



Universidad Autónoma del Estado de México

**Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias
Agropecuarias y Recursos Naturales**

**Nutrición y sistemas hidropónicos en la producción de
minitubérculos de papa de genotipos mexicanos**

T e s i s

**Que para obtener el grado de Doctor en Ciencias
Agropecuarias y Recursos Naturales**

Presenta:

M. en C. Francisco Xavier Flores Gutiérrez

Tenancingo, México, diciembre de 2019

Resumen

Se determinó la productividad de genotipos mexicanos de papa en función de la nutrición y el uso de sustratos, en sistema hidropónico en invernadero. Experimentos en dos ciclos de cultivo se desarrollaron para establecer la dosis de potasio apropiada en la solución nutritiva para el clon mexicano de papa 99-39; se encontró que la concentración de 350 mg L^{-1} de K produjo 194% más minitubérculos que el testigo, lo que permitió establecer que dosis elevadas de este elemento favorecen la producción de mayor número de minitubérculos. También se determinó la concentración adecuada de calcio para el genotipo de papa 99-39; las hojas jóvenes mostraron coloración amarilla cuando hubo deficiencia de calcio y el rendimiento no se vio afectado en concentraciones menores de 150 mg L^{-1} . Por otro lado se evaluó la respuesta de los genotipos 99-39 y Citlali en dos sustratos, perlita grado hortícola y la mezcla de perlita con turba 1:1 v/v (agregados); el resultado de tres ciclos de evaluación indicó que el sistema de producción en perlita e hidroponía fue más eficiente, el potencial productivo de cada genotipo se expresó en invernadero, donde el clon 99-39 resultó mejor que la variedad Citlali, la estación del año afectó fuertemente la respuesta varietal en cuanto al número de tubérculos por planta en papa; los datos obtenidos permitirán tomar decisiones respecto al manejo de la producción semilla. Finalmente, se cuantificó la productividad de doce genotipos de papa en dos ciclos de cultivo con cuatro soluciones nutritivas; se encontró que las concentraciones de potasio superiores a 350 mg L^{-1} , suministradas desde el inicio del cultivo, favorecen el número y diámetro de minitubérculos; así mismo, la productividad de los genotipos se hizo evidente al detectar algunos con mayor potencial de rendimiento; además, el índice de cosecha fue mayor en cultivares con potencial para uso industrial y la estación del año afectó fuertemente la productividad de los genotipos en estudio. En conclusión, altas dosis de K suministradas desde la formación del estolón favorecieron la cantidad y diámetro de minitubérculos; así mismo, el potencial de rendimiento de cada genotipo se expresó en condiciones de invernadero y fue afectado por la estación del año. Concentraciones menores de 150 mg L^{-1} de Ca favorecieron la producción de tubérculos por planta.

Abstract

The productivity of Mexican potato genotypes was determined based on nutrition and the use of substrates, in the hydroponic system in the greenhouse. Experiments in two culture cycles were developed to establish the appropriate dose of potassium in the nutrient solution for the Mexican potato clone 99-39; it was found that the concentration of 350 mg L⁻¹ of K produced 194% more minitubers than the control, which allowed to establish that high doses of this element favor the production of the largest number of minitubers. The appropriate calcium concentration for potato genotype 99-39 was also determined; young leaves showed yellow coloring when there was calcium deficiency and performance was not affected in concentrations under 150 mg L⁻¹. On the other hand, the response of genotypes 99-39 and Citlali were tested/evaluated on two substrates, horticultural grade perlite and the mixture of perlite with peat 1:1 v/v (aggregates); the result of three evaluation cycles indicated that the production system in perlite and hydroponics was more efficient, the productive potential of each genotype was expressed in the greenhouse, where clone 99-39 was better than the Citlali variety, the season of the year strongly affected the varietal response in terms of the number of tubers per potato plant; the obtained data will allow decision-making regarding the management of seed production. Finally, the productivity of twelve potato genotypes was quantified in two crop cycles with four nutritive solutions; it was found that potassium concentrations greater than 350 mg L⁻¹, supplied from the beginning of the culture, favor the number and diameter of mini tubers; likewise, the productivity of genotypes became evident when detecting some with greater yield potential; in addition, the harvest index was higher in cultivars with potential for industrial use and the season of the year strongly affected the productivity of the genotypes under study. In conclusion, high doses of K supplied since stolon formation favored the amount and diameter of mini tubers; likewise, the yield potential of each genotype was expressed in greenhouse conditions and was affected by the season of the year. Concentrations below 150 mg L⁻¹ Ca favored the production of tubers per plant.

Contenido

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Abstract	v
Contenido	vi
Índice de Cuadros	viii
Índice de Figuras	x
I. Introducción	1
II. Antecedentes	3
2.1. Origen del cultivo de la papa	3
2.2. Formas de reproducción de la papa	4
2.3. Fases de crecimiento de la papa	4
2.4. Problemática del cultivo de la papa	5
2.5. Normatividad para la producción de semilla en México	5
2.6. Sistemas de producción de minitubérculos de papa	6
2.6.1. Sistemas hidropónicos	6
2.7. Nutrición de la papa para la producción de minitubérculos de papa	8
2.7.1. Elementos esenciales y su función	8
2.7.2. Deficiencias de nutrientes en papa	10
2.7.3. Nutrición de la papa y enfermedades	12
2.8. Sistemas hidropónicos y nutrición en papa	12
2.9. Variedades de papa usadas en México	16
III. Objetivo General	17
IV. Objetivos Específicos	17
V. Hipótesis	18
VI. Materiales y Métodos	18

VII. Resultados	18
7.1. Capítulo 1. Respuesta del clon mexicano de papa 99-39 a potasio en hidroponía e invernadero.	19
7.2. Capítulo 2. Respuesta del clon mexicano de papa 99-39 a calcio en sistema hidropónico e invernadero.	40
7.3. Capítulo 3. Productividad de dos genotipos de papa en perlita y agregados en hidroponía e invernadero.	50
7.4 Capítulo 4. Productividad de doce genotipos mexicanos de papa en dos ciclos de cultivo con cuatro soluciones nutritivas, en sistema hidropónico e invernadero.	71
VIII. Discusión General	90
IX. Conclusiones Generales	97
X. Literatura Citada	98

Índice de Cuadros

Cuadro 1	Variedades de papa inscritas en el Catálogo Nacional de Variedades de Papa.	17
Capítulo 1		
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 hechas a los 40, 55, 70, 85 y 100 días después de la emergencia (DDE).	26
Cuadro 2	Respuesta en productividad del clon de papa 99-39 a la nutrición con potasio en sistema hidropónico e invernadero.	29
Capítulo 2		
Cuadro 1	Efecto del calcio 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 hechas a los 40, 55, 70, 85 y 100 días después de la emergencia (DDE).	43
Cuadro 2	Respuesta en productividad del clon de papa 99-39 a la nutrición con calcio en sistema hidropónico e invernadero.	44
Capítulo 3		
Cuadro 1	Promedios de valores SPAD en la interacción ciclo x sustrato x genotipo a los 30, 60 y 90 días después de la siembra. Dos genotipos, dos sustratos y tres épocas de cultivo.	57
Cuadro 2	Análisis combinado. Se muestran valores promedio \pm error estándar de la media y diferencias estadísticas para las principales variables evaluadas en dos genotipos mexicanos de papa en dos sustratos y tres ciclos de cultivo.	58
Cuadro 3	Promedios de índice de área foliar en la interacción ciclo x sustrato x genotipo a los 30, 60 y 90 días después de la siembra. Dos genotipos, dos sustratos y tres épocas de cultivo.	58
Cuadro 4.	Promedios de altura de planta en la interacción ciclo x sustrato x genotipo a los 30, 60 y 90 días después de la siembra. Dos genotipos, dos sustratos y tres épocas de cultivo.	59
Cuadro 5	Promedios de la producción de tubérculos totales por planta en la interacción ciclo x sustrato x genotipo.	63
Capítulo 4		
Cuadro 1	Significancia estadística de acuerdo con el análisis de varianza de la serie de experimentos, de acuerdo con la prueba de F.	75
Cuadro 2.	Valores promedio por planta \pm error estándar de la media para las variables evaluadas en doce genotipos de papa en dos ciclos de cultivo y cuatro soluciones nutritivas, en sistema hidropónico e invernadero. De acuerdo con el análisis de la serie de experimentos.	76

Cuadro 3	Valores promedio de dos épocas de cultivo para las variables altura de planta, índice de área foliar e índice de verdor (SPAD) en doce genotipos de papa, en sistema hidropónico e invernadero.	76
Cuadro 4	Productividad de doce genotipos mexicanos de papa en el ciclo de cultivo julio a noviembre con cuatro soluciones nutritivas. Interacción genotipo x solución. Número de tubérculos ≥ 15 mm de diámetro, promedio por planta.	84
Cuadro 5	Productividad de doce genotipos mexicanos de papa en el ciclo de cultivo julio a noviembre con cuatro soluciones nutritivas. Interacción genotipo x solución. Peso de tubérculos ≥ 15 mm de diámetro, promedio por planta.	85
Cuadro 6	Productividad de doce genotipos mexicanos de papa en el ciclo de cultivo marzo a julio con cuatro soluciones nutritivas. Interacción genotipo x solución. Peso de tubérculos ≥ 15 mm de diámetro, promedio por planta.	86

Índice de Figuras

Capítulo 1		
Figura 1	Curva de regresión lineal de segundo grado para la estimación de la concentración óptima de potasio para la producción de initubérculos por planta del clon de papa 99-39, con diámetro ≥ 15 mm. Valores promedio \pm error estándar.	31
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).	32
Capítulo 2		
Figura 1	Peso fresco de tubérculos por planta del clon de papa 99-39, con diferentes dosis de calcio en la solución nutritiva, en dos ciclos de cultivo, en sistema hidropónico e invernadero. * Promedios con la misma letra no difieren estadísticamente $P < 0.05$, de acuerdo con la prueba de Tukey.	45
Figura 2	Síntomas de deficiencia de calcio en el tratamiento $0 \text{ mg L}^{-1} \text{ Ca}$ en hojas jóvenes, comparadas con hojas sin deficiencia de este elemento, en plantas del clon de papa 99-39.	45
Figura 3	Peso fresco de tubérculos por planta en la interacción fecha de cultivo x dosis de calcio, en el clon mexicano 99-39, en sistema hidropónico e invernadero. * Promedios con la misma letra no difieren estadísticamente $P < 0.05$, de acuerdo con la prueba de Tukey.	46
Figura 4	Número de tubérculos por planta en la interacción fecha de cultivo x dosis de calcio, en el clon mexicano 99-39, en sistema hidropónico e invernadero. * Promedios con la misma letra no difieren estadísticamente $P < 0.05$, de acuerdo con la prueba de Tukey.	47
Capítulo 3		
Figura 1	Producción promedio de tubérculos iguales o mayores de 15 mm de diámetro en tres ciclos de cultivo y dos sustratos para la variedad Citlali y el clon mexicano 99-39.	61
Figura 2	Efecto de la interacción ciclo x sustrato x genotipo en la producción por planta de minitubérculos mayores o iguales de 15 mm.	62
Figura 3	Efecto de la interacción ciclo x sustrato x genotipo en el peso fresco de tubérculos por planta de dos genotipos de papa.	64
Figura 4	Índice de cosecha promedio de dos genotipos mexicanos de papa en tres ciclos de cultivo y dos sustratos.	65
Figura 5	Índice de cosecha en la interacción genotipo x ciclo por sustrato.	66

	Capítulo 4	
Figura 1	Producción de tubérculos ≥ 15 mm de diámetro por planta, en dos ciclos de cultivo, para doce genotipos de papa, en hidroponía e invernadero. Promedio \pm error estándar.	77
Figura 2	Peso de tubérculos ≥ 15 mm de diámetro por planta, en dos ciclos de cultivo, para doce genotipos de papa, en hidroponía e invernadero. Promedio \pm error estándar.	78
Figura 3	Producción de tubérculos totales por planta, en dos ciclos de cultivo, para doce genotipos de papa, en hidroponía e invernadero. Promedio \pm error estándar.	79
Figura 4	Peso de tubérculos totales por planta, en dos ciclos de cultivo, para doce genotipos de papa, en hidroponía e invernadero. Promedio \pm error estándar.	80
Figura 5	Índice de cosecha para doce genotipos de papa, en dos épocas de cultivo, en hidroponía e invernadero. Promedio \pm error estándar.	81
Figura 6	Respuesta de doce genotipos de papa a cuatro soluciones nutritivas en la producción de tubérculos ≥ 15 mm de diámetro, en dos ciclos de cultivo, sistema hidropónico e invernadero. *, # Promedios con la misma letra no difieren estadísticamente $P < 0.05$, de acuerdo con la prueba de Tukey.	82
Figura 7	Respuesta de doce genotipos de papa a cuatro soluciones nutritivas en el peso (gramos) de tubérculos ≥ 15 mm de diámetro, en dos ciclos de cultivo, sistema hidropónico e invernadero. *, # Promedios con la misma letra no difieren estadísticamente $P < 0.05$, de acuerdo con la prueba de Tukey.	82
Figura 8	Respuesta promedio (número de tubérculos ≥ 15 mm de diámetro) de doce genotipos de papa a la aplicación de cuatro soluciones nutritivas, en dos ciclos de cultivo, en sistema hidropónico e invernadero. ** Promedios con la misma letra no difieren estadísticamente $P < 0.05$, de acuerdo con la prueba de Tukey.	83

Nutrición y sistemas hidropónicos en la producción de minitubérculos de papa de genotipos mexicanos.

I. Introducción

La papa es el cuarto cultivo alimenticio del mundo, después del maíz, arroz y trigo; en 2017 se produjeron 388 millones, 191 mil toneladas de este tubérculo (FAOSTAT, 2019); esa misma fuente indica que los principales países productores fueron: China con 99 millones 206 mil t, India con 48 millones 605 t, Federación de Rusia con 29 millones 590 mil t, Ucrania con 22 millones 208 mil t y Estados Unidos con 20 millones 017 mil t.

En México se cosecharon 57 mil 719 ha en 2018, con una producción total de un millón 776 mil 435 toneladas y un rendimiento de 30.78 t ha⁻¹, de acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2019); es un cultivo de gran importancia para el país, pues aporta 17 mil 500 empleos directos, 51 mil 600 indirectos y genera 6.9 millones de jornales por año, de acuerdo con la Confederación Nacional de Productores de papa (CONPAPA, 2013); así mismo, la papa es el doceavo lugar entre los cultivos anuales por superficie sembrada (Rocha-Rodríguez y Quijano-Carranza, 2015) y entre las hortalizas, ocupa el tercer lugar en superficie sembrada y valor de la producción (CONPAPA, 2013)

Si se considera el requerimiento de semilla por hectárea, aproximadamente 3.5 toneladas (dependiendo del tamaño del tubérculo-semilla), la necesidad de material de siembra es de aproximadamente 207 mil 396 toneladas; por ello, el componente que más afecta la productividad y rentabilidad del cultivo de papa es la calidad de la semilla. El esquema formal de certificación de semilla de papa en México contempla una fase de invernadero, de acuerdo con el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA, 2015) señalada en la Norma Oficial Mexicana NOM-041-FITO-2002; donde se producen minitubérculos de categoría Prebásica II; esta semilla es la que se siembra en campo para producir la categoría Básica o G1. En la producción de semilla, los productores mexicanos cuentan con suficiente infraestructura para producción de minitubérculos y semilla básica de

este cultivo: 11 laboratorios y 17 invernaderos (CONPAPA, 2013); no obstante, datos del Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS, 2015), señalan que de 2011 a 2014 se produjeron en promedio, 43 mil 700 toneladas de semilla calificada de papa en ambos ciclos de cultivo (primavera-verano y otoño-invierno). La cifra de semilla reportada por el SNICS, difiere de la requerida para la siembra en México en 163 mil 696 toneladas. Es necesario mencionar también, que muchos productores utilizan sus laboratorios e invernaderos para producir su propia semilla sin certificarla; así mismo, la industria de hojuelas contrata a empresas que se encargan de multiplicar las variedades que requieren para su producción.

Es común que la producción de minitubérculos en invernadero se realice en camas de siembra empleando diferentes mezclas de sustratos (Corrêa *et al.*, 2008; Flores-López *et al.*, 2009a; Arellano *et al.*, 2010), que son desinfectados por diversos medios (Otazú, 2008a; Otazú, 2008b; Otazú 2008c), aun así existen riesgos de presencia de patógenos. Por ello, una alternativa para la producción de semilla de papa de calidad es la hidroponía, una técnica agrícola que se usa para la obtención de minitubérculos en los esquemas de producción de semilla calificada; existen variantes en los sistemas hidropónicos (Medeiros *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2006; Factor *et al.*, 2007; Chuquillanqui *et al.*, 2008), pero todos ellos se ajustan al principio esencial del cultivo de plantas sin tierra y sin materia orgánica (Lommen, 2007) y en la manera de suministrar la solución nutritiva, la frecuencia de ello y si la solución es reciclada o no.

