	43.6 d	44.4 c
	250	18.9 cd	32.1 b	41.3 bc	48.1 cd	49.5 ab
	350	19.8 bc	35.5 a	44.3 b	50.8 bc	48.3 bc
	450	21.4 ab	35.4 a	49.4 a	55.9 a	51.3 ab
	550	22.4 a	36.8 a	51.9 a	55.1 ab	54.4 a
Índice de área foliar	0	0.77 b	1.83 c	2.71 c	3.57 b	2.9 c
	150	1.45 a	2.64 ab	3.48 b	3.81 b	4.25 b
	250	1.48 a	2.56 b	3.93 a	4.66 a	4.78 ab
	350	1.54 a	2.9 ab	3.94 a	4.96 a	5.27 a
	450	1.61 a	2.83 ab	3.83 ab	4.78 a	4.55 b
	550	1.61 a	2.98 a	3.82 ab	4.8 a	4.72 ab
Valores SPAD	0	54.2 a	61 a	61.1 a	63.4 a	63.3 a
	150	44.1 b	48.6 b	46.3 b	47.5 b	48.1 bc
	250	46.7 b	48.8 b	48.1 b	47.2 b	48.1 bc
	350	45.6 b	47.2 b	47.6 b	47.4 b	48.8 bc
	450	45.7 b	50.4 b	47.1 b	46.6b	49.7 b
	550	44.3 b	50.4 b	48.5 b	46.2 b	46.5 c

\*= valores con la misma letra en orden vertical no difieren estadísticamente, según la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

## Índice de área foliar

La prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ), resultado del análisis de varianza combinado para las dos fechas evaluadas, julio a octubre y septiembre a diciembre de 2015, mostró diferencias significativas para dosis de K en la variable IAF a los 40, 55, 70, 85 y 100 DDE, siendo el testigo absoluto el de promedio significativamente menor de IAF con valores de 0.77, 1.83, 2.12, 3.6 y 2.9, respectivamente; mientras que en la dosis 550 mg L<sup>-1</sup> de K se presentaron valores de 1.61, 2.98, 3.82, 4.80 y 4.72, respectivamente en las fechas señaladas (Cuadro 1). El IAF de las plantas con 250 mg L<sup>-1</sup> o más, se comportaron de forma similar y el crecimiento del dosel de las plantas se redujo significativamente en ausencia de potasio en todas las mediciones hechas a través del ciclo de cultivo; en parte por el efecto en el crecimiento de las plantas sin este elemento y posiblemente también por la presencia de tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans*) en las plantas sin potasio, lo cual ocurrió en la época húmeda del año (julio a octubre), lo anterior coincide con lo mencionado por Velasco (1999); Wang *et al.* (2013); Wibowo *et al.* (2014), quienes encontraron un aumento en la sensibilidad de las plantas a las enfermedades cuando se presenta deficiencia de potasio.

## Valores SPAD

En el Cuadro 1 se indican los valores SPAD, los cuales mostraron estadísticamente el mayor promedio para el testigo absoluto (Tukey,  $p \leq 0.05$ ), ello se debió a que las plantas sin potasio mostraron una coloración parda/café y el equipo de medición indicó lecturas altas, mismas que no tienen relación con el verdor de la planta ni con la producción de clorofila. La coloración mostrada por las plantas del testigo absoluto es resultado de la falta de potasio, como lo indican Mulder y Turkensteen (2005), quienes mencionan la presencia de necrosis en la lámina foliar y coloración café como síntomas característicos de la falta de potasio en los folíolos de las plantas de papa.

## Producción de tubérculos por planta

Tubérculos menores a 15 mm de diámetro. El análisis de varianza combinado de los dos ciclos de cultivo (Cuadro 2) para número de tubérculos menores de 15 mm de diámetro indicó diferencias altamente significativas para dosis. Las concentraciones 350, 450 y 550 mg L<sup>-1</sup> de potasio produjeron 10.2, 10 y 9.8 minitubérculos y estos tratamientos fueron superiores (Tukey,  $p \leq 0.05$ ) al testigo absoluto y al tratamiento de 150 mg L<sup>-1</sup> K, mismos que produjeron 4.7 y 5.1 minitubérculos, respectivamente; el testigo comercial no difirió estadísticamente del resto de los tratamientos con potasio para esta variable; lo anterior, posiblemente debido a la mayor disponibilidad de asimilados durante la etapa de tuberización en los tratamientos de altas concentraciones de potasio en la formación y llenado de tubérculos, que implica la participación de diversos procesos fisiológicos y de transporte de asimilados de la parte aérea de la planta hacia los estolones y que, a mayor disponibilidad de asimilados habrá más tubérculos (Minhas *et al.*, 2004); asimismo, se explica también por la presencia de más de un ciclo de parición de tubérculos, con la consecuente producción de minitubérculos de menor diámetro en los tratamientos con mayores dosis de potasio; lo que puede deberse a que la formación de los tubérculos de mayor tamaño se originan en estolones primarios, mientras que los pequeños son resultado de estolones secundarios del mismo tallo principal (Akira *et al.*, 2015).

Tubérculos iguales o mayores de 15 mm de diámetro. En cuanto al número de tubérculos  $\geq 15$  mm de diámetro, los tratamientos 250, 450 y 550 mg L<sup>-1</sup> de K produjeron 18.6, 21.7 y 17.9 por planta, respectivamente y resultaron estadísticamente iguales; en tanto que el tratamiento con 350 mg L<sup>-1</sup> de K rindió significativamente más tubérculos (22.1) que el testigo comercial con 18.6 tubérculos por planta. Los tratamientos de 0 y 150 mg L<sup>-1</sup> de K produjeron 7.5 y 13.1 tubérculos, respectivamente (Cuadro 2).

**Cuadro 2. Respuesta en productividad del clon de papa 99-39 a la nutrición con potasio en sistema hidropónico e invernadero.**

Variable	Dosis (mg L <sup>-1</sup> K)						CV (%)
	0	150	250	350	450	550	
Núm. de tubérculos < 15 mm	4.7 ±1.2 <sup>*b</sup>	5.1 ±0.7 <sup>b</sup>	7.5 ±0.9 <sup>ab</sup>	10.2 ±1 <sup>a</sup>	10 ±1 <sup>a</sup>	9.8 ±1.1 <sup>a</sup>	33.1
Núm. de tubérculos $\geq$ 15 mm	7.5 ±0.4 <sup>d</sup>	13.1 ±1.3 <sup>c</sup>	18.6 ±2.7 <sup>b</sup>	22.1 ±2.5 <sup>a</sup>	21.7 ±1.3 <sup>ab</sup>	17.9 ±1.4 <sup>ab</sup>	16.4
Núm. de tubérculos totales	12.2 ±1.3 <sup>d</sup>	18.2 ±1 <sup>c</sup>	26.1 ±2.7 <sup>b</sup>	32.3 ±2.3 <sup>a</sup>	31.7 ±2 <sup>a</sup>	27.7 ±1.5 <sup>ab</sup>	14.2
Peso fresco (g) tubérculos	102 ±6.4 <sup>c</sup>	210 ±21.9 <sup>b</sup>	306 ±31.4 <sup>a</sup>	341 ±21.2 <sup>a</sup>	320 ±19.7 <sup>a</sup>	301 ±22.7 <sup>a</sup>	15.7
Peso seco (g) tubérculos	17.4 ±1.1 <sup>c</sup>	29.7 ±2.8 <sup>b</sup>	41.4 ±4 <sup>a</sup>	5.9 ±2.8 <sup>a</sup>	43.2 ±1.8 <sup>a</sup>	39.6 ±1.7 <sup>a</sup>	15.8
Peso seco (g) total de planta	23.1 ±1.6 <sup>c</sup>	41 ±3.8 <sup>b</sup>	54.1 ±4.7 <sup>a</sup>	58.7 ±4.2 <sup>a</sup>	55.3 ±2.6 <sup>a</sup>	50.7 ±2.3 <sup>ab</sup>	14.7
Índice de cosecha	0.76 ±0.01 <sup>ab</sup>	0.75 ±0.01 <sup>b</sup>	0.79 ±0.01 <sup>a</sup>	0.79 ±0.01 <sup>a</sup>	0.78 ±0.01 <sup>ab</sup>	0.78 ±0.01 <sup>ab</sup>	2.8

Valores promedio de dos ciclos de cultivo  $\pm$  error estándar. \* = valores con distinta letra son estadísticamente diferentes  $p < 0.05$ , de acuerdo con la prueba de Tukey. CV (%) = coeficiente de variación.