Existen recomendaciones sobre la nutrición y sistemas de cultivo para la papa; sin embargo éstas difieren de acuerdo con el país y los cultivares de papa de interés (Muro *et al.*, 1997; Rolot y Seutin, 1999; Corrêa *et al.*, 2009; Chang *et al.*, 2011); en este sentido, las variedades generadas por el Programa Nacional de Papa del INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias), no están incluidas en programas formales de producción de semilla, pero son requeridas por productores del país, en especial los del centro de la República Mexicana, debido a sus características de resistencia a enfermedades y adaptación a estas zonas; por ello es indispensable generar tecnología específica de producción de semilla Prebásica II de papa en clones y cultivares mexicanos.

II. Antecedentes

2.1. Origen del cultivo de la papa

Los primeros cultivares de papa probablemente fueron seleccionados en el Lago Titicaca, entre Perú y Bolivia, hace más de seis mil; todo ello, en la cordillera de Los Andes (Rodríguez, 2010; Rocha-Rodríguez y Quijano-Carranza, 2015) y fueron derivadas por diversos procesos de cruzamiento y poliploidización del complejo *Solanum brevicaulle*; así se originó *S. stenotomum* y de allí, probablemente *S. andigena*. Las variedades de papa encontradas en Chile son una muestra pequeña de la diversidad del género *Solanum*, pertenecen a la especie *Solanum tuberosum* y fueron llevadas a Europa (FAO, 2008; Rodríguez, 2010) de donde se dispersó por todo el planeta. Existe controversia basada en estudios científicos sobre el origen y evolución de la papa cultivada (Spooner y Hetterscheid, 2005; citados por Rodríguez, 2010; FAO, 2008), aunque hay evidencias a nivel molecular que indican que los primeros cultivares proceden de una única línea ancestral del componente “del norte” del complejo *S. brevicaulle*, de la región central o sur de Perú.

La papa (*Solanum tuberosum*) es una planta dicotiledónea, C3, herbácea, perenne por sus tubérculos, pero cultivada como anual (FAO, 2008; Rocha-Rodríguez y Quijano-Carranza, 2015). La papa tiene un alto contenido de almidón; razón por la que ocupa el cuarto lugar mundial en importancia como alimento, después del maíz, el trigo y el arroz. La parte subterránea de la planta de papa se compone de raíces, estolones y tubérculos, los cuales son parte de los estolones adaptados para el almacenamiento de reservas (Rocha-Rodríguez y Quijano-Carranza, 2005).

Al crecer, las hojas compuestas de la planta de la papa producen almidón, el cual se desplaza hacia la parte terminal de los tallos subterráneos, también llamados estolones. Estos tallos se engrosan y producen tubérculos cerca del sistema radicular de la planta (FAO, 2008). El número de tubérculos que llegan a madurar depende de la disponibilidad de humedad y nutrientes del suelo.

El tallo estolonífero está formado por brotes laterales más o menos largos que nacen de la base del primero (Huamán, 1986). Los estolones pueden formar tubérculos mediante un agrandamiento de su extremo terminal. No todos los estolones llegan a formar tubérculos. Un estolón no cubierto con suelo, puede desarrollarse en un tallo vertical (principal) con follaje normal. El tubérculo constituye el principal órgano de almacenamiento de la planta de papa (Rowe, 1993).

2.2. Formas de reproducción de la papa

Las plantas de papa pueden desarrollarse a partir de una semilla o de un tubérculo. Cuando crecen a partir de una semilla, forman una delicada raíz con ramificaciones laterales. Cuando crecen de tubérculos, primero forman raíces adventicias en la base de cada brote y luego encima de los nudos en la parte subterránea de cada tallo. Las hojas aisladas, tallos y otras partes de la planta pueden formar raíces, especialmente cuando han sido sometidos a tratamientos con hormonas. Esta habilidad de las diferentes partes de la planta de papa para formar raíces es aprovechada para la implementación de las técnicas de multiplicación (Huamán, 1986).

2.3. Fases de crecimiento de la papa

El crecimiento y desarrollo de las plantas pueden dividirse en las siguientes etapas (Rowe, 1993):

Estado de crecimiento I. Fase de emergencia; período entre la siembra y la aparición de los brotes en el surco.

Estado de crecimiento II. Fase de crecimiento vegetativo; período entre la emergencia y la iniciación de la tuberización.

Estado de crecimiento III. Fase iniciación de la tuberización; período corto, cuando los estolones forman un pequeño agrandamiento en su parte terminal.

Estado de crecimiento IV. Fase de llenado de tubérculo; entre el inicio de la formación de tubérculos y el máximo desarrollo del follaje. En muchas variedades introducidas este período coincide con el inicio y la finalización de la floración.

Estado de crecimiento V. Fase de madurez; período entre el máximo desarrollo del follaje y la senescencia total.

2.4. Problemática del cultivo de la papa

Actualmente la papa es un cultivo de gran significancia en la nutrición humana. El cultivo es atacado por cientos de plagas (incluyendo maleza, insectos, nematodos, hongos, bacterias, virus, viroides y fitoplasmas; debido a que la papa se propaga vegetativamente, algunas de estas plagas y enfermedades se diseminan y propagan a través de los tubérculos. Herrera y Scott (1993) encontraron que en Latinoamérica los principales factores limitantes son la comercialización y manejo poscosecha, dado el riesgo de los precios en la cosecha y el elevado costo de producción; así mismo, las enfermedades causadas por virus y hongos elevan los costos. La calidad fitosanitaria del tubérculo semilla es otro problema siempre presente en los sistemas de producción de América Latina. En México, además, la presencia del síndrome de la punta morada ha provocado la reducción de superficie en los valles altos y sierras de México y el aumento en los costos de producción para manejar a *Bactericera cockerelli*, de este síndrome (Rubio *et al.*, 2006)

2.5. Normatividad para la producción de semilla en México

El Sistema Nacional de Producción, Certificación y Comercio de Semillas, a través del Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS) cuenta con programas de certificación en los que se considera la calidad y condición fotosanitaria de ese insumo. En el caso de la papa, los requisitos para la inspección y certificación de semilla se señalan en la Norma Oficial Mexicana NOM-041-FITO-2002 donde se establecen los requisitos fitosanitarios para la producción de material propagativo asexual de papa.

El material inicial son las plantas *in vitro* 100% diagnosticadas libres de plagas y enfermedades, con identificación varietal y origen documentado. El material de multiplicación son plantas *in vitro* obtenidas a partir del material inicial, de forma aséptica; la semilla Prebásica I o Prenuclear son plantas o microtubérculos producidos *in vitro* en laboratorio en condiciones asépticas; la Prebásica II (Nuclear) es la progenie del material Prenuclear producida en ambiente protegido en sustrato y diagnosticada libre de plagas. Estas etapas de multiplicación son observadas por la Norma Oficial, además de cinco generaciones en campo: G1 = Básica, G2 = Registrada I, G3 = Registrada II, G4 = Registrada III y G5 = Certificada (Flores *et al.*, 2014); lo anterior permite mantener el proceso certificación de

forma análoga con algunos estados de la Unión Americana y Canadá (G1 a G3= élite, G4 = Fundación y G5 = Certificada); con ello se asegura que las tolerancia a plagas sean equivalentes cuando se trata de importar material de siembra.

2.6. Sistemas de producción de minitubérculos de papa

2.6.1. Sistemas hidropónicos

La hidroponía es un método en el que las plantas crecen en una solución nutritiva (Lommen, 2007), y el uso de este sistema en la multiplicación del material vegetativo, presenta ventajas por el control de la nutrición (Muro *et al.*, 1997) y la sanidad (Ezeta, 2001).

La producción de semilla de papa es realizada por métodos de multiplicación rápida, utilizando secciones enraizadas de tallo o plantas *in vitro*, lo que permite el desarrollo de esquemas de producción de semilla de alta calidad fitosanitaria (Donnelly *et al.*, 2003), y ha incrementado la tasa de multiplicación (Ezeta, 2001). Aunque la hidroponía se usa en la producción de minitubérculos de papa (Lommen, 2007), se requiere de la generación de tecnología apropiada para cada cultivar. La nutrición es determinante en el desarrollo del cultivo, el rendimiento y la calidad de los tubérculos (Corrêa *et al.*, 2009), por lo que la eficiencia y productividad exhibida por los sistemas hidropónicos, depende de la disponibilidad constante de nutrimentos, pH y conductividad eléctrica de la solución (Chang *et al.*, 2011). Existen recomendaciones diversas de acuerdo con el país y los cultivares de papa de interés (Muro *et al.*, 1997; Rolot y Seutin, 1999; Corrêa *et al.*, 2009; Chang *et al.*, 2011).

Benson *et al.* (2009 a, b) estudiaron los efectos de la nutrición por calcio y el pH en cultivos hidropónicos de papa respecto a la presencia de enfermedades, especialmente la pudrición rosada (*Phytophthora erythroseptica*); a mayores niveles de calcio disminuyó el efecto y síntomas de la enfermedad, así mismo, con pH de 7 o mayor se redujo la infección para la variedad Russet Norkotah; y considerando que la calidad y sanidad de la semilla de papa es fundamental para mejorar la productividad y rentabilidad del cultivo de papa, Ulrich y Fong (1969) evaluaron soluciones nutritivas para hidroponía en papa y encontraron que la

deficiencia de potasio se manifiesta de la misma manera que en condiciones de campo, en cuanto a síntomas en las hojas y puntos de crecimiento.

Wheeler *et al.* (1990) utilizaron la técnica de flujo continuo de una película de solución nutritiva (Nutrient Film Technique NFT) para estudiar la posibilidad de producción de papa en el espacio por la NASA; los resultados demostraron que fue posible obtener rendimientos aceptables de papa, pero que debe cuidarse la acumulación de sales y controlar el pH a través del uso de ácidos. Por otro lado, Farran y Mingo-Castel (2006) trabajaron con aeroponía y estudiaron algunos factores de manejo hortícola; encontraron que a una densidad de 60 plantas por m² se incrementó el número de tubérculos y el rendimiento aumentó al cosechar a intervalos de siete días. Los minitubérculos obtenidos en aeroponía no mostraron diferencia con los producidos en sustrato, cuando fueron sembrados en campo.

Chang *et al.* (2008), con el propósito de retardar el crecimiento de los brotes de papa e inducir la formación de tubérculos, realizaron un estudio de interrupción de la nutrición en un sistema aeropónico. Esta interrupción incrementó la actividad de las raíces y la producción de antocianinas. En la variedad Superior, el rendimiento se incrementó 18%, mientras que en el cultivar Atlantic no hubo efectos significativos respecto al testigo. Recomiendan el uso de esta técnica en cultivos hidropónicos para variedades de ciclo largo.

Mateus-Rodriguez *et al.* (2013) analizaron diferentes sistemas de producción de minitubérculos en esquemas de multiplicación de semillas de calidad en Latinoamérica; sugieren el uso de la aeroponía como la alternativa más viable para ello; existen otros sistemas, como la hidroponía, el uso de películas nutritivas y de diferentes tipos de sustrato para ser utilizados en invernadero.

En cuanto a la nutrición y a los sistemas de producción de papa en invernadero, se han hecho estudios sobre el cultivo hidropónico, donde se proporciona a la planta la totalidad de sus requerimientos nutricionales. Boersig *et al.* (1988) compararon los sistemas NFT y ARM para la producción de minitubérculos; mientras que Smiko (1991), diferenció el proceso de tuberización *in vitro* y en hidroponía. Este último autor evaluó mezclas de sustratos y de

soluciones nutritivas para el cultivo hidropónico de papa, y Muro (1997) estudió la influencia de la solución nutritiva y sustratos (peatmost y arena).

Chang *et al.* (2011), estudiaron el crecimiento y rendimiento de nuevas variedades de papa bajo condiciones de aeroponía; respecto a su respuesta a cuatro diferentes soluciones nutritivas con distinta conductividad eléctrica (CE). Las plantas desarrolladas con valores de CE bajos mostraron inhibición en el crecimiento de tallo, estolón y formación más temprana de tubérculo, comparadas con aquellas que tuvieron mayores valores de CE; en el tratamiento de 0.6 dS m^{-1} , se observaron los tubérculos a los 40, 50 y 52 días para las variedades Superior (control), Haryeong y Jayoung, respectivamente. Para los tratamientos con mayores valores de CE se observaron los tubérculos de 5 a 6 días más tarde, sobre todo en las nuevas variedades. Encontraron también que las variedades Superior y Jayoung crecieron adecuadamente en una gran amplitud de niveles de EC, pero la nueva variedad Haryeong necesitó un manejo más específico de la conductividad eléctrica.

2.7. Nutrición de la papa para la producción de minitubérculos de papa

2.7.1. Elementos esenciales y su función

De los nutrientes esenciales en las plantas, oxígeno e hidrógeno constituyen más del 90% de la materia seca Bonilla (2008), el resto de dichos elementos participa en el metabolismo de los vegetales. En 1934 Arnon y Stout citados por Favela-Chávez *et al.* (2006) y Bonilla (2008) postularon los criterios que distinguen a un elemento esencial en la nutrición vegetal: a) una planta no será capaz de completar su ciclo vital en ausencia del ese elemento mineral, b) la función que realice dicho elemento no podrá ser remplazada por otro mineral, c) el elemento deberá estar directamente implicado en el metabolismo (como componente de una molécula esencial) o deberá ser requerido en una fase metabólica precisa (reacción enzimática). Se conocen nutrientes considerados como esenciales para las plantas superiores (Resh, 2001), el carbono, oxígeno e hidrógeno están disponibles en el agua y en la atmósfera; el resto de esos elementos esenciales pueden ser tomados por la planta de la solución del suelo o absorbidos por las hojas a través de aplicaciones foliares, ellos son: nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, magnesio, calcio, hierro, manganeso, zinc, cobre, boro, molibdeno, cloro y níquel. También es posible considerar una división de los nutrientes macronutrientes

y micronutrientes (Bonilla, 2008), los micronutrientes, en su mayoría, forman parte de enzimas y se requieren en pequeñas cantidades; en tanto, los macronutrientes son parte constitutiva de biomoléculas.

La absorción de los nutrientes por la planta han sido discutidos por diversos autores (Salisbury y Ross, 2000; Bonilla, 2008; Favela-Chávez *et al.*, 2006): el nitrógeno es absorbido por las plantas en dos formas iónicas: nitrato (NO_3^-), amonio (NH_4^+) y el N_2 atmosférico puede aprovecharse por las plantas mediante reducción microbiana; el fósforo se encuentra disponible para la planta como ion fosfato, se absorbe como H_2PO_4^- , aunque también es posible que se realice en forma de ion HPO_4^- , favorecido por pH menor a 7, mientras que el ion $\text{H}_2\text{PO}_4^{2+}$ por valores de pH superiores a ese valor. El potasio es otro elemento esencial, se absorbe en forma de K^+ y es un activador de más de 50 procesos enzimáticos y otros relacionados con la presión de turgencia de las células y las apertura y cierre estomático; el ion K se redistribuye fácilmente desde los órganos maduros hacia los jóvenes. El calcio tiene varias funciones celulares relacionadas con la estructura de la membrana y la pared celular, provee estabilidad en los ligamentos de las moléculas de pectina (Palta, 2010); es absorbido en su forma Ca^{2+} ; la concentración intracelular de este elemento es muy baja. El magnesio, como elemento estructural en las plantas, forma parte de la molécula de clorofila y se absorbe de manera activa en su forma Mg^{2+} , cerca del 20% del Mg de las hojas se encuentra en los cloroplastos, pero solo del 10 al 20% está en las moléculas de clorofila.

El hierro se absorbe activamente en forma Fe^{2+} o Fe^{3+} y es de gran importancia en las reacciones de óxido reducción, participa en el metabolismo de las plantas, es esencial para la formación y funcionamiento de enzimas importantes que están relacionadas con la transferencia de energía, respiración y síntesis de proteínas (Mulder y Turkensteen, 2005), además el Fe es indispensable para la formación de clorofila; el cobre se absorbe por la planta en forma de Cu^{2+} y es un nutrimento con características similares a las del Fe; el manganeso es absorbido por la planta como Mn^{2+} y se encuentra asociado con los procesos redox en el sistema fotosintético del transporte de electrones; el zinc se absorbe como Zn^{2+} , es fundamental en la síntesis de auxinas, especialmente el ácido indolacético; el boro es

absorbido por la planta en forma de ácido bórico y es transportado desde la raíz, vía xilema; auxilia en el transporte de azúcares a través de la planta y participa en la síntesis del ácido giberélico; el molibdeno lo absorbe la planta como MoO_4^{2-} , su función se asocia con reacciones de transferencia de electrones; finalmente, el cloro se absorbe activamente como Cl^- , su función se asocia con el fotosistema II en los cloroplastos; así como con la presión osmótica y con la turgencia de la planta (Favela-Chávez *et al.*, 2006).

2.7.2. Deficiencias de nutrientes en papa

Cuando la papa crece en el suelo, el ambiente que éste proporciona a la planta, hace que sea provista de nutrimentos, agua, así como de un soporte mecánico (Lommen, 2007) que permite que las plantas se desarrollen apropiadamente. La papa aprovecha la aplicación de fertilizantes (Beukema y Van der Zaag, 1990) bajo condiciones de campo. Un cultivo con rendimiento de 30 t ha^{-1} puede tomar durante su desarrollo 150 kg de N, 60 kg de P_2O_5 , 350 kg de K_2O , 90 kg de Ca, 30 kg de MgO, así como otros nutrientes en menores cantidades; es normal que la mayor producción del cultivo dependerá de la extracción de nutrientes del mismo. Deficiencias en la disponibilidad de nutrientes afectan de distinta manera a la planta. Una estrategia apropiada para el desarrollo holístico de cultivos de papa requiere asegurar que los nutrientes esenciales estén disponibles por la planta (Wastermann, 1993). Los requerimientos nutricionales de la papa cambian con los estados de crecimiento de esta planta, por lo que la disponibilidad de ellos requiere de un manejo apropiado. Las soluciones nutritivas usadas para el cultivo de papa en hidroponía contienen macro y micronutrientes: N, P, K, S, Ca, Na, Mg, Fe (quelatos), Mn, Zn, B, Cu y Mo (Lommen, 2007).

La deficiencia de los elementos esenciales en el cultivo de papa ha sido analizada y reportada (Beukema y Van der Zaag, 1990; Wastermann, 1993; Salisbury y Ross, 2000; Mulder y Turkensteen 2005; Bonilla, 2008). Cuando existe deficiencia de N, las plantas se tornan de un color verde pálido, las hojas viejas adquieren una coloración de amarilla a café y posteriormente mueren. Las plantas de papa que crecen con nitrógeno en exceso producen follaje abundante pero tubérculos pequeños. El fósforo tiene una respuesta considerable en el rendimiento de la papa ya que contribuye en el desarrollo temprano del cultivo y en la tuberización del mismo; la producción de estolones y de tubérculos (Álvarez-Sánchez *et al.*,

1999) se ve favorecida por la acción del P; la deficiencia de P se refleja en el enanismo de las plantas de papa, las hojas son verde oscuro y se enrollan hacia arriba y en ocasiones pueden acumular pigmentos de antocianina. El potasio, además de tener fuertes efectos en el rendimiento de la papa, afecta también la calidad del tubérculo, en cuanto al contenido de materia seca y al almacenamiento, entre otros factores, por lo que los síntomas de la deficiencia de este elemento aparecen en las hojas viejas de la planta; éstas sufren enanismo, las hojas jóvenes desarrollan una superficie crespada y sus márgenes se enrollan hacia abajo, los márgenes parecen dañados con un abrasivo y lesiones necróticas pueden aparecer en las hojas viejas; así mismo, es común observar un color bronceado en la lámina foliar (Mulder y Turkensteen 2005).

El calcio favorece el crecimiento de las plantas y los tubérculos en la papa, los síntomas de deficiencia de este elemento aparecen en los puntos de crecimiento jóvenes de la planta, además de que cuando se trata de la producción de tubérculos-semillas, la poca disponibilidad de calcio provoca problemas en la brotación; así mismo, las yemas pueden morir y es posible la aparición de una coloración café en los anillos vasculares del tubérculo después de la aparición de los síntomas en el follaje. La deficiencia de Mg, hojas jóvenes, pero maduras son afectadas por clorosis intervenal y manchas de color marrón; las hojas cercanas a los puntos de crecimiento permanecen verdes, por alguna razón, las células del mesófilo situadas cerca de los haces vasculares retienen la clorofila durante más tiempo que las células del parénquima que se encuentran entre ellos. Altas concentraciones de K y de N (amoniaco) pueden reducir la absorción de magnesio. Por otra parte, las plantas con deficiencia de Mg son más débiles y mayormente sensibles a producir tubérculos con brotación temprana por la presencia de *Verticillium dahliae* y tizón temprano (*Alternaria solani*) en el follaje. En la papa los síntomas de deficiencia de azufre son parecidos a los del N, excepto que la clorosis se desarrolla primero en las hojas jóvenes. Su deficiencia, al parecer, favorece la presencia de enfermedades importantes como *Streptomyces* spp y *Spongospora subterranea* (Mulder y Turkensteen 2005).

Los síntomas de deficiencia de Fe se evidencian en las partes de crecimiento de las hojas de la papa, las cuales son cloróticas y pueden aparecer sin color (blancas); así mismo, favorece

la presencia de *Alternaria solani* y tiene un fuerte efecto sobre el rendimiento. La deficiencia de manganeso, primero se muestra en las hojas jóvenes un color verde tenue, posteriormente se muestra coloración amarilla con bronceado en el haz de las hojas superiores, más adelante es observada en plantas de papa como hojas afectadas de manera intervenal, con moteado que va del gris al negro que eventualmente se convierten en “parches” muertos. El exceso de Mn puede producir toxicidad. Los síntomas de deficiencia de Cu en la papa se presentan en las hojas jóvenes que se enrollan de forma muy pronunciada, de color y tamaño normal; con deficiencia de Zn, la papa muestra hojas jóvenes cloróticas, estrechas y en forma de copa, hacia arriba y desarrollan puntas quemadas, así como apariencia erecta en las plantas; la deficiencia de boro en la papa se manifiesta en la muerte de brotes, las plantas aparentan estar tupidas y tienen entrenudos cortos, hojas espesas y con enrollamiento hacia arriba, el tejido foliar se oscurece y colapsa; así mismo, la planta de papa puede mostrar una apariencia esférica, las raíces son cortas, apenas ramificadas, por lo que el sistema radicular es insuficiente para la absorción de todos los nutrientes; la deficiencia de molibdeno provoca que las hojas de plantas de papa se tornen amarillas o amarillo verdosas; en cuanto al cloro, su deficiencia provoca hojas jóvenes verde pálido que pueden enroscarse hacia arriba, además se reduce el rendimiento y el contenido de almidón en los tubérculos (Mulder y Turkensteen 2005).

2.7.3. Nutrición de la papa y enfermedades

Existe evidencia sobre la importancia de la nutrición en la respuesta de las plantas a las enfermedades (Huber, 1980; Velasco-Velasco, 1999); en papa se ha reportado el efecto del calcio sobre *Phytophthora erythroseptica* (pudrición rosada) en la variedad de papa Russet Norkotah (Benson *et al.*, 2009a); así como la importancia del pH (Benson *et al.*, 2009b) y del potasio sobre la reducción de infección en el tubérculo causada por *Phytophthora infestans* (Cooke y Little, 2001).

2.8. Sistemas hidropónicos y nutrición en papa

Se han comparado diferentes sistemas de cultivo (Muro *et al.*, 1997) a base de una mezcla de turba y arena con fertilización mineral y cultivo hidropónico con perlita y solución nutritiva; empleando para ello dos variedades de papa, Jaerla y Baraka. Utilizaron seis soluciones

basadas en las de Steiner y la de Coïc-Lesaint. Usando esas dos soluciones testigo, no hubo diferencias estadísticas en la producción. El uso de sistemas hidropónicos incrementó los rendimientos respecto al cultivo en el sustrato con base en la mezcla de turba y arena, para ambas variedades y se encontró mayor sanidad con el uso de perlita y solución nutritiva. No hubo significancia entre soluciones.

El sistema de película nutritiva o “nutrient film technique” se comparó con un sustrato de esferas de arcilla (Rolot y Seutin, 1999) y se estudió la producción de minitubérculos, en cinco variedades de papa; la solución nutritiva base (mg L^{-1}) fue $\text{N} = 180$, $\text{P} = 40$, $\text{K} = 300$, $\text{Ca} = 200$, $\text{Fe} = 3$, $\text{Mg} = 50$, $\text{Zn} = 0.1$, $\text{Cu} = 0.1$, $\text{Mo} = 0.05$, $\text{Mn} = 1$; con CE de 2.2 dS m^{-1} y pH de 5.8. La dosificación fue variable a través del tiempo. Encontraron que el sistema hidropónico redujo los costos de producción y hubo diferencias entre variedades. Al evaluar dos sistemas de cultivo para la producción de minitubérculos de papa, hidroponía y aeroponía (Ritter *et al.*, 2001) encontraron que las plantas en aeroponía mostraron mayor crecimiento vegetativo, retraso en la formación de tubérculos y un ciclo vegetativo largo. La producción en hidroponía produjo en promedio 65.3 g por planta, en cuatro meses; mientras que el sistema aeropónico tuvo una producción de 109.9 g por planta, en siete meses y después de ocho fechas de cosecha. Utilizaron una variedad muy utilizada en el País Vasco, Nagore y una solución nutritiva. Farran y Mingo-Castel (2006) cultivaron en aeroponía la variedad Zorba en dos diferentes densidades (60 y 100 plantas por m^2). La formación de tubérculos se aceleró cuando se redujo la aplicación de nitrógeno. Al utilizar la densidad de 60 plantas, el resultado fue significativamente mayor en la producción de minitubérculos por planta y por unidad de superficie. La solución nutritiva empleada tuvo las siguientes concentraciones (mEq L^{-1}): $\text{KNO}_3 = 0.4$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 = 3.1$, $\text{NH}_4\text{NO}_3 = 4.4$, $\text{KH}_2\text{PO}_4 = 4.4$, $\text{MgSO}_4 = 1.6$, así como un pH de 5.7. A los 60 días la concentración de NH_4NO_3 fue cambiada, de 4.4 a 3.1 mEq L^{-1} .

La producción de tubérculo semilla de las variedades de papa Monalisa y Ágata (Corrêa *et al.*, 2008), fue estudiada en tres experimentos: cultivo en camas, en macetas y en el sistema NFT, empleando una solución nutritiva del sistema hidropónico con la siguiente concentración (mg L^{-1}) $\text{NO}_3 = 160$, $\text{NH}_4^+ = 12$, $\text{P} = 42$, $\text{K} = 239$, $\text{Ca} = 152$, $\text{Mg} = 38.2$, $\text{S} = 40$, $\text{Fe} = 1.68$, $\text{Cu} = 0.24$, $\text{Mo} = 0.128$, $\text{Mn} = 1.25$, $\text{Zn} = 0.6$ y $\text{B} = 0.8$. La producción en

hidroponía siempre fue estadísticamente superior a la obtenida en los otros sistemas. Novella *et al.*, (2008) evaluaron el efecto de la concentración de soluciones nutritivas (Conductividad eléctrica) en el crecimiento y producción de minitubérculos en la variedad de papa Macaca; las conductividades eléctricas probadas fueron 1.0, 2.2, 3.4, 4.7 y 5.8 dS m⁻¹. La concentración de la solución nutritiva no afectó el número de tubérculos; sin embargo, al incrementar la concentración, el peso seco de los minitubérculos decreció. Bajas concentraciones de la solución nutritiva, cercana a 1.0 dS m⁻¹ puede ser usada para la producción hidropónica de minitubérculos. Corrêa *et al.* (2009), realizaron una revisión sobre la producción de semilla de papa en hidroponía en Brasil y encontraron que la sanidad de los tubérculos fue apropiada. La hidroponía se ha usado en muchos países. Las soluciones nutritivas reportadas, producto de diversos estudios señalan las siguientes concentraciones (mg L⁻¹) para los principales nutrientes esenciales: NO₃²⁺ (145 a 160), NH₄⁺ (12 a 29), P (40 a 42), K (239 a 295), Mg (11.2 a 40), S (40 a 64), Fe (1.68 a 2), Cu (0.05 a 0.24), Mo (0.05 a 0.032), Mn (1.0 a 1.28), Zn (0.3 a 0.6) y B (0.3 a 0.8). Los cultivares Monalisa y Ágata mostraron mejor respuesta en aeroponía que en los sistemas NFT y DFT (“deep flow technique”). Chang *et al.* (2011), evaluaron la respuesta de las variedades Superior (Maduración media-precoc), Haryeong (intermedia) y Jayoung (tardía) a cuatro niveles de Conductividad eléctrica (0.6, 1.2, 1.8 y 2.4 dS m⁻¹), utilizando una solución medianamente fuerte: N = 7.2, P = 2.1, K = 3.75, Ca = 2.75 y Mg = 1.75 me L⁻¹; así como Fe, Mn, B, Zn, Cu y Mo a 3.0, 0.5, 0.5, 0.05, 0.02 y 0.01 mg L⁻¹, respectivamente. Superior fue la variedad con mayor número de tubérculos por planta.

Chang *et al.* (2012), compararon tres sistemas hidropónicos (aeroponía, aerohidroponía y cultivo bajo el agua) para la producción de tubérculo semilla de papa. La aerohidroponía permitió que las raíces de la parte inferior de la planta se mantuvieran siempre en contacto con la solución nutritiva. Utilizaron las variedades Atlantic (medianamente tardía) y Superior (medianamente temprana). La solución (mEq L⁻¹) que emplearon en elementos mayores fue la siguiente: NO₃⁻ = 13.0, PO₄³⁻ = 4.2, SO₄²⁻ = 3.5, K⁺ = 7.5, Ca²⁺ = 5.5, Mg²⁺ = 3.5 NH₄⁺ = 1.4; así como elementos menores en las siguientes dosis (mg L⁻¹): Fe = 3.0, B = 0.5, Mn = 0.5, Zn = 0.5, Zn = 0.05, Cu = 0.02, Mo = 0.01, pH 5.9 – 6.3 y CE (dS m⁻¹) 1.0. El pH y la CE variaron entre sistemas y durante el tiempo; el pH tendió a aumentar, mientras que la CE

mostró reducción en los primeros 20 días después del trasplante, todo ello para los tres sistemas evaluados. La variedad Superior mostró mayor actividad radicular que Atlantic en los tres sistemas. Superior mostró estadísticamente mayor número de tubérculos por planta en el sistema de cultivo bajo el agua; sin embargo, fue significativamente inferior para el peso total de tubérculos por planta; es decir, más tubérculos, pero de menor tamaño. Atlantic mostró resultados similares.

El pH y la conductividad eléctrica de las soluciones nutritivas empleadas en sistemas hidropónicos son especialmente importantes para que los iones sean absorbidos por las raíces de las plantas, por ello se evaluó el potencial del método de espectroscopia infrarroja media (Fan *et al.*, 2012); la precisión del método fue satisfactoria y rápida para los macro elementos. Tierno *et al.* (2013), compararon diferentes métodos y variedades para la producción de semilla prebásica de papa; en el método de aeroponía utilizaron la siguiente solución nutritiva: pH = 5.8, CE = 1.8 mS cm⁻¹, NO₃⁺, SO₄²⁻, H₂PO₄⁻, Cl⁻, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, NH₄⁺, Na⁺ y micronutrientes, modificada de acuerdo con Rolot *et al.* (2002); citados por Tierno *et al.*, (2013). El sistema aeropónico presentó ventajas para variedades precoces como Zorba y Monalisa; no fue así para Agria. La aplicación de nutrientes nitrogenados en las soluciones empleadas en sistemas hidropónicos son costosas, por ello, es necesario usarlos en forma apropiada; Silva *et al.* (2013), suministraron dos fuentes de nitrógeno a tres variedades de papa (Ágata, Atlantic y Bintje) en un sistema hidropónico, las soluciones nutritivas solo se diferenciaron por el uso de nitrato de calcio o urea. La urea estimuló la acumulación de materia seca en el follaje, promoviendo competencia en la partición de fotoasimilados entre la parte aérea y los tubérculos. En el cv. Atlantic la urea aumentó el tamaño y contenido de proteínas del tubérculo (indeseable para la industria de hojuelas); aunque en las tres variedades hubo mayor acumulación de peso seco cuando se utilizaron fuentes nítricas. La absorción de macronutrientes por plantas de papa cv. Atlantic en invernadero fue estudiada por Coraspe-León *et al.* (2009), encontrando que la mayor demanda de nutrientes por el follaje de la papa ocurrió durante las primeras semanas de cultivo, en tanto que la de los tubérculos sucedió en las semanas finales, lo que coincide con la etapa de llenado de estos órganos del vegetal. La secuencia de acumulación máxima de los elementos mayores fue K>N>S>Ca>P>MG; en tanto, la partición y acumulación de materia seca fue evaluada para

dos variedades de papa, Russet Burbank (de ciclo intermedio) y Hilite Burbank (precoz); la partición de fotoasimilados fue similar en ambas variedades y el peso seco del tubérculo varió entre 76% y 86% y fue mayor para Hilite Burbank (Alva *et al.*, 2002).