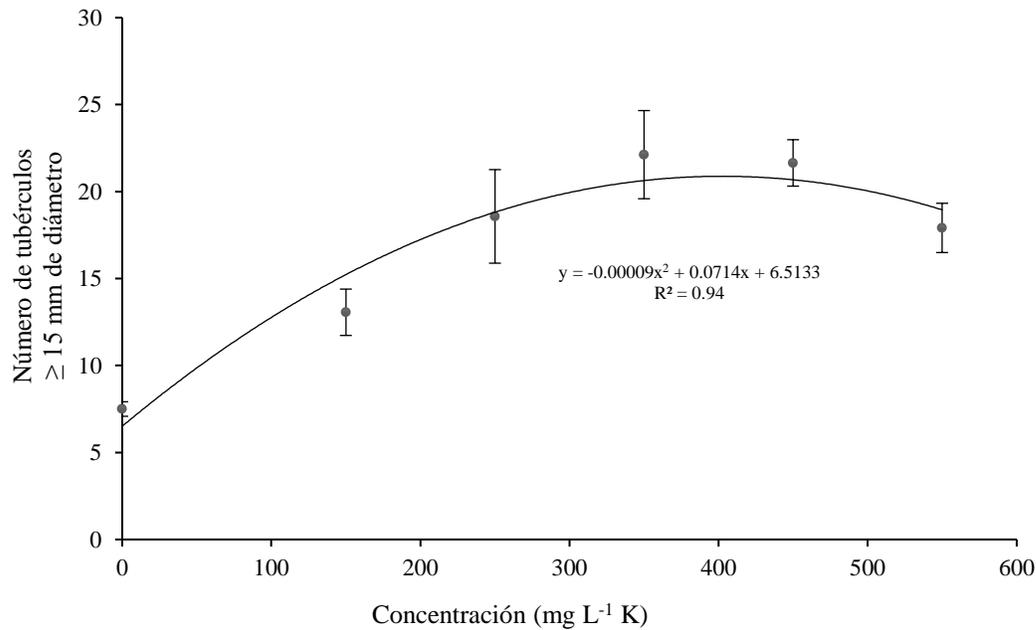
La dosis de 350 mg L<sup>-1</sup> de K produjo 194% más tubérculos que el testigo absoluto y 19% más que el testigo comercial. Los resultados encontrados señalan la importancia del potasio en el proceso de llenado de los órganos de reserva en la planta de papa, lo que puede deberse a que el potasio es relevante en el rendimiento, como lo señalan Westermann *et al.* (1994), quienes además mencionan la función de este elemento en el transporte de asimilados a los tubérculos. Por otro lado, en este trabajo el valor del coeficiente de correlación de Pearson entre el índice de área foliar y la producción de tubérculos  $\geq 15$  mm de diámetro fue positivo y altamente significativo  $r = 0.70$ , lo que podría explicarse por el rápido crecimiento de la cobertura foliar en las plantas con altas dosis de potasio, especialmente en las primeras etapas del cultivo, aspecto que concuerda con lo señalado por Aguilar *et al.* (2006); Mora-Aguilar *et al.* (2006) quienes hallaron que en las primeras etapas del desarrollo de la papa el área foliar creció de forma exponencial, en tanto que la acumulación de biomasa en los tubérculos se incrementó a partir del inicio de la tuberización.

Número de tubérculos totales. Esta variable es resultado de la suma de los tubérculos de todos los tamaños, para este caso, las concentraciones de 350, 450, y 550, con 32.3, 31.7 y 27.7 tubérculos por planta, respectivamente, fueron estadísticamente diferentes a las concentraciones de 0 y 150 mg L<sup>-1</sup> de K, con 12.2 y 18.2 tubérculos por planta, respectivamente (Cuadro 2), mientras el testigo comercial produjo en promedio 26.1 tubérculos por planta, superado por las concentraciones de 350 y 450 mg L<sup>-1</sup> de K, e igual que la dosis 550 mg L<sup>-1</sup>; sin embargo, superó significativamente a las dosis de 0 y 150 mg L<sup>-1</sup>. Este bajo número de tubérculos por planta en los tratamientos con menor potasio puede deberse a lo mencionado por Viola *et al.* (2001), quienes afirman que la competencia por asimilados al iniciarse la diferenciación puede ocasionar aborto de tubérculos.