La producción de semilla de papa en Latinoamérica ha sido discutida ampliamente (Ezeta, 2001) con énfasis en el control de la calidad fitosanitaria, mientras que el análisis técnico y económico de diferentes sistemas de producción de minitubérculos (Mateus-Rodríguez *et al.*, 2013) fue analizado, considerando que el precio es esencial para la viabilidad de estos sistemas. En Brasil se han realizado diversos estudios (Factor *et al.*, 2007; Cogo *et al.*, 2006; Medeiros *et al.*, 2002; Muller *et al.*, 2007), evaluando la producción hidropónica de semilla prebásica de papa; mientras que en México solamente se ha estudiado la densidad de población, la influencia de la radiación (Flores-López *et al.*, 2009b) y la influencia de productos de control (Flores-López *et al.*, 2011) y el efecto de nitrógeno, fósforo y potasio en cultivares de origen mexicano (Flores-López *et al.*, 2016); así como el crecimiento vegetativo de la papa y la influencia de la luz en la producción de tubérculos (Pérez-López *et al.*, 2013).

2.9. Variedades de papa usadas en México

De acuerdo con el SNICS (2019), en el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales 2018, los cultivares de papa que están autorizadas para la producción de semilla certificada se presentan en el Cuadro 1.

Existen recomendaciones sobre la nutrición y sistemas de cultivo para la papa; sin embargo éstas difieren de acuerdo con el país y los cultivares de papa de interés (Muro *et al.*, 1997; Rolot y Seutin, 1999; Corrêa *et al.*, 2009; Chang *et al.*, 2011); en este sentido, las variedades generadas por el Programa Nacional de Papa del INIFAP, no están incluidas en programas formales de producción de semilla, pero son requeridas por productores del país, en especial los del centro de la República Mexicana, debido a sus características de resistencia a enfermedades y adaptación a estas zonas; por ello es indispensable generar tecnología específica de producción de semilla Prebásica II de papa en clones y cultivares mexicanos.

Cuadro 1. Variedades de papa inscritas en el Catálogo Nacional de Variedades de Papa

Cultivar	Cultivar	Cultivar	Cultivar	Cultivar	Cultivar
Adelita	Corregidora	FL-1533	FL-2263	Mexiquense	Plata
Adora	Cristal	FL-1625	FL-795	Michoacán	Premier
Agria	Cuarzo	FL-1815	Frisca	Milagros	Ramona
Alpha	Diamante	FL-1833	Gigant	Modesta Blanca	Real 14
Antila	Epsilon	FL-1839	Granate	Mondial	Rosita
Atlantic	Escort	FL-1867	Herta	Montserrat	Rubí
Bayonera	Excel	FL-1879	Ireri	Morene	Snowden
Caesar	Felsina	FL-2020	Luipita	Nevada	Tollocan
Chipeta	Fianna	FL-2027	Malinche	Nieder	Vivaldi
Citlali	FL-1921	FL-2055	Marciana	Norteña	Zafiro
Clarion		FL-2101		Paz	

Fuente: SNICS (2018).

III. Objetivo General

Determinar la productividad de genotipos mexicanos de papa en función de la nutrición, con diferentes sustratos en sistema hidropónico e invernadero.

IV. Objetivos Específicos

- 4.1. Definir la dosis óptima de potasio en cultivo hidropónico para genotipos mexicanos de papa.
- 4.2. Definir la dosis óptima de calcio en cultivo hidropónico para genotipos mexicanos de papa
- 4.3. Precisar la productividad de genotipos mexicanos de papa en diferentes sustratos, en sistemas hidropónicos.
- 4.4. Establecer la dosis de nutrición apropiada para doce genotipos de papa mexicanos en sistema hidropónico e invernadero.

V. Hipótesis

El manejo de la nutrición en sistema hidropónico afecta de manera diferencial la productividad de los genotipos mexicanos de papa.

VI. Materiales y Métodos

Los experimentos de campo del presente estudio se llevaron a cabo bajo condiciones de invernadero en 2015 y 2016, en las instalaciones Programa de Papa del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, ubicadas en el km 4.5 de la carretera Toluca – Zitácuaro, Vialidad Adolfo López Mateos, Colonia San José Barbabosa, Zinacantepec, Estado de México.

Las características de manejo de cada experimento se detallan en los capítulos correspondientes.

VII. Resultados

Los siguientes capítulos muestran la secuencia de la investigación para cubrir los objetivos:

7.1. Capítulo 1. Respuesta del clon mexicano de papa 99-39 a potasio en hidroponía e invernadero.

7.2. Capítulo 2. Respuesta del clon mexicano de papa 99-39 a calcio en sistema hidropónico e invernadero.

7.3. Capítulo 3. Productividad de dos genotipos de papa en perlita y agregados en hidroponía e invernadero.

7.4. Capítulo 4. Productividad de doce genotipos mexicanos de papa en dos ciclos de cultivo con cuatro soluciones nutritivas, en sistema hidropónico e invernadero.

7.1. Capítulo 1. Respuesta del clon mexicano de papa 99-39 a potasio en hidroponía e invernadero.

inifap

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS



México
ISSN: 2007-0934

REVISTA MEXICANA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

Texcoco, Estado de México, 31 de mayo de 2018

M. en C. Francisco Xavier Flores Gutiérrez
Universidad Autónoma del Estado de México
Presente.

Por medio de la presente se hace constar que el manuscrito titulado: "**Respuesta del clon mexicano de papa 99-39 a potasio en hidroponía e invernadero**", del cual son autores (as): **Francisco Xavier Flores Gutiérrez, Román Flores López, Martha Elena Mora Herrera y Omar Franco Mora**, fue aceptado para ser publicado en el Vol. 9 Núm. 6, 2018 en la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente

DRA. DORA MA. SANGERMAN-JARQUÍN
EDITORA EN JEFA DE LA REVISTA
MEXICANA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

c.c.p. * Archivo
DMSJ/dmhs

Respuesta del clon mexicano de papa 99-39 a potasio en hidroponía e invernadero
Response of the Mexican clone of potato 99-39 to potassium in hydroponics and
greenhouse

Francisco Xavier Flores Gutiérrez¹

Román Flores López^{2§}

Martha Elena Mora Herrera³

Omar Franco Mora⁴

¹Programa en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Universidad Autónoma del Estado de México. Campus Universitario “El Cerrillo”, El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México. C. P. 50200. Tel. (722) 296 5529. Correo electrónico fxfloresg@uaemex.mx. ²Sitio Experimental Metepec. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Km. 4.5, Carretera Toluca-Zitácuaro, Vialidad Adolfo López Mateos, Col. San José Barbabosa, Zinacantepec, Estado de México. C.P. 51350. Tel: (55) 3871 8700 extensión 85638, correo electrónico flores.roman@inifap.gob.mx. ³Centro Universitario Tenancingo. Universidad Autónoma del Estado de México. Km. 1.5 Carretera Tenancingo-Villa Guerrero, Santa Ana Ixtlahuatzingo, Tenancingo, Estado de México. C.P. 52400. Tel. (714) 140 7724. Correo electrónico marthaelenam@gmail.com. ⁴Centro 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. C. P. 50200. Tel. (722) 296 5529. Correo electrónico 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⁻¹ 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⁻¹ 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⁻¹ 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

Abstract

In order to determine the effect and optimum dose of potassium in the production of minitubers of the Mexican clone of potato 99-39, experiments were established in July and September 2015, where concentrations of 0 (absolute control), 150, were tested. 250 (commercial control), 350, 450 and 550 mg L⁻¹ in nutrient solution in hydroponic system. The results indicated that the highest plant height and leaf area index were found in the treatments with the highest concentration of K. The dose of 350 mg L⁻¹ of K produced 19% more tubers with a diameter equal to or greater than 15 mm per plant. Than the commercial witness and 194% more than the absolute witness. The second order equation ($R^2= 0.94$) allowed us to estimate that the optimal dose for potato clone 99- 39 was 400 mg L⁻¹ potassium, which can produce up to 20.67 minitubers per plant. There was statistical significance in the interaction date x dose for tuber production per plant and for the harvest index, with higher production in July planting than in autumn winter season; conversely, it

was found that the harvest index was higher in the autumn-winter season. High concentrations of potassium during the whole crop cycle promoted the production of a greater number of tubers.

Keywords: *Solanum tuberosum*, nutritive solution, prebasic seed.

Reception date: June 2018

Acceptance date: August 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 nutrimento 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 fotoperiodo (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 nutrimento (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⁻¹ 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⁻¹ de K (146 mg L⁻¹) (Chang *et al.*, 2011), hasta 7.5 mEq L⁻¹ de K (292.5 mg L⁻¹) (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⁻¹ 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⁻¹. 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®, 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⁻¹. Se usaron macetas de 1.8 L, para una densidad de 36 plantas m⁻², 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⁻¹: 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⁻¹, donde 250 mg K L⁻¹ 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®, el índice de área foliar (IAF) se determinó con un Ceptómetro Lineal modelo LP-80AccuPAR®, 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⁻¹) 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⁻¹ 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⁻¹ 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⁻¹, el testigo comercial (250 mg L⁻¹ 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 hechas a los 40, 55, 70, 85 y 100 días después de la emergencia (DDE).

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

Valores promedio de dos ciclos de cultivo ± 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⁻¹ 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 ≥ 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-León *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⁻¹ 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⁻¹ de K, e igual que la dosis 550 mg L⁻¹; sin embargo, superó significativamente a las dosis de 0 y 150 mg L⁻¹. 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⁻¹ 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 ≥ 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⁻¹ de K inducirían en una producción estimada de 880 tubérculos ≥ 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⁻² 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 ≥ 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 $R^2 = 0.94$ (Figura 1), que al aplicarla arrojó una concentración óptima de 400 mg L^{-1} de K para la producción de 20.67 minitubérculos ≥ 15 mm de diámetro por planta; lo que equivale a 827 tubérculos por m^2 y a 827 mil tubérculos en $1\,000 \text{ m}^2$ 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

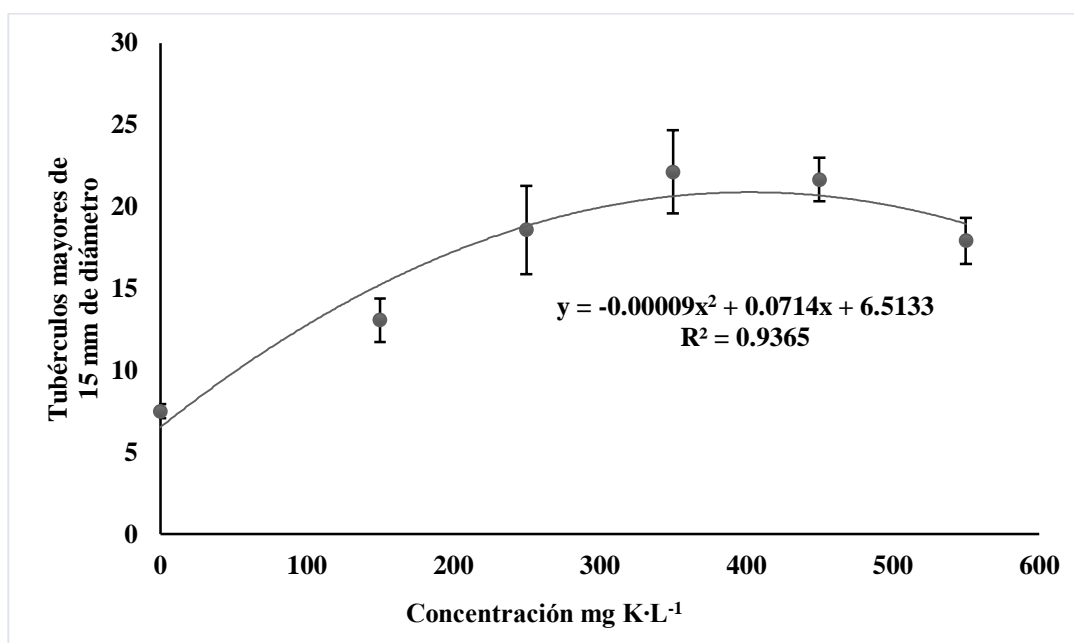


Figura 1. Curva de regresión lineal de segundo grado para la estimación de la concentración óptima de potasio para la producción de minitubérculos por planta del clon de papa 99-39, con diámetro ≥ 15 mm. Valores promedio \pm error estándar.

Peso fresco de tubérculos

Las dosis de 250 a 550 mg L^{-1} indujeron significativamente mayor peso fresco de tubérculos que los tratamientos de 150 mg L^{-1} 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⁻¹, respectivamente, mientras que con 150 mg L⁻¹ 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 R²= 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.

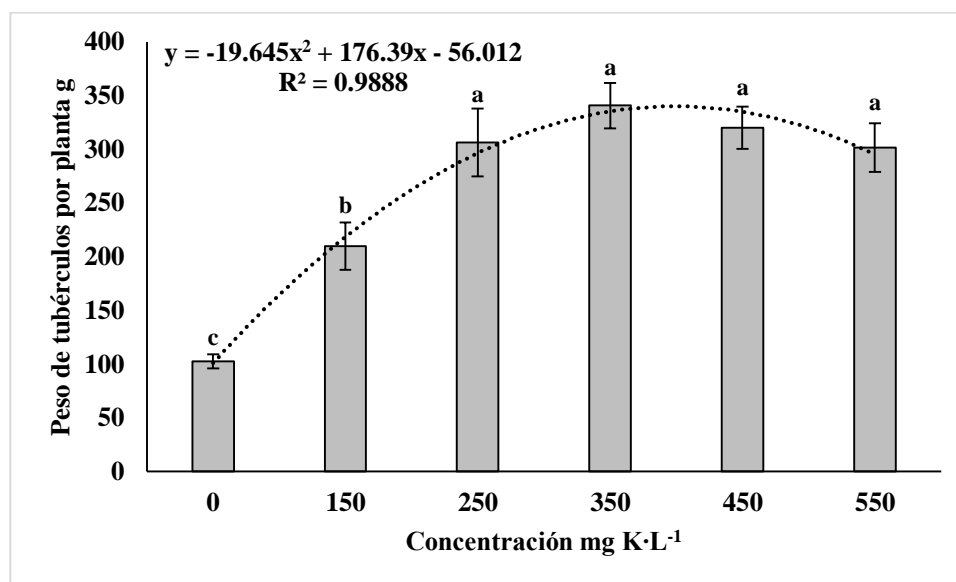


Figura 2. Efecto del potasio y curva de regresión en el rendimiento de peso fresco de tubérculos por planta del clon de papa 99-39. Promedio ± error estándar. Tukey (0.05).

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⁻¹, con 41.4, 45.9, 43.2 y 39.6 g, respectivamente y superiores a las dosis de 150 y 0 mg L⁻¹, 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⁻¹, 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⁻¹, respecto a la dosis de 150 mg L⁻¹; no obstante, las concentraciones de 450, 550, 150 y 0 mg L⁻¹ 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-León *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 mg L⁻¹, con 62 cm en la fecha 1 contra 49 cm en la fecha 2. El tratamiento con 0 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 ≥ 15 mm de diámetro, mostró valores estadísticamente superiores para las dosis de 450, 350 y 250 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 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 mg L⁻¹ 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 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 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 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 ≥ 15 mm del clon mexicano de papa 99-39 fue de 400 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/s 12230-011-9211-6.
- 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/s 11540-012-9208-7.
- 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 2nd 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.
- 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 apoplasmic to symplasmic 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.

7.2. Capítulo 2. Respuesta del clon mexicano de papa 99-39 a calcio en sistema hidropónico e invernadero.

Introducción.

El calcio es un elemento esencial en la productividad de las plantas, tiene influencia en la fotosíntesis, contenido de clorofila, estructura del cloroplasto, anatomía foliar, forma parte de las paredes de la célula, y es fundamental para mantener la integridad de la membrana celular Resh (2006). Así mismo, Beukema y Van der Zaag (1990) mencionan que este elemento es importante en la resistencia al manejo en los tubérculos de papa; es decir, una deficiencia de este elemento provoca que los tubérculos tengan una cutícula frágil, además de tender a producir mayor número de tubérculos pequeños. Debido a que la movilidad del calcio en las plantas es restringida, la deficiencia de este elemento generalmente es visible en las hojas más jóvenes que tienen poca transpiración y el calcio está asociado con la oclusión de los estomas; por ello, los puntos de crecimiento en la planta se torna de color amarillo (Bonilla, 2013; Mulder y Turkensteen, 2005); además, algunos de los mecanismos de adaptación y respuesta de la planta al ambiente, pueden tener cierta influencia del calcio (Bonilla, 2013).

Dado que el calcio es un elemento esencial en la nutrición de la papa (Arellano *et al.*, 2010), es necesario conocer la respuesta de los genotipos de papa a la nutrición con calcio; por ello, el objetivo del presente trabajo fue determinar la respuesta productiva del clon mexicano de papa 99-39 a la nutrición con calcio.

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, a los 19° 17' 28'' de latitud norte y a los 99° 42' 51'' de longitud oeste; a una altitud sobre el nivel del mar de 2,726 m, según el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2016).

Los experimentos se sembraron en invernadero y la temperatura diaria fue registrada con un termómetro Data logger HANNA modelo HII4ICH CE IP67®; 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 del clon avanzado de papa 99-39. Este genotipo es de ciclo intermedio a tardío, con cutícula y pulpa de color blanco con un potencial de rendimiento de hasta 80 t ha⁻¹ (Flores-López, comunicación personal). Se usaron macetas de 1.8 L, para una densidad de 36 plantas m⁻² y el sistema hidropónico se estableció con perlita grado hortícola como sustrato inerte y cintilla de riego para la suplementación de las soluciones nutritivas. Durante el desarrollo del cultivo se aplicaron fungicidas e insecticidas para el control preventivo de plagas y enfermedades. Las soluciones empleadas tuvieron las siguientes concentraciones de nutrimentos en mg L⁻¹: N = 200, P = 80, K = 350, Mg = 75, más microelementos; además de las concentraciones de calcio de 0 (testigo absoluto), 50, 100, 150, 250 y 350 miligramos por litro de agua.

Los experimentos se establecieron bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. La parcela experimental consistió de 16 macetas, de las que se muestrearon 10 al azar, 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.

Durante el desarrollo del cultivo se evaluó el índice de verdor (SPAD), con un SPAD-502 Konika Minolta®; el índice de área foliar (IAF) determinado con un Ceptómetro Lineal modelo LP-80AccuPAR®; 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). 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). 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.

La comparación del promedio de los dos experimentos para las variables altura de planta, índice de cosecha e índice de verdor se presenta en el Cuadro 1; al final del ciclo, los tratamientos 50 y 100 150 y 250 mg L⁻¹ de calcio mostraron estadísticamente ($P \leq 0.05$) la misma altura, pero la concentración 350 mg·L⁻¹ mostró la menor altura de planta a los 100 días de cultivo; el índice de área foliar fue relativamente bajo; sin embargo, el tratamiento sin calcio mostró menor desarrollo foliar durante el ciclo de cultivo, mientras el tratamiento de 100 mg L⁻¹ alcanzó mayor desarrollo foliar desde los 40 DDE y hasta los 100 DDE. En esta última fecha, los tratamientos mostraron un bajo índice de área foliar, debido a la pérdida de hojas basales en la senescencia del cultivo en general (Beukema y Van der Zaag, 1990). En el índice de verdor final el menor valor fue para la dosis de 350 mg L⁻¹, lo que pudiera deberse al exceso de calcio que provocaría una deficiencia en el balance con el magnesio y, por lo tanto, una menor cantidad de clorofila con el consecuente menor índice de verdor. Las parcelas del testigo absoluto, en las cuatro repeticiones y en los dos ciclos de cultivo, mostraron plantas con coloración amarilla en las hojas jóvenes de los sitios de crecimiento rápido, síntoma que concuerda con lo mencionado por Mulder y Turkensteen (2005) y Resh (2006), en relación con a la falta de este elemento en las plantas de papa.

Cuadro 1. Efecto del calcio 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 hechas a los 40, 55, 70, 85 y 100 días después de la emergencia (dde).

Variable	Tratamiento Mg L ⁻¹ Ca	dde				
		40	55	70	85	100
Altura de planta (cm)	0	18.9 ^{bc} *	34.6 ^b	42.3 ^b	45.6 ^b	43.9 ^{bc}
	50	18.4 ^c	35.0 ^b	47.5 ^a	53.0 ^a	49.8 ^a
	100	22.3 ^{ab}	39.5 ^a	47.9 ^a	50.3 ^a	47.8 ^{ab}
	150	22.8 ^a	37.5 ^{ab}	47.9 ^a	49.9 ^{ab}	47.9 ^{bc}
	250	23.5 ^a	37.9 ^{ab}	47.3 ^a	49.9 ^{ab}	46.3 ^{abc}
	350	24.5 ^a	38.8 ^a	48.1 ^a	51.6 ^a	43.5 ^c
Índice de área foliar	0	1.59 ^b	2.77 ^c	3.59 ^d	3.77 ^c	3.27 ^b
	50	1.52 ^{ab}	3.25 ^{ab}	4.39 ^{bc}	4.30 ^{bc}	3.61 ^{ab}
	100	1.81 ^a	3.55 ^a	5.09 ^a	5.03 ^a	3.83 ^a
	150	1.37 ^{bc}	2.96 ^{bc}	4.74 ^{abc}	4.61 ^{ab}	3.13 ^b
	250	1.33 ^{bc}	3.36 ^{ab}	4.96 ^{ab}	4.21 ^{bc}	3.53 ^{ab}
	350	1.19 ^c	3.38 ^{ab}	4.29 ^c	4.11 ^{bc}	3.17 ^b
Índice de verdor	0	43.9 ^{ab}	47.2 ^a	47.5 ^a	47.8 ^a	46.7 ^a
	50	46.5 ^a	47.4 ^a	45.3 ^a	47.7 ^a	45.3 ^a
	100	44.7 ^{ab}	47.2 ^a	47.6 ^a	44.5 ^a	45.7 ^a
	150	42.2 ^b	48.6 ^a	47.6 ^a	47.0 ^a	46.2 ^a
	250	42.3 ^b	47.0 ^a	46.5 ^a	44.6 ^a	46.2 ^a
	350	44.9 ^{ab}	47.4 ^a	46.2 ^a	49.4 ^a	45.1 ^c

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

En relación con la producción de tubérculos por planta no se encontraron diferencias marcadas entre tratamientos aunque, de manera general, parece haber una reducción en la producción del número y peso de tubérculos con dosis altas de calcio (Cuadro 2), probablemente por un antagonismo con el magnesio (Mulder y Turkensteen, 2005; Favela-Chávez *et al.*, 2006; Jones, 2012), que es componente estructural de la clorofila, por lo que podría presentar menor clorofila y producción de fotosintatos, con la consecuente reducción en la producción y peso de minitubérculos por planta.

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

Variable	Dosis mg L ⁻¹ Ca						CV (%)
	0	50	100	150	250	350	
No. de tubérculos < 15mm	11.7 ±1.2 ^{ab*}	14.5 ±1.3 ^a	11.9 ±0.6 ^{ab}	11.4 ±1.0 ^{ab}	11.1 ±0.7 ^b	10.5 ±1.0 ^b	18.9
No. de tubérculos ≥ 15mm	22.4 ±2.4 ^b	26.7 ±1.9 ^a	27.0 ±2.2 ^a	22.9 ±1.8 ^{ab}	23.1 ±2.9 ^{ab}	21.9 ±2.1 ^b	11.6
No. de tubérculos totales	34.2 ±2.6 ^{bc}	41.1 ±2.4 ^a	38.9 ±2.5 ^{ab}	34.3 ±2.7 ^{bc}	33.2 ±3.2 ^c	32.4 ±2.8 ^c	9.9
Peso fresco (g) tubérculos	267 ±30 ^{ab}	252 ±24 ^{ab}	313 ±32 ^a	253 ±28 ^{ab}	248 ±25 ^b	231 ±17 ^b	15.6
Peso seco (g) tubérculos	39.0 ±3.3 ^{ab}	33.4 ±3.4 ^b	42.6 ±4.2 ^a	35.7 ±3.2 ^{ab}	35.6 ±3.6 ^{ab}	32.8 ±2.0 ^b	13.7
Índice de cosecha	0.79 ±0.01 ^a	0.77 ±0.02 ^a	0.79 ±0.01 ^a	0.79 ±0.01 ^a	0.79 ±0.01 ^a	0.78 ±0.01 ^a	2.8

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

No obstante, resulta evidente que, a pesar de que la concentración testigo no evidenció reducciones serias en la productividad del clon 99-39 (Figura 1), sí es importante el efecto de amarillamiento en las plantas sin calcio, por lo que es indiscutible la necesidad de aplicación de este elemento esencial (Favela-Chávez *et al.*, 2006). La sintomatología de presenta en la Figura 2.

Los resultados obtenidos en este estudio corresponden a los aplicados en los trabajos señalados por Flores-López *et al.* (2016) y Flores-Gutiérrez *et al.* (2018) quienes utilizaron 200 y 100 mg L⁻¹ de calcio en pruebas de nutrición en genotipos de papa mexicanos y en evaluaciones de NPK y potasio, respectivamente. Por su parte, Coraspe-León *et al.* (2009) determinaron que la absorción de nutrientes en la producción de tubérculo-semilla de papa se acumula de la siguiente manera $K > N > S > Ca > P > Mg$, aplicando 120 mg L⁻¹ de calcio. Lo que concuerda con lo detectado en este trabajo, pues la mejor dosis de Calcio fue de 100 mg L⁻¹ (Figura 1).

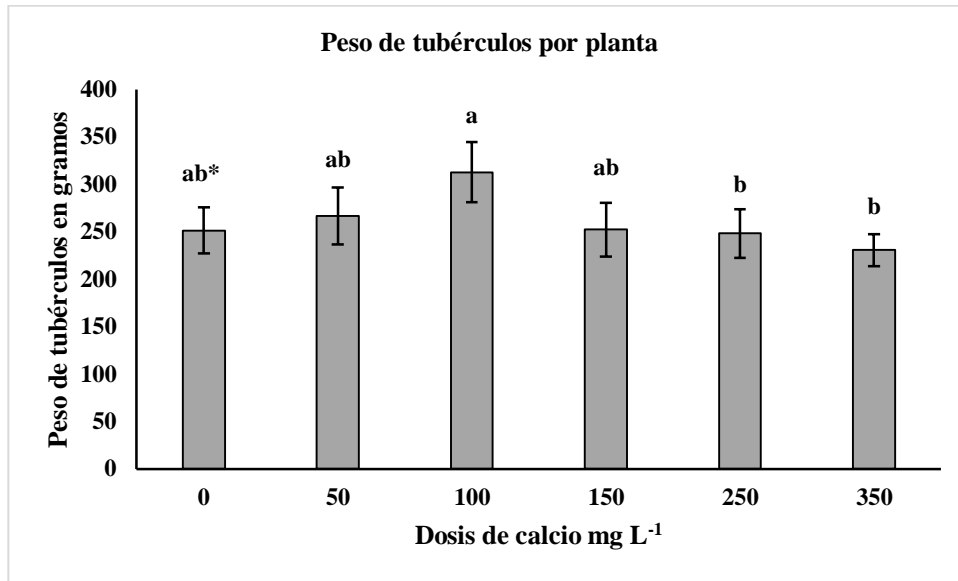


Figura 1. Peso fresco de tubérculos por planta del clon de papa 99-39, con diferentes dosis de calcio en la solución nutritiva, en dos ciclos de cultivo, en sistema hidropónico e invernadero. * Promedios con la misma letra no difieren estadísticamente $P < 0.05$, de acuerdo con la prueba de Tukey.



Figura 2. Síntomas de deficiencia de calcio en el tratamiento 0 mg L⁻¹ Ca en hojas jóvenes, comparadas con hojas sin deficiencia de este elemento, en plantas del clon de papa 99-39.

Considerando la sintomatología de la ausencia de calcio, en este trabajo se encontró que las dosis de 50, 100 y 150 mg L⁻¹ de este elemento esencial pueden ser suficientes para el clon mexicano de papa 99-39.

En la interacción fecha de cultivo x dosis de calcio (Figura 3) sobresalió la dosis de 100 mg L⁻¹ de calcio y únicamente para el período julio a octubre, en cuanto al peso de tubérculos por planta, situación muy parecida al número de tubérculos por planta (Figura 4).

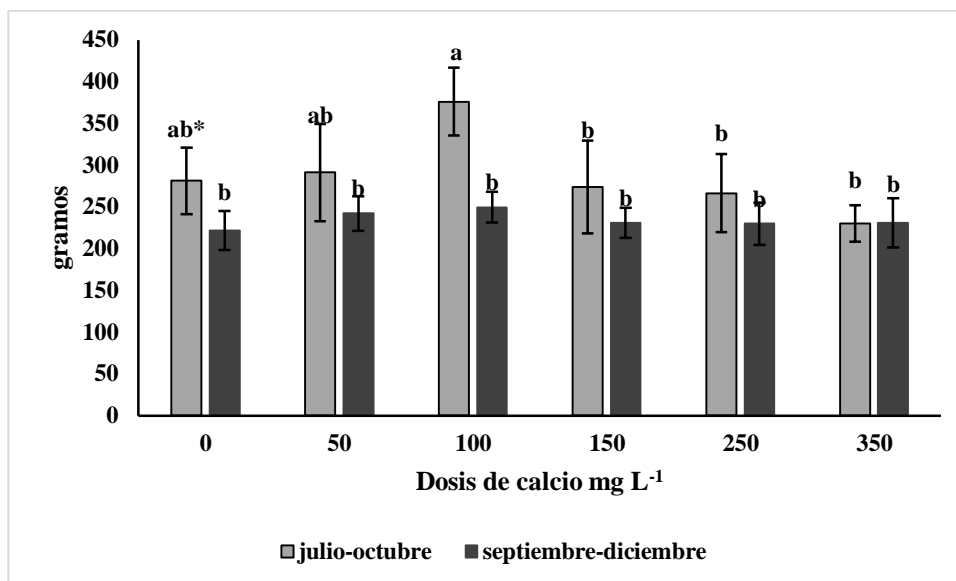


Figura 3. Peso fresco de tubérculos por planta en la interacción fecha de cultivo x dosis de calcio, en el clon mexicano 99-39, en sistema hidropónico e invernadero. * Promedios con la misma letra no difieren estadísticamente $P < 0.05$, de acuerdo con la prueba de Tukey.

Así mismo, se puede observar en la Figura 4 que no se presentaron diferencias estadísticas marcadas entre la dosis de 0, 50 y 100 mg L⁻¹ de calcio en el ciclo de cultivo julio a octubre (que coincide con el período de producción en la zona centro de la República Mexicana); no así en el periodo septiembre a diciembre, donde las temperaturas se tornan menos apropiadas para la producción de papa en la zona donde se realizó este trabajo (Flores-López *et al.*, 2014).

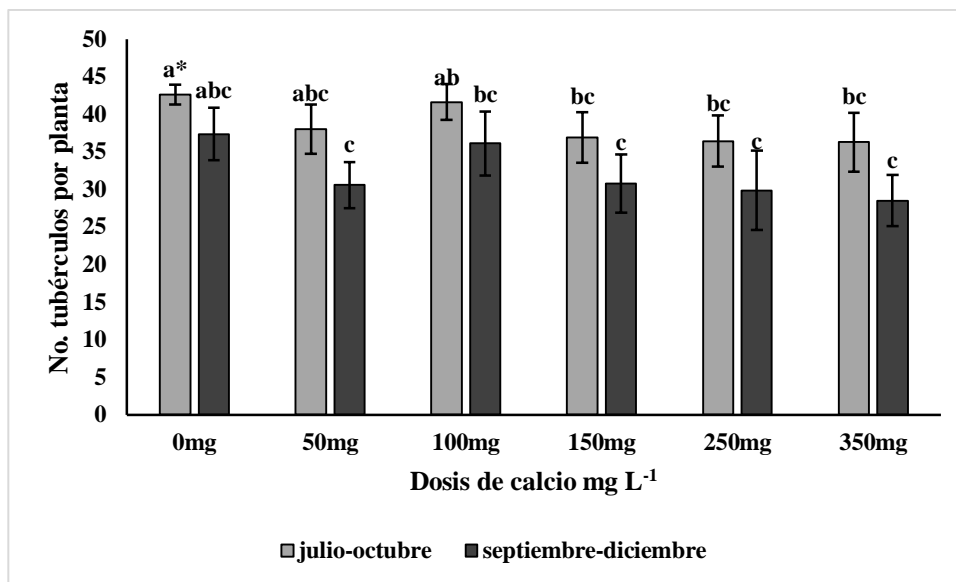


Figura 4. Número de tubérculos por planta en la interacción fecha de cultivo x dosis de calcio, en el clon mexicano 99-39, en sistema hidropónico e invernadero. * Promedios con la misma letra no difieren estadísticamente $P < 0.05$, de acuerdo con la prueba de Tukey.