La dosis de 350 mg L<sup>-1</sup> de K produjo 163% más tubérculos que el testigo absoluto y 20% más que el testigo comercial. La mayor cantidad de minitubérculos en los tratamientos con altas concentraciones de potasio se debe probablemente a la mayor disposición de azúcares en el momento de tuberización, como lo señala Xu *et al.* (1998). Por otro lado, algunos autores (Struik y Wiersema, 1999) indican que los tubérculos útiles deberían pesar entre 0.1 y 10 g con un diámetro de 5 a 25 mm.

En México se emplean minitubérculos  $\geq 15$  mm para la siembra de la primera generación en campo y los menores de ese diámetro pueden utilizarse en invernadero; necesitando de entre 60 a 80 mil unidades por hectárea (Flores-López *et al.*, 2014). Considerando una superficie de un metro cuadrado sembrada con el clon 99-39, las dosis entre 350 y 450 mg L<sup>-1</sup> de K inducirían en una producción estimada de 880 tubérculos  $\geq 15$  mm de diámetro más 225 menores de 15 mm, para un total de 1 105 tubérculos en dicha superficie útil; cantidad mayor a la reportada por Flores-López *et al.* (2009), quienes obtuvieron 470 tubérculos con la variedad Gigant y también superior a 802 minitubérculos m<sup>-2</sup> en la variedad Zorba, obtenidos por Farran y Mingo-Castell (2006) en cultivo sin suelo, ello demuestra la alta productividad del clon 99-39 en hidroponía e invernadero.

Determinación de la dosis óptima de potasio. Para los tubérculos  $\geq 15$  mm de diámetro se estimó la dosis óptima de potasio mediante el uso de una regresión, donde la curva de tendencia se ajustó a una ecuación de segundo orden con una R<sup>2</sup>= 0.94 (Figura 1), que al aplicarla arrojó una concentración óptima de 400 mg L<sup>-1</sup> de K para la producción de 20.67 minitubérculos  $\geq 15$  mm de diámetro por planta; lo que equivale a 827 tubérculos por m<sup>2</sup> y a 827 mil tubérculos en 1 000 m<sup>2</sup> de superficie útil de invernadero, cantidad suficiente para sembrar más de 10 hectáreas en primera generación de campo. Patrón-Ibarra (2014) reportó para las variedades Alpha y Atlantic rendimientos máximos de 9.5 y 5.8 tubérculos por planta, respectivamente, en sistemas de producción de semilla de categoría prebásica II en México; lo que indica, además, la diferente respuesta varietal en la producción de minitubérculos.