Conclusiones

Las dosis de calcio entre 50 y 150 mg·L⁻¹ mostraron la mejor respuesta en el promedio de dos ciclos de cultivo.

El testigo absoluto mostró amarillamiento de las hojas jóvenes y necrosis en los bordes.

La respuesta a la estación de cultivo se presentó y mostró mayor producción en el ciclo julio a octubre en este genotipo en estudio.

Literatura citada

- Bonilla, I. 2013. Introducción a la nutrición mineral en las plantas. Los elementos minerales. En; Ascón-Bieto, J. y Talón, M. Coordinadores. Fundamentos de Fisiología Vegetal 2ª Edición. Mc. Graw Hill. España. pp 103-121.
- Beukema, H. P. and Van der Zaag, D. E. 1990. Introduction to potato production. Wageningen. Centre for Agricultural Publishing and Documentation (PUDOC III).

- Coraspe-León, H. M.; Muraoka, T.; Franzini, V. I.; y do Prado G. N. 2008. Nitrógeno y potasio en solución nutritiva para la producción de tubérculos-semilla de papa. *Agronomía Tropical* 58 (4): 417-425.
- 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.
- Favela-Chávez, E.; Preciado-Rangel, P.; Benavides-Mendoza, A. 2006. Manual para la preparación de soluciones nutritivas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, México. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Flores-Gutiérrez, F. F., Flores-López, R., Mora-Herrera, M. E., y Franco-Mora, O. 2016. Respuesta del clon mexicano de papa 99-39 a potasio en hidroponía e invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9 (6): 1123-1135.
- Flores-López, R.; Sánchez del Castillo, F.; Rodríguez- Pérez, J. R.; Colinas-León, M. T; Mora-Aguilar, R. y Lozoya-Saldaña, H. 2009. Densidad de población en cultivo hidropónico para la producción de tubérculo-semilla de Papa (*Solanum tuberosum* L.). *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 3: 251-258.
- Flores-López, R.; Rubio-Covarrubias, O. A. y Sotelo-Ruiz, E. D. 2014. Manual de producción de papa apta para siembra en invernaderos rústicos. Manual Técnico Núm. 1. Sitio Experimental Metepec, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México.
- Flores-López, R.; Sotelo-Ruiz E.; Rubio-Covarrubias, O.; Álvarez-González, A. y Marín-Casimiro, M. 2016. Niveles de NPK para la producción de minitubérculos de papa en invernadero en el Valle de Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7 (5): 1131-1142.
- Jones, J. B. 2012. Plant nutrition and soil fertility manual. 2nd ed. CRC Press. New York, USA.
- Martínez-Garza, Á. 1996. Diseños Experimentales: métodos y elementos de teoría. Editorial Trillas. México.
- Mulder, A. and Turkensteen, L. 2005. Potassium deficiency. In: Mulder, A. and Turkensteen, L. (Eds.) *Potato diseases: diseases, pests and defects* (pp 209-2011). NIVAP, Holland.
- Resh, H. M. 2006. Cultivos hidropónicos. Ediciones Mundi-Prensa. España. 558 p.

SMN. 2016. Servicio Meteorológico Nacional. Comisión Nacional del Agua. Observatorio Meteorológico 76675. Centro de Previsión Meteorológica Toluca. Recuperado de www.smn.cna.gob.mx/emas/txt/mx40_10M.TXT.

7.3. Capítulo 3. Productividad de dos genotipos de papa en perlita y agregados en hidroponía invernadero.

México
ISSN: 2007-0934

Texcoco, Estado de México, 19 de junio de 2019.
Ref. 1936-19

M. C. Francisco Xavier Flores Gutiérrez
Universidad Autónoma del
Estado de México
Presente

Por este medio le agradezco y acuso de recibido su manuscrito intitulado: **“Productividad de dos genotipos mexicanos de papa en perlita y agregados en hidroponía e invernadero.”** cuyos autores (as) son: **Francisco Xavier Flores Gutiérrez, Román Flores López, Martha Elena Mora Herrera y Omar Franco Mora**, que fue enviado para su posible publicación a la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Le notificamos que el texto inicial del manuscrito, autores(as) principal, coautores(as) y autor(a) para correspondencia no podrán alterarse y quedarán como se envía en esta versión.

Asimismo, me permito informarle que su contribución será sometida a revisión técnica por los árbitros que se designen en caso de ser aceptado, se le notificará sobre las observaciones correspondientes.

Agradezco su colaboración y le envío un cordial saludo.

Atentamente

DRA. DORA MA. SANGERMAN-JARQUÍN
EDITORA EN JEFA DE LA REVISTA
MEXICANA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

c.c.p. * Archivo
DMSJ/gtg

Carretera Los Reyes-Texcoco, km 13.5. Coatlincán, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56250
E-mail: revista_atm@yahoo.com.mx. Tel. 01 800 088 2222 Ext. 85353

Productividad de dos genotipos mexicanos de papa en perlita y agregados en hidroponía e invernadero

Productivity of two Mexican potato genotypes in perlite and aggregates in hydroponic and greenhouse

Francisco Xavier Flores Gutiérrez¹

Román Flores López^{2§}

Martha Elena Mora Herrera¹

Omar Franco Mora³

¹Programa 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). ²Sitio 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. ³Centro 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 objetivo de determinar la respuesta productiva de dos genotipos de papa mexicanos en dos sustratos en sistema hidropónicos de cultivo, se establecieron tres experimentos con perlita grado hortícola y con la mezcla de perlita con turba 1:1 v/v (agregados); por lo que se establecieron experimentos en los ciclos otoño 2015, primavera 2016 y verano 2016. Con perlita, la variedad Citlali y el clon 99-39, produjeron en promedio 15.92 y 34.25 tubérculos

por planta, respectivamente; en agregados produjeron 11.92 y 15.42 tubérculos por planta, respectivamente. El genotipo 99-39 superó a Citlali hasta en 10.9 tubérculos por planta en promedio de los tres ciclos de cultivo; y produjo 2.2 veces más tubérculos en otoño que en primavera, así como 2.9 más tubérculos en otoño que en verano. Citlali produjo 3.6 veces más tubérculos en otoño que en verano y cinco veces más en otoño que en primavera. El sustrato más eficiente fue perlita grado hortícola, el clon 99-39 resultó más productivo que la variedad Citlali, la producción de tubérculos en ambos genotipos se vio afectada estrechamente por la estación del año y los resultados permitirán tomar decisiones sobre el manejo de la producción de semilla prebásica II en ambos genotipos.

Palabras clave: tubérculo semilla prebásica II, perlita, agregados.

Abstract

In order to determine the productive response of two Mexican potato genotypes in two substrates in hydroponic culture system, three experiments were established with horticultural grade perlite and with the mixture of perlite with peat 1: 1 v / v (aggregates); therefore, experiments were established in the cycles of autumn 2015, spring 2016 and summer 2016. With perlite, the Citlali variety and the clone 99-39, produced on average 15.92 and 34.25 tubers per plant, respectively; in aggregates they produced 11.92 and 15.42 tubers per plant, respectively. The genotype 99-39 increased Citlali up to 10.9 tubers per plant in average of the three growing cycles; and produced 2.2 times more tubers in autumn than in spring, as well as 2.9 more tubers in autumn than in summer. Citlali produced 3.6 times more tubers in autumn than in summer and five times more in autumn than in spring. The most efficient substrate was perlite horticultural grade, the clone 99-39 was more productive than the Citlali variety, the production of tubers in both genotypes was affected closely by the season of the year and the results will allow to make decisions on the management of the production of prebasic seed II in both genotypes.

Key words: prebasic seed tuber II, perlite, aggregates.

Introducción

La producción de minitubérculos de papa en invernadero tiene como objetivo el incremento de material de propagación con alta calidad fitosanitaria (Struik, 2007), y el esquema formal de producción de semilla de papa en México considera una etapa de multiplicación en invernadero, donde se produce la categoría prebásica II, descrita en la Norma Oficial Mexicana NOM-041-FITO-2002 (SENASICA, 2015) y corresponde a minitubérculos obtenidos de plántulas o de minitubérculos libres de plagas y enfermedades, incrementados en condiciones apropiadas para conservar su grado de pureza, calidad fitosanitaria y características fisiológicas adecuadas. La turba es el principal sustrato utilizado por los agricultores productores de semilla de papa en la categoría prebásica II en México (Arellano-García *et al.*, 2010; Patrón-Ibarra, 2014; Flores-López *et al.*, 2014); no obstante, Flores López *et al.* (2016) mencionan otros sustratos orgánicos en la producción de minitubérculos, como la fibra de coco, cascarilla de arroz e inorgánicos como el tezontle, perlita, arena y gravas; las mezclas de sustratos orgánicos e inorgánicos son llamados agregados (Resh, 2006). Los sistemas hidropónicos son una alternativa para la producción de minitubérculos en condiciones controladas (Lommen, 2007) y existen alternativas al uso de suelo en diferentes (Wheeler *et al.*, 1990; Farran y Mingo Castel, 2006; Corrêa *et al.*, 2009; Chang *et al.*, 2011; Chang *et al.*, 2012; Mateus-Rodríguez *et al.*, 2013).

La comparación de sistemas de producción de minitubérculos en invernadero se ha reportado por Muro *et al.* (1997), Medeiros *et al.* (2002), Tierno *et al.* (2013); además, Lommen (2007) señala que las técnicas hidropónicas para la producción de minitubérculos tienen menor riesgo de presencia de patógenos presentes en el suelo o sustrato orgánico como turba, aserrín, fibra de coco, cascarilla de arroz, entre otros; asimismo, pueden ser usados solos o en mezclas (agregados) en distintas proporciones volumen/volumen (v:v). Los sustratos inertes y orgánicos actúan como anclaje de las raíces y como reservorio de la solución nutritiva; la agricultura hidropónica tiene como base el cultivo con o sin suelo, en diferentes clasificaciones (Urrestarasu, 2013); asimismo, la respuesta varietal a los sistemas

hidropónicos y sustratos no es consistente, todo lo contrario, es diversa y se presentan diferencias e interacciones sistema-variedad y sustrato-cultivar (Muro *et al.*, 1997; Corrêa *et al.*, 2008; Tierno *et al.*, 2013). Los cultivos en invernadero permiten, además, reducir el efecto de plagas y enfermedades (Adams, 2004), requisito indispensable para la producción de semilla prebásica II de papa; no obstante, es necesario considerar la disponibilidad de sustratos y la esterilización adecuada de este recurso.

En México, las mezclas de sustratos orgánicos se emplean con éxito en la producción de minitubérculos de papa (Rubio-Covarrubias *et al.*, 2000; Arellano-García *et al.*, 2010). El sistema hidropónico abierto, se ha evaluado y usado por Rolot y Seutin (1999), Ritter *et al.* (2001), Corrêa *et al.* (2008) con respuestas variables, respecto a otros sistemas cerrados. Flores-López *et al.* (2016) reportaron el efecto de la nutrición en la producción de minitubérculos de clones avanzados del programa de papa del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en sistema abierto de hidroponía y con perlita grado hortícola y dada la respuesta diferencial de los cultivares de papa en sistemas hidropónicos en invernadero, el objetivo del presente trabajo fue determinar la productividad de dos genotipos de papa en la producción de minitubérculos con dos sustratos en sistema hidropónico.

Materiales y métodos

Tres experimentos con dos sustratos de cultivo y dos genotipos mexicanos de papa se establecieron en los ciclos otoño-invierno el día 10 de noviembre de 2015 (otoño), primavera-verano el día 30 de marzo de 2016 (primavera) y en el ciclo verano-otoño, el día 26 de agosto de 2016 (verano); en invernaderos e instalaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, ubicadas con referencia geográfica de 10°17'28'' latitud norte y 99°42'51'' longitud oeste (SMN, 2017) y clima templado con lluvias en verano, con precipitación entre 800 y 1 000 mm; a una altitud de 2 726 m, de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2009).

Los sustratos evaluados fueron perlita grado hortícola y el testigo comercial, una mezcla de perlita grado hortícola y turba en una relación 1:1 v/v, al que se le denominará agregados en este estudio; todo en sistema hidropónico. Se utilizaron macetas de 1.8 L, empleando un sistema de riego por cintilla y goteros cada 15 cm, para mantener la humedad y distribuir la solución nutritiva. La densidad de población fue de 36 plantas por metro cuadrado y se programaron 10 riegos por día en el sustrato perlita y en agregados se suministró la solución nutritiva cada dos días, como se hace en forma comercial. Durante el desarrollo del cultivo se aplicaron fungicidas e insecticidas para el control preventivo de plagas.

Los materiales mexicanos de papa fueron el clon 99-39 de cutícula blanca, forma oblonga y pulpa crema, de ciclo semi tardío; y la variedad Citlali, de cutícula roja, forma redonda y pulpa amarilla, de ciclo precoz. La solución nutritiva empleada fue N=200, P=80, K=350, Ca=100 mg·L⁻¹, más microelementos (Flores-Gutiérrez *et al.*, 2018 y Flores-López *et al.*, 2009). La temperatura del invernadero se registró con un termómetro Data logger HANNA modelo HII4ICH CE IP67®; en el ciclo otoño-invierno la temperatura media fue de 15°C, con una máxima de 35°C y mínima de -2°C; en el ciclo primavera-verano la temperatura media fue de 22°C, con una máxima de 46°C y la mínima de 8°C; mientras que en ciclo verano-otoño la media fue de 20°C, con una máxima de 40°C y la mínima de 4°C. Los tubérculos empleados fueron seleccionados con un diámetro entre 15 y 18 mm, libres de enfermedades y un solo brote, se sembraron a 10 cm de profundidad, en la misma fecha, para ambos sustratos.

Los experimentos se establecieron bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones anidadas en los sistemas y el análisis estadístico se realizó como una serie de experimentos en el que se probó la significancia de los ciclos, los sistemas de cultivo, los clones de papa y la interacción entre ellos; cuando la prueba de F del análisis de varianza mostró diferencias estadísticas, se aplicó la prueba de Tukey (DMSH) a un nivel de significancia de 0.05.

Las variables de estudio fueron: valores SPAD, medición que se realizó con un SPAD-502 Konica Minolta®, índice de área foliar (IAF), determinación que se efectuó con un

Ceptómetro Lineal modelo LP-80AccuPAR® y altura de planta; estas tres mediciones se realizaron a los 30, 60 y 90 días después de la siembra (dds). A la cosecha se evaluó el número de tubérculos menores de 15 mm de diámetro por planta, el número de tubérculos iguales o mayores de 15 mm de diámetro por planta, el número y peso de tubérculos totales por planta, el peso seco de tubérculos por planta, el peso seco total por planta y el índice de cosecha. Para determinar estos valores se muestrearon ocho plantas con competencia completa de cada sistema y repetición y para estimar el peso seco se empleó una estufa de secado de muestras a una temperatura de 75°C, hasta obtener peso constante (Flores-López *et al.*, 2009). Las determinaciones estadísticas se realizaron con el paquete estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2015).

Resultados y discusión

Valores SPAD, índice de área foliar y altura de planta

El índice de verdor (SPAD) de los genotipos resultó relativamente constante para cada uno de los clones a través del ciclo de cultivo y en las tres épocas de siembra; en general, la variedad Citlali tuvo valores SPAD estadísticamente superiores ($P \leq 0.05$) a los registrados para el clon 99-39; lo cual es debido a las características fenotípicas de ambos cultivares, Citlali tiene coloración verde más intensa en su follaje (46.25^a, 46.96^a y 46.96^a) que la tonalidad del clon 99-39 (44.68^b, 44.85^b y 44.41^b); en el análisis combinado. En el Cuadro 1 se muestran los valores del índice de verdor para la interacción ciclo x sustrato x genotipo; en tanto que el análisis combinado indicó valores SPAD superiores en el sustrato perlita que en agregados, a los 90 días después de la siembra, en promedio (Cuadro 2); este resultado probablemente se debió a que el suministro de nutrientes fue constante en perlita, mientras que en agregados se proporcionó cada dos días, con valores de 46.79^a para perlita y 43.48^b para agregados.

Cuadro 1. Promedios de valores SPAD en la interacción ciclo x sustrato x genotipo a los 30, 60 y 90 días después de la siembra. Dos genotipos, dos sustratos y tres épocas de cultivo.

Ciclo	Sustrato	Genotipo	Índice de verdor (SPAD)		
			30 dds	60 dds	90 dds
Otoño-invierno	Perlita	Clon 99-39	47.0 ^{bc}	46.3 ^{abc}	47.4 ^{ab}
		Citlali	45.8 ^{bcd}	47.3 ^{ab}	47.4 ^{ab}
	Agregados	Clon 99-39	47.4 ^b	47.5 ^{ab}	49.9 ^{abc}
		Citlali	52.5 ^a	50.7 ^a	51.5 ^a
Primavera-verano	Perlita	Clon 99-39	45.8 ^{bcd}	46.6 ^{abc}	44.7 ^{bcd}
		Citlali	47.5 ^b	47.5 ^{ab}	47.2 ^{ab}
	Agregados	Clon 99-39	43.0 ^{cde}	43.7 ^{bc}	41.4 ^{cde}
		Citlali	42.7 ^{de}	43.5 ^{bc}	42.8 ^{bcd}
Verano-otoño	Perlita	Clon 99-39	47.7 ^b	44.0 ^{bc}	46.0 ^{abcd}
		Citlali	47.9 ^b	50.1 ^a	48.0 ^{ab}
	Agregados	Clon 99-39	37.3 ^f	41.1 ^c	40.0 ^e
		Citlali	51.2 ^{ef}	42.8 ^{bc}	40.7 ^{de}

* = Valores con distinta letra son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$) de acuerdo con la prueba de Tukey.

El promedio del índice de área foliar de los dos genotipos no resultó estadísticamente diferente, en el análisis combinado a través del ciclo de cultivo; no obstante, cuando se compararon los sustratos evaluados, el valor del IAF en perlita fue superior ($P \leq 0.05$) en perlita (5.96^a) que en agregados (4.67^b), a los 90 dds (Cuadro 1). En el Cuadro 3 se presenta la respuesta de los genotipos en las tres épocas de cultivo, es evidente que el primavera-verano, cuando la temperatura promedio fue mayor (22°C) las plantas de ambos materiales genéticos mostraron mayor área foliar, en especial cuando se sembraron en perlita.

Cuadro 2. Análisis combinado. Se muestran valores promedio \pm error estándar de la media y diferencias estadísticas para las principales variables evaluadas en dos genotipos mexicanos de papa en dos sustratos y tres ciclos de cultivo.

Variable	Promedio por planta \pm error estándar		Coeficiente de variación %	Tukey (0.05)
	Perlita	Agregados (turba + perlita)		
Valores SPAD 90 dds**	46.79 ^{a*} \pm 0.36	43.88 ^b \pm 0.96	4.73	0.94
IAF 90 dds	5.96 ^a \pm 5.88	4.67 ^b \pm 0.31	6.41	0.33
Altura de planta 90 dds	80.08 ^a \pm 0.00	55.96 ^b \pm 0.00	7.23	2.98
Tubérculos < 15 mm	3.88 ^a \pm 0.41	1.88 ^b \pm 0.24	32.28	0.55
Tubérculos \geq 15 mm	25.08 ^a \pm 3.27	13.67 ^b \pm 2.18	11.23	1.56
Tubérculos totales	29.00 ^a \pm 3.47	15.46 ^b \pm 2.33	8.56	1.91
Por planta				
Peso fresco de tubérculos por planta	236.05 ^a \pm 21.6	169.58 ^b \pm 12.0	10.15	8.72
Peso seco de tubérculos por planta	31.36 ^a \pm 2.81	25.82 ^b \pm 2.55	10.21	2.03
Peso seco total por planta	41.97 ^a \pm 4.11	33.73 ^b \pm 3.64	17.43	3.56
Índice de cosecha	0.76 ^a \pm 0.01	0.77 ^a \pm 0.01	2.86	0.02

* = Valores con distinta letra son estadísticamente diferentes ($P < 0.05$) de acuerdo con la prueba de Tukey. ** = días después de la siembra

Cuadro 3. Promedios de índice de área foliar en la interacción ciclo x sustrato x genotipo a los 30, 60 y 90 días después de la siembra. Dos genotipos, dos sustratos y tres épocas de cultivo.

Ciclo	Sustrato	Genotipo	Índice de área foliar		
			30 dds	60 dds	90 dds
Otoño-invierno	Perlita	Clon 99-39	2.57 ^{bc}	4.70 ^{abcd}	5.79 ^{bcd}
		Citlali	1.82 ^c	3.66 ^{de}	5.61 ^{cd}
	Agregados	Clon 99-39	2.56 ^{bc}	3.99 ^{cde}	6.05 ^{bc}
		Citlali	1.82 ^c	3.52 ^{de}	5.58 ^{cd}
Primavera-verano	Perlita	Clon 99-39	3.10 ^b	4.58 ^{abcd}	6.53 ^b
		Citlali	2.85 ^{bc}	5.15 ^{abc}	7.65 ^a
	Agregados	Clon 99-39	2.45 ^{bc}	4.25 ^{bcd}	5.38 ^{cd}
		Citlali	2.55 ^{bc}	4.55 ^{abcd}	5.70 ^{bcd}
Verano-otoño	Perlita	Clon 99-39	4.63 ^a	5.63 ^a	5.13 ^d
		Citlali	2.63 ^{bc}	3.08 ^e	2.60 ^e

* = Valores con distinta letra son estadísticamente diferentes ($P < 0.05$) de acuerdo con la prueba de Tukey.

La altura de planta tuvo respuesta diferencial para los genotipos; el clon 99-39 tuvo altura promedio de 31^a, 55^a y 72^a cm, contra 28^b, 50^b y 64^b cm, a los 30, 60 y 90 días después de la siembra (Cuadro 4); esa longitud, en centímetros, fue superior estadísticamente ($P \leq 0.05$) cuando el cultivo se hizo en perlita (80^a) que cuando se efectuó en agregados (56^b), de acuerdo con los resultados del análisis combinado mostrado en el Cuadro 1. Tanto el índice de área foliar, como la altura de planta fueron estadísticamente superiores en perlita, respecto a los valores registrados en la mezcla de sustratos, probablemente debido a la frecuencia de suministro de la solución nutritiva.

Cuadro 4. Promedios de altura de planta en la interacción ciclo x sustrato x genotipo a los 30, 60 y 90 días después de la siembra. Dos genotipos, dos sustratos y tres épocas de cultivo.

Ciclo	Sustrato	Genotipo	Altura de planta (cm)		
			30 dds	60 dds	90 dds
Otoño-invierno	Perlita	Clon 99-39	32.5 ^{abc}	48.3 ^c	66.0 ^d
		Citlali	35.0 ^{ab}	43.0 ^{cd}	53.8 ^{de}
	Agregados	Clon 99-39	21.8 ^{cd}	41.0 ^{cde}	52.3 ^e
		Citlali	18.0 ^d	36.8 ^{de}	45.8 ^e
Primavera-verano	Perlita	Clon 99-39	37.3 ^a	85.5 ^a	133.8 ^a
		Citlali	31.5 ^{abc}	77.0 ^{ab}	120.0 ^b
	Agregados	Clon 99-39	33.0 ^{ab}	77.3 ^{ab}	97.0 ^c
		Citlali	29.0 ^{abc}	71.5 ^b	85.0 ^c
Verano-otoño	Perlita	Clon 99-39	38.3 ^a	46.8 ^d	53.8 ^{de}
		Citlali	29.5 ^{abc}	45.5 ^{cd}	43.3 ^{de}
	Agregados	Clon 99-39	25.5 ^{bcd}	30.3 ^{ef}	29.8 ^f
		Citlali	24.5 ^{bcd}	23.8 ^f	26.0 ^f

* = Valores con distinta letra son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$) de acuerdo con la prueba de Tukey.

Producción de tubérculos por planta

De manera general, hubo mayor producción de la papa cuando se cultivó en perlita grado hortícola para ambos cultivares (Cuadro 2). El número de tubérculos menores de 15 mm de diámetro no mostró diferencias estadísticas entre ciclos de producción, pero sí hubo efecto de genotipo, ya que el clon 99-39 produjo, en promedio, 3.8^a minitubérculos y la variedad Citlali 2^b. En la interacción ciclo x sustrato, se produjeron más tubérculos pequeños en perlita que en agregados, considerando los tres ciclos. El hecho de que en perlita la planta produjo

más tubérculos de diámetro menor a 15 mm, probablemente se debió a la disponibilidad de nutrientes de forma continua, lo que se cuantificó con el número de tubérculos totales por planta. lo anterior coincide con lo señalado por Minhas *et al.* (2004), quienes reportan mayor producción de tubérculos a mayor disponibilidad de asimilados.

Los genotipos cultivados en perlita grado hortícola, en sistema hidropónico, produjeron en promedio, 25.08 tubérculos iguales o mayores de 15 mm de diámetro por planta, cifra 83% más alta que la registrada en el sustrato agregados (13.67 tubérculos), lo que coincide con lo reportado por Adams (2004), quien reporta que los rendimientos son menores en sustratos orgánicos que en sustratos inorgánicos en hidroponía; además de considerar el suministro continuo de la solución nutritiva en el sustrato perlita y el abastecimiento de nutrientes cada dos días en el sustrato agregados. El clon 99-39 tuvo una productividad por planta de 24.83 minitubérculos mayores de 15 mm de diámetro, rendimiento estadísticamente superior ($P \leq 0.05$) al obtenido por la variedad Citlali con 13.92 tubérculos por planta; todo ello, en promedio de los tres ciclos y dos sustratos.

Por otro lado, se produjeron más minitubérculos de tamaño igual o mayor a 15 mm de diámetro en el ciclo otoño-invierno 35.06^a, respecto a lo obtenido en primavera-verano (12.00^b) y verano-otoño (11.06^b), como promedio de los dos cultivares en los dos sustratos. Se sabe que la papa tiene mayor rendimiento cuando la diferencia entre las temperatura máxima y mínima son altas y la temperatura nocturna es menor de 18°C, lo que ocurrió en el ciclo otoño-invierno, con una media de 15°C, una máxima de 35°C y mínima de -2°C así como la temperatura nocturna es fresca en noviembre y diciembre; lo que coincide con lo señalado por Beukema y Van der Zaag (1990). Al comparar los tubérculos por planta producidos por los genotipos incluidos en este estudio, se encontró que el clon 99-39 produjo estadísticamente ($P \leq 0.05$) más tubérculos por planta que la variedad Citlali, con 24.83 y 13.92, respectivamente. Asimismo, la respuesta de los genotipos en los tres ciclos de producción, se encontró que el clon 99-39 generó, en promedio por planta, 34 minitubérculos iguales o mayores de 15 mm de diámetro, con perlita; no obstante, la productividad de ese clon se redujo significativamente ($P \leq 0.05$) cuando se cultivó en agregados, en donde solamente produjo 15.41 tubérculos por planta de las dimensiones señaladas (Figura 1); la

variedad Citlali produjo por planta 15.9 tubérculos de tamaño igual o mayor de 15 mm de diámetro, cuando se cultivó en perlita y 11.9 en agregados; estas cifras, para el segundo clon fueron estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). Es importante indicar que los tubérculos con diámetro igual o superior a 15 mm son usados para la siembra en campo, donde se requiere entre 60 y 80 mil unidades para sembrar una hectárea (Flores-López *et al.*, 2014).

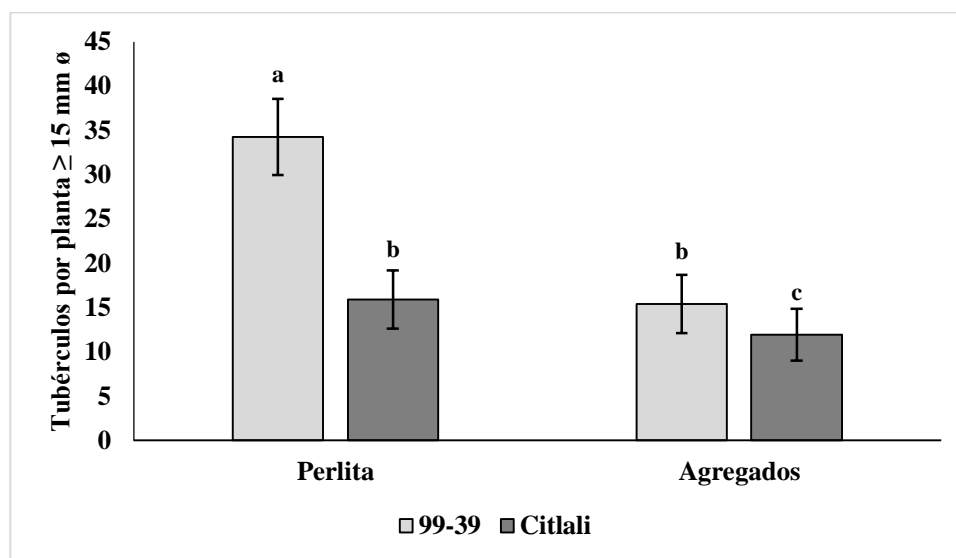


Figura 1. Producción promedio de tubérculos iguales o mayores de 15 mm de diámetro en tres ciclos de cultivo y dos sustratos para la variedad Citlali y el clon mexicano 99-39.

La interacción ciclo x sistema fue la de mayor impacto, ya que fue notable la respuesta promedio en la producción de minitubérculos de diámetro igual o mayor de 15 mm; así, en el ciclo otoño y perlita los genotipos produjeron 42.25 tubérculos por planta, cifra significativamente mayor a la del resto de combinaciones. El sustrato agregados en los ciclos primavera y verano mostraron los menores rendimientos, con 6.75 y 6.38 tubérculos por planta, respectivamente; es decir 6.5 veces menos. Esta respuesta se evidenció al analizar la interacción ciclo x sustrato x genotipo (Figura 2) donde el clon 99-39 sembrado en el ciclo otoño-invierno rindió 10 veces más que la variedad Citlali sembrada en agregados, tanto en primavera como en verano; sin embargo, el clon 99-39 sembrado en agregados, en primavera y verano no mostró alto potencial de producción de tubérculos; por ello, es posible señalar que el efecto de temperatura es fundamental en la productividad de los materiales y coincide

con lo mencionado por Beukema y Van der Zaag (1990); y es también evidente que la respuesta de los cultivares fue diversa en este trabajo realizado en sistema hidropónico y concuerda con lo señalado por Muro *et al.* (1997), Corrêa *et al.* (2008) y Tierno *et al.* (2013).

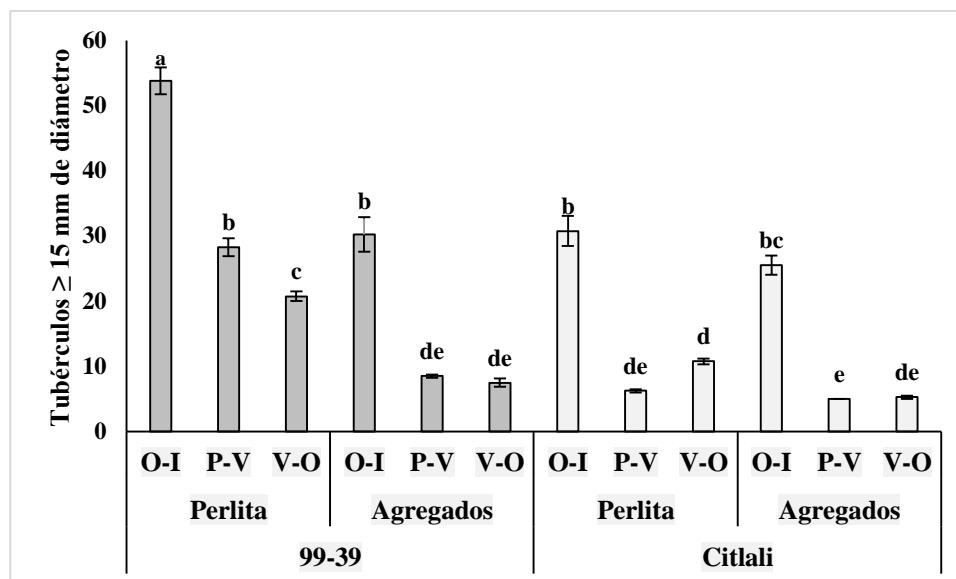


Figura 2. Efecto de la interacción ciclo x sustrato x genotipo en la producción por planta de minitubérculos mayores o iguales de 15 mm.

La alta producción del clon 99-39 en invernadero en las dos condiciones de cultivo en comparación con la variedad Citlali, concuerda con lo ocurrido en condiciones de campo, donde este clon tiene un potencial de rendimiento mayor que la variedad Citlali, señalado por (Rubio-Covarrubias *et al.*, 2017); quienes mencionan que el clon 99-39 tiene un ciclo de producción de intermedio a tardío, bajo condiciones de campo, con un rendimiento potencial de hasta 80 t ha⁻¹, en tanto que la variedad Citlali es un genotipo precoz, con un potencial de rendimiento en campo de 54 t ha⁻¹.