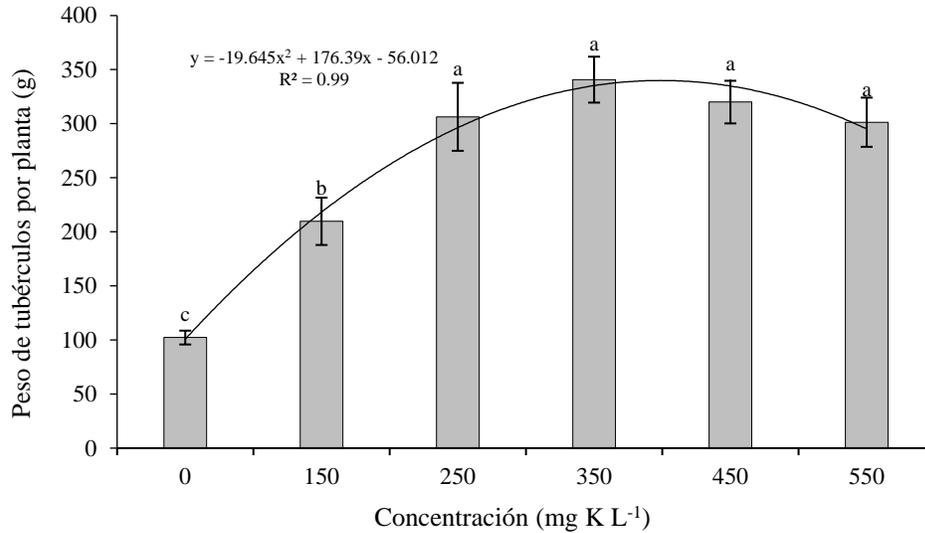


**Figura 1. Curva de regresión lineal de segundo grado para la estimación de la concentración óptima de potasio para la producción de minitubérculos por planta del clon de papa 99-39, con diámetro  $\geq 15$  mm. Valores promedio  $\pm$  error estándar.**

### Peso fresco de tubérculos

Las dosis de 250 a 550 mg L<sup>-1</sup> indujeron significativamente mayor peso fresco de tubérculos que los tratamientos de 150 mg L<sup>-1</sup> y el testigo absoluto (Cuadro 2), el rendimiento de papa del clon 99-39 fue de 306, 431, 320 y 301 gramos por planta, en las dosis de 250, 350, 450 y 550 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente, mientras que con 150 mg L<sup>-1</sup> y con el testigo absoluto, la producción fue de 210 y 102 gramos promedio por planta; lo anterior indica que posiblemente el potasio tuvo marcada influencia en el llenado de tubérculos y en la movilización de asimilados; es decir, en el rendimiento, tal y como lo señalan Westermann *et al.* (1994); Beukema y Van der Zaag (1990), este elemento es indispensable en la producción de mayores rendimientos en la planta de papa.

En la Figura 2 se muestra la respuesta en el rendimiento del genotipo 99-39 a la aplicación de potasio en la solución nutritiva en hidroponía e invernadero, la curva se ajustó a una ecuación de regresión de segundo orden con una  $R^2 = 0.99$ , lo que permite señalar que dosis elevadas de potasio incrementan el peso fresco en los tubérculos por planta. Por otro lado, el valor del coeficiente de correlación de Pearson entre peso fresco y área foliar fue de  $r = 0.8$  y entre el peso fresco y altura de planta fue de  $r = 0.81$ , lo que seguramente tuvo efecto en el rendimiento de las plantas del clon 99-39.



**Figura 2. Efecto del potasio y curva de regresión en el rendimiento de peso fresco de tubérculos por planta del clon de papa 99-39. Promedio  $\pm$  error estándar. Tukey (0.05).**

### Peso seco e índice de cosecha

El peso seco de tubérculos de la planta y el valor del índice de cosecha son mediciones que permiten la estimación de la eficiencia de las plantas en la acumulación de materia seca en los diferentes órganos de la misma, en especial, en las partes de interés antropocéntrico; en este estudio el análisis combinado para peso seco de tubérculos solo mostró diferencias estadísticas entre dosis ( $p \leq 0.01$ ), siendo iguales las concentraciones de 250, 350, 450 y 550 mg L<sup>-1</sup>, con 41.4, 45.9, 43.2 y 39.6 g, respectivamente y superiores a las dosis de 150 y 0 mg L<sup>-1</sup>, con 29.7 y 17.4 g, respectivamente (Cuadro 2).

En el peso seco total de la planta hubo diferencias entre dosis y la mayor acumulación de materia seca por planta se encontró entre 250 y 550 mg L<sup>-1</sup>, mientras que el índice de cosecha (peso seco de tubérculos/peso seco de la planta) fue estadísticamente superior en las dosis de 250 y 350 mg L<sup>-1</sup>, respecto a la dosis de 150 mg L<sup>-1</sup>; no obstante, las concentraciones de 450, 550, 150 y 0 mg L<sup>-1</sup> de K no fueron estadísticamente diferentes entre ellas para el índice de cosecha. Al respecto, el coeficiente de correlación de Pearson entre el peso seco de tubérculos y el índice de área foliar fue de  $r = 0.77$  y entre peso seco total e índice de área foliar fue de  $r = 0.73$ , en tanto que entre peso seco de tubérculo y peso seco total fue de  $r = 0.98$ ; lo que indica que la cantidad de follaje es importante en el peso de los tubérculos y que posiblemente gran cantidad de asimilados se movieron hacia los tubérculos, resultado que coincide con lo señalado por Westermann *et al.* (1994); Aguilar *et al.* (2006); Mora-Aguilar *et al.* (2006).

### Interacciones

El análisis de varianza combinado mostró diferencias estadísticas para las interacciones fecha x dosis en las siguientes variables: SPAD a los 40, 70, 85 y 100 DDE, IAF a los 70, 85 y 100 DDE, altura de planta a los 55, 85 y 100 DDE, número de tubérculos de  $\geq$  mm, número de tubérculos totales por planta e índice de cosecha. El valor SPAD del testigo absoluto fue superior

estadísticamente al mostrado en los otros tratamientos, independientemente de la época de siembra a partir de los 40 días después de emergencia, con valores cercanos a 60 unidades, mientras que el resto de los tratamientos mostraron determinaciones entre 45 y 50 unidades SPAD en ambos ciclos de cultivo.

Tanto el índice de área foliar como la altura de planta mostraron valores más altos en los tratamientos de dosis mayores concentraciones de potasio, en especial de julio a octubre en el tratamiento de  $450 \text{ mg L}^{-1}$ , con 62 cm en la fecha 1 contra 49 cm en la fecha 2. El tratamiento con  $0 \text{ mg L}^{-1}$  mostró la menor altura de planta en ambas fechas, lo que coincide con lo señalado por Beukema y Van der Zaag (1990), quienes reportan enanismo en plantas de papa cuando hay deficiencia de potasio.

Para el índice de área foliar los valores fueron más altos en la época julio a octubre que en el periodo septiembre a diciembre, además en ambos ciclos, el testigo absoluto mostró los menores valores de IAF, aspecto que coincide con lo mencionado por Mulder y Turkensteen (2005) respecto a la reducción de la superficie foliar por efecto de deficiencia en potasio.

La interacción fecha x dosis para las variable producción de tubérculos  $\geq 15 \text{ mm}$  de diámetro, mostró valores estadísticamente superiores para las dosis de 450, 350 y  $250 \text{ mg L}^{-1}$  con 23.3, 28.6 y 24 tubérculos por planta, respectivamente, en el período julio a octubre (fecha 1) cuando las temperaturas y fotoperiodo fueron superiores a las exhibidas entre septiembre y diciembre; en tanto que las de menor cuantía correspondieron a los tratamientos 0 y  $150 \text{ mg L}^{-1}$  en ambas fechas (Figura 1), lo anterior posiblemente se asocie con la producción de mayor cantidad de asimilados en la época en la que hubo mayor área foliar, lo que coincide con lo señalado por Minhas *et al.* (2004); Westermann *et al.* (1994); Beukema y Van der Zaag (1990), en cuanto a la importancia de la disponibilidad de potasio para la tuberización.

En este trabajo, es posible señalar que dosis entre 250 y  $350 \text{ mg L}^{-1} \text{ K}$  en la época julio a octubre parecen apropiadas, en tanto que para el periodo septiembre a diciembre se requiere mayor cantidad de este elemento.

En la interacción fecha x dosis en la variable tubérculos totales por planta, es posible destacar que las concentraciones de 250, 350 y  $450 \text{ mg L}^{-1}$  de K en la fecha 1 (julio a octubre) produjeron 32.6, 37.6 y 33.5 tubérculos por planta, respectivamente, además de la dosis  $550 \text{ mg L}^{-1}$  en la fecha 2 (septiembre a diciembre), con 29 tubérculos por planta, fueron significativamente superiores; lo anterior, mantiene la tendencia indicada anteriormente, sobre la necesidad de mayor cantidad de potasio en la época de menor temperatura.

## Conclusiones

Concentraciones mayores de  $350 \text{ mg L}^{-1}$  de potasio durante todo el ciclo de cultivo promovieron mayor producción de minitubérculos por planta, en hidroponía bajo condiciones de invernadero para el clon mexicano de papa 99-39.

La dosis óptima calculada de potasio para la producción de minitubérculos de diámetro  $\geq 15 \text{ mm}$  del clon mexicano de papa 99-39 fue de  $400 \text{ mg L}^{-1}$ .

## Agradecimientos

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias por facilitar instalaciones, material genético, insumos y recursos en la conducción de este trabajo. A la Universidad Autónoma del Estado de México; a través, del Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por el soporte académico en la realización de esta investigación. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo recibido.