Cuando se consideró la producción total de tubérculos por planta (todos los tamaños), el clon 99-39 mostró el mejor rendimiento ($P \leq 0.05$) en el ciclo otoño-invierno, temporada en que la variedad Citlali también obtuvo su mejor rendimiento (34.5 tubérculos), aunque significativamente menor a la obtenida por el clon 99-39 (58.0 tubérculos), es decir, 68 % más tubérculos para 99-39 (Cuadro 5).

Cuadro 5. Promedios de la producción de tubérculos totales por planta en la interacción ciclo x sustrato x genotipo.

Ciclo	Sustrato	Genotipo	Tubérculos por planta
Otoño-invierno	Perlita	Clon 99-39	58.0 ^{a*} ± 2.48
		Citlali	34.5 ^b ± 2.96
	Agregados	Clon 99-39	33.5 ^b ± 2.90
		Citlali	27.5 ^c ± 1.66
Primavera-verano	Perlita	Clon 99-39	34.3 ^b ± 1.65
		Citlali	8.0 ^{de} ± 0.41
	Agregados	Clon 99-39	10.8 ^{de} ± 0.63
		Citlali	6.3 ^e ± 0.25
Verano-otoño	Perlita	Clon 99-39	26.3 ^c ± 0.95
		Citlali	13.0 ^d ± 0.58
	Agregados	Clon 99-39	8.5 ^{de} ± 0.65
		Citlali	6.3 ^e ± 0.25

* = Valores con distinta letra son estadísticamente diferentes ($P < 0.05$) de acuerdo con la prueba de Tukey.

El genotipo 99-39 en otoño y sembrado en perlita produjo 58 tubérculos por planta, el mismo clon sembrado en primavera con perlita obtuvo 34.3 y en 26.3. Ese clon sembrado en agregados rindió 33.5 tubérculos por planta en otoño, Sin embargo, su respuesta en agregados fue de 33.5 tubérculos por planta en otoño, pero solamente 10.8 en primavera y 8.5 en verano. La variedad Citlali mostró una producción de 34.5 tubérculos por planta cuando se cultivó en perlita, en el ciclo otoño – invierno, 8 en primavera y 6.3 en verano; mientras que en agregados rindió 27.5 tubérculos por planta, cuando se cultivó en agregados en otoño y 6.3 en primavera y en verano. En este estudio, el ciclo de cultivo más productivo fue el de otoño-invierno 2015-2016; las condiciones de temperaturas frías por la noche y la diferencia entre la máxima y mínima diaria favoreció la movilización de fotoasimilados hacia los tubérculos, en concordancia con lo señalado por Beukema y Van der Zaag (1990), y la mayor producción de estolones, reportado por Struik y Wiersema (1999).

Peso de tubérculos e índice de cosecha

El peso fresco de tubérculos por planta mostró resultados contrastantes respecto al número de tubérculos por planta, el valor del coeficiente de correlación de Pearson entre estas variables fue de 0.08 y sin significancia estadística. En ese sentido, la comparación de medias para ciclos de cultivo mostró que en primavera-verano se obtuvo el mayor peso de tubérculos

por planta, con 283^a gramos, en verano-otoño el promedio fue de 185^b gramos y en otoño-primavera de 141^c gramos por planta. Entre sustratos la respuesta fue similar a la observada en el número de tubérculos con 236^a gramos en perlita y 170^b gramos en agregados. Al considerar la interacción ciclo x genotipo, la respuesta en peso fresco resultó significativamente ($P \leq 0.05$) superior para primavera y el clon 99-39 (325^a gramos), que superó a la variedad Citlali sembrada en el ciclo otoño que obtuvo 119^d gramos. La interacción ciclo x sustrato x genotipo (Figura 3) muestra el comportamiento diferencial de los materiales en estudio. Con ello es evidente que la producción de más tubérculos no necesariamente repercute en mayor peso de ellos, hecho que se contrapone a lo señalado por Beukema y Van der Zaag (1990), pero que, aparentemente tiene relación con la respuesta diferencial de los genotipos de papa y sus interacciones en el cultivo hidropónico (Muro *et al.*, 1997; Corrêa *et al.*, 2008; Tierno *et al.*, 2013). Además debe considerarse que los tubérculos de la variedad Citlali son de mayor tamaño, debido a la precocidad de ese cultivar. El peso de los tubérculos del clon 99-39, en general fue menor, probablemente debido a que solamente se cultivaron por 90 días, cuando su ciclo es de al menos 110 días, por ello, sus tubérculos, aunque en buen número, aún podrían ganar mayor peso; especialmente en el ciclo otoño-invierno, cuando las plantas tienden a tener un ciclo más tardío y este hecho sí coincide con lo reportado por Beukema y Van der Zaag (1990).

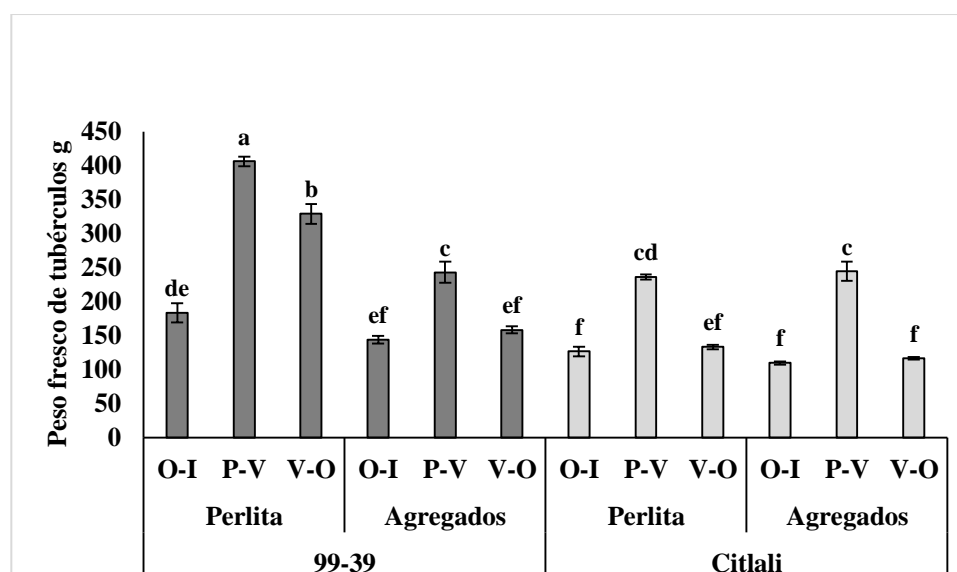


Figura 3. Efecto de la interacción ciclo x sustrato x genotipo en el peso fresco de tubérculos por planta de dos genotipos de papa.

En cuanto al peso seco de tubérculos por planta, el análisis combinado mostró resultados similares a los de peso fresco de tubérculos, por ello, el coeficiente de correlación de Pearson entre estas variables fue de 0.94 ($P < 0.0001$). En relación con el índice de cosecha, las diferencias estadísticas de mayor cuantía se encontraron al comparar los valores obtenidos en los tres ciclos de producción (Figura 4). En el ciclo otoño-invierno se obtuvo el mayor índice de cosecha (0.80), le siguió el del ciclo verano-otoño (0.76) y el de menor cuantía fue el del ciclo primavera-verano (0.73).

Estos valores se asociaron estrechamente a las temperaturas registradas en los diferentes ciclos de producción; a menor temperatura, mayor índice de cosecha; ello corresponde a lo observado por Flores-Gutiérrez *et al.* (2018) y mencionado por Beukema y van der Zaag (1990). Los valores de índice de cosecha de la variedad Citlali y el clon 99-39 en dos sustratos y tres ciclos de cultivo se presentan en la figura 5. Aunque en el análisis de sustratos y de genotipos no hubo significancia estadística, si la hubo en la interacción señalada, por lo que el ambiente probablemente sea el factor de mayor efecto en la acumulación de peso seco en los tubérculos.

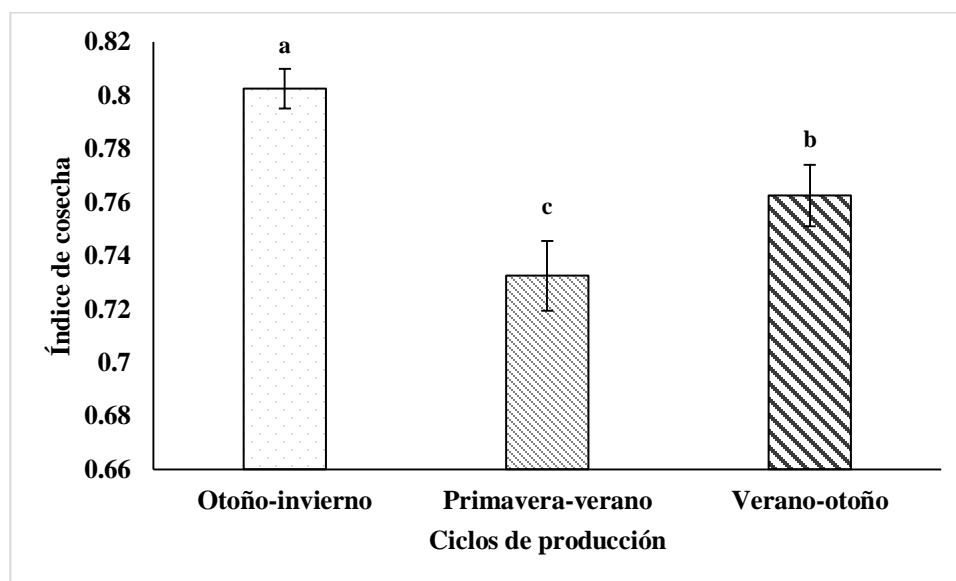


Figura 4. Índice de cosecha promedio de dos genotipos mexicanos de papa en tres ciclos de cultivo y dos sustratos.

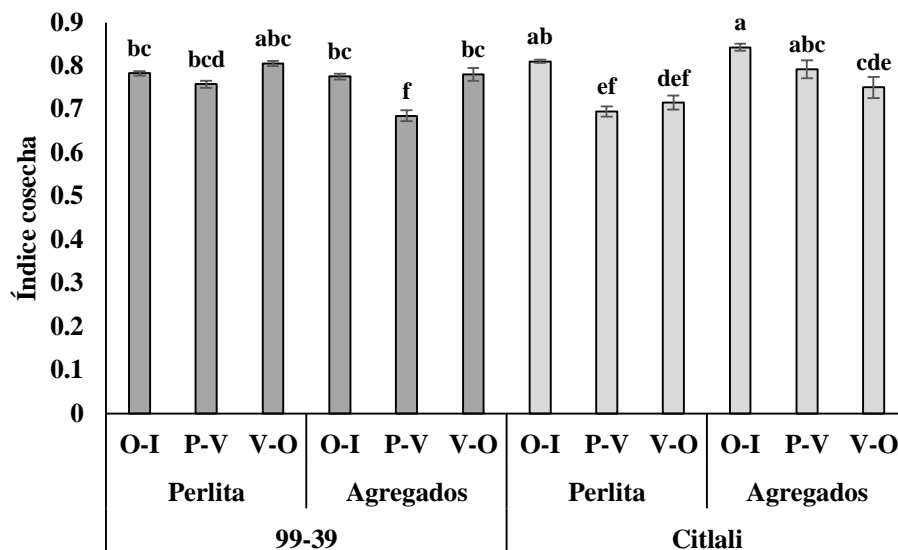


Figura 5. Índice de cosecha en la interacción genotipo x ciclo por sustrato.

Conclusiones

El sistema de producción en perlita e hidroponía fue más eficiente con respecto al de agregados, debido a su condición inerte, mayor aireación y disposición continua de nutrientes.

El potencial productivo de cada genotipo se expresó en invernadero, donde el clon 99-39 resultó mejor que la variedad Citlali.

La estación del año afecta fuertemente la respuesta en número de tubérculos por planta en papa en invernadero e hidroponía.

Los resultados aquí obtenidos permitirán tomar decisiones respecto al manejo de la producción de tubérculo semilla de la categoría prebásica II en ambos genotipos.

Agradecimientos

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias por facilitar instalaciones, material genético, insumos y recursos para la conducción de este trabajo. Al

Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales de la Universidad Autónoma del Estado de México por el soporte académico en la realización de esta investigación. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo recibido.

Literatura citada

- Adams, P. 2004. Aspectos del manejo de los diferentes sustratos, su composición, elección y factores medioambientales a considerar. En: Urrestarazu G., M. Coordinador. 2004. Tratado de cultivos sin suelo 3ª Ed. Ediciones Mundi-Prensa. España.
- Arellano-García, M. A.; Villavicencio-Gutiérrez, E. E. y García-Garza, S. J. 2010. Producción de plántulas y semilla prebásica de variedades comerciales de papa libres de enfermedades. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Saltillo. Folleto Técnico Num. 41.
- 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.
- 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. American Journal of Potato Research 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 Research 55 (1): 69–81. DOI 10.1007/s11540-012-9208-7.
- Corrêa, R. M.; Pinto, J. E. B. P.; Pinto, C. A. B. P.; Faquin, V.; Reis, E. S.; Monteiro, A. B. and Dyer, W. E. 2008. A comparison of potato seed tuber yields in beds, pots and hydroponic systems. Scientia Horticulturae 116 (1): 17-20.
- 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 Science Books 133-139.

- 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. *American Journal of Potato Research* 83 (1): 47-53.
- Flores-Gutiérrez, F. X.; Flores-López, R.; Mora-Herrera, M. E. y Franco-Mora, O. 2018. Respuesta del clon mexicano 99-39 a potasio en hidroponía e invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9 (6): 1123-1135.
- Flores-López., R.; Rubio-Covarrubias, O. y Sotelo-Ruiz, E. 2014. Manual de Producción de Papa apta para siembra en Invernaderos rústicos. INIFAP. Centro de Investigación Regional Centro. Sitio Experimental Metepec, Zinacantepec, Estado de México. Folleto Técnico. Num. 1. México.
- Flores-López, R.; Sotelo-Ruiz, E.; Rubio-Cobarrubias, O.; Álvarez-González, A. y Marín-Casimiro, M. 2016. Niveles de NPK para la producción de minitubérculos de papa en invernadero en el Valle de Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7 (5): 1131-1142.
- INEGI. 2009. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Zinacantepec, México. Clave Geoestadística 15118. INEGI, México, D. F.
- Lommen, W.J.M. 2007. The canon of potato science: 27. Hydroponics. *Potato Research* 50 (3), 315-318. DOI 10. 1007/s11540-008-9053-x.
- Mateus-Rodríguez, J. R.; De Haan, S.; Andrade-Piedra, J. L.; Maldonado, L.; Hareau, G.; Barker, I.; Chuquillanqui, C; Otazú, V.; Frisancho, R.; Bastos, C.; Pereira, A. S.; Medeiros, C. A.; Montesdeoca, F. and Benitez, J. 2013. Technical and economic analysis of aeroponics and other systems for potato mini-tuber production in Latin America. *American Journal of Potato Research* 90 (4):357-368.
- Medeiros, C. A. B.; Ziemer, A. H.; Daniels, J. e Pereira, A. S. 2002. Produção de sementes pré-básicas de batata em sistemas hidropônicos. *Horticultura Brasileira* 20 (1): 110-114.

- 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 Research* 47: 113-126.
- 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 Research* 40 (4): 431-438.
- Patrón-Ibarra, 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.
- Resh, H. M. 2006. Cultivos hidropónicos. Ediciones Mundi-Prensa. España.
- Ritter, E.; Angulo, B.; Riga, P.; Herrán, C.; Relloso and M. San Jose, M. 2001. Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers. *Potato Research* 44 (2): 127-135.
- Rolot, J. L. and Seutin, H. 1999. Soilless production of potato minitubers using a hydroponic technique. *Potato Research* 42 (3-4): 457-469.
- Rubio-Covarrubias, C. O; Rangel-González, J. A.; Flores-López, R.; Magallanes-González, J. V.; Díaz-Hernández, C.; Zavala-Quintana, T. E.; Rivera-Peña, A.; Cadena-Hinojosa, M. A.; Rocha-Rodríguez, R.; Ortiz-Trejo, C.; López-Delgado, H. A.; Díaz Valasis, M. y Paredes-Tenorio, A. 2000. Manual para la producción de papa en las sierras y valles altos del Centro de México. SAGAR. INIFAP. CIRCE. Campo Experimental Valle de Toluca. Libro Técnico No. 1. Zinacantepec, Estado de México. México.
- Rubio-Covarrubias