## Literatura citada

- Aguilar, L. M. G.; Carrillo, S. J. A.; Rivera, P. A. y González, H. V. A. 2006. Análisis de crecimiento y relaciones fuente-demanda en dos variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.). Rev. Fitotec. Mex. 29(2):145-156.
- Akira, K.; Ashida, H.; Kasajima, I.; Shigeoka, S. and Yakota, A. 2015. Potato yield enhancement through intensification of sink and source performances. Breed. Sci. 65(1):77-84.
- Beukema, H. P. and Van der Zaag, D. E. 1990. Introduction to potato production. Wageningen. Centre for Agricultural Publishing and Documentation (PUDOC III). Wageningen, The Netherlands. Book NUGI 835. ISBN 90-220-0963-7. 46-49, 81, 94 pp.
- Chang, D. C.; Choo II, C.; Suh, J. T.; Kim, S. J. and Lee, Y. B. 2011. Growth and yield response of three aeroponically grown potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.) to different electrical conductivities of nutrient solution. Am. J. Potato Res. 88(6):450-458. DOI 10.1007/s12230-011-9211-6.
- Chang, D. C.; Park, C. S.; Kim, S. Y. and Lee, Y. B. 2012. Growth and tuberization of hydroponically grown potatoes. Potato Res. 55(1):69-81. DOI 10.1007/s11540-012-9208-7.
- Corrêa, R. M.; Pinto, J. E. B. P.; Faquin, V.; Pinto, C. A. B. P. and Reis, E. S. 2009. The production of seed potatoes by hydroponic methods in Brazil. Fruit, Vegetable and Cereal Science and Biotechnology. Global Sci. Books. 133-139 pp.
- Cooke, L. R. and Little, G. 2001. The effect of foliar application of phosphonate formulations on the susceptibility of potato tubers to late blight. Pest Manag. Sci. 58(1):17-25.
- Di Rienzo, J. A.; Casanoves, F.; Balzarini, M. G.; González, L.; Tablada, M. y Robledo, C. W. 2015. Grupo InfoStat. FCA. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. 102-111 pp.
- Farran, I. and Mingo, C. M. 2006. Potato minituber production using aeroponics: Effect of plant density and harvesting intervals. Am. J. Potato Res. 83(1):47-53.
- Fernie, A. R. and Willmitzer, L. 2001. Molecular and biochemical triggers of potato tuber development. Plant Physiol. 127(4):1459-1465.
- Flores, L. R.; Sánchez del Castillo, F.; Rodríguez, P. J. R.; Colinas, L. M. T; Mora, A. R. y Lozoya, S. H. 2009. Densidad de población en cultivo hidropónico para la producción de tubérculo-semilla de Papa (*Solanum tuberosum* L.). Rev. Chapingo Ser. Hortic. 15(3):251-258.
- Flores, L. R.; Rubio, C. O. A. y Sotelo, R. E. D. 2014. Manual de producción de papa apta para siembra en invernaderos rústicos. Sitio Experimental Metepec-INIFAP. Folleto técnico núm. 1. 44 p.
- Flores, L. R.; Sotelo, R. E.; Rubio, C. O.; Álvarez, G. A. y Marín, C. M. 2016. Niveles de NPK para la producción de minitubérculos de papa en invernadero en el Valle de Toluca. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 7(5):1131-1142.

- INEGI. 2009. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Zinacantepec, México. Clave Geoestadística 15118. INEGI, México, DF.
- Lommen, W. J. M. 2007. The canon of potato science: 27. Hydroponics. *Potato Res.* 50(3):315-318. DOI 10.1007/s11540-008-9053-x.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants 2<sup>nd</sup> Edition. Academic Press, NY. 50-59. pp.
- Martínez, G. Á. 1996. Diseños Experimentales: métodos y elementos de teoría. (Ed.). Trillas. México, DF. 664-676 pp.
- Manolov, I.; Neshev, N. and Chalova, V. 2016. Tuber quality parameters of potato varieties depend on potassium fertilizer and source. *Agric. Agric. Sci. Procedia.* 10(1):63-66.
- Minhas, J. S.; Rai, V. K. and Saini, H. S. 2004. Carbohydrate metabolism during tuber initiation in potato: a transient surge in invertase activity marks the srolon to tuber transition. *Potato Res.* 47 (3-4):113-126.
- Mora, A. R.; Ortiz, C. J.; Rivera, P. A; Mendoza, C. M. C.; Colinas, L. M. T. y Lozoya, S. H. 2006. Índices de eficiencia de genotipos de papa establecidos en condiciones de secano. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 12(1):85-94.
- Mulder, A. and Turkensteen, L. 2005. Potassium deficiency. *In: Mulder, A. and Turkensteen, L. (Eds.) Potato diseases: diseases, pests and defects.* NIVAP, Holland. 209-2011 pp.
- Muro, J.; Díaz, V.; Goñi, J. L. and Lamsfus, C. 1997. Comparison of hydroponic culture and culture in a peat/sand mixture and the influence of nutrient solution and plant density on seed potato yields. *Potato Res.* 40(4):431-438.
- Patrón, I. J. C. 2014. Sustratos orgánicos alternativos para la producción de tubérculo-semilla de papa en invernadero. Tesis de Doctor en Ciencias en Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 41-48 pp.
- Perrenoud, S. 1993. Potato. Fertilizers for yield and quality. International Potash Institute, Berne/Switzerland. IPI Bulletin No. 8. 53-61 pp.
- Rolot, J. L. and Seutin, H. 1999. Soilless production of potato minitubers using a hydroponic technique. *Potato Res.* 42(3-4):457-469.
- SMN. 2016. Servicio Meteorológico Nacional-Comisión Nacional del Agua. Observatorio Meteorológico 76675. Centro de Previsión Meteorológica Toluca. [smn.cna.gob.mx/emas/txt/mx40-10M.TXT](http://smn.cna.gob.mx/emas/txt/mx40-10M.TXT).
- Struik, P. C. and Wiersema, S. G. 1999. Seed potato technology. Wageningen Press, Wageningen. The Netherlands. Book ISBN: 90-74134-65-3. 173-177, 193-206, 303-308 pp.
- Struik, P. C. 2007. The canon of potato science: 25. Minitubers. *Potato Res.* 50(3):305-308. DOI: 10.1007/s11540-008-9051-z.
- Urrestarazu, G. M. 2013. State of the art and new trends of soilless culture in Spain and in emergent countries. International Symposium on Growing Media, Composting and Substrate Analysis. *Acta Hortic.* 1013(37):305-312. DOI 10.17660/ActaHortic.2013.1013.37.
- Velasco, V. V. A. 1999. Papel de la nutrición mineral en la tolerancia a las enfermedades de las plantas. *Terra.* 17(3):193-200.
- Viola, R.; Roberts, A. G.; Haupt, S.; Gazzani, S.; Hancock, R. D.; Marmioli, N.; Machray, G. C. and Oparka, K. J. 2001. Tuberization in potato involves a switch from apoplastic to symplastic phloem unloading. *The Plant Cell.* 13(2):385-398.
- Wang, M.; Zheng, Q.; Shen, Q. and Guo, S. 2013. The critical role of potassium in plant stress response. *Inter. J. Mol. Sci.* 14(4):7370-7390.

- Westermann, D. T.; James, D. W.; Tindall, T. A. and Hurst, R. L. 1994. Nitrogen and potassium fertilization of potatoes: sugars and starch. *Am. Potato J.* 71(7):433-453.
- Wibowo, C.; K. Wijaya; G. H. Sumartono and E. Pawelzik. 2014. Effect of potassium level on quality traits of Indonesian potato tubers. *Asia Pacific J. Sustainable Agric. Food Energy.* 2(1):11-16.
- Xu, X.; Van Lammeren, A. M.; Vermer, E. and Vreugdenhil, D. 1998. The role of gibberellin, abscisic acid, and sucrose in the regulation of potato tuber formation in vitro. *Plant Physiol.* 117(2):575-584.
- Zhao, D.; Oosterhuis, D. M. and Bednarz, C. W. 2001. Influence of potassium deficiency on photosynthesis, chlorophyll content, and chloroplast ultrastructure of cotton plants. *Photosynthetica.* 39(1):103-109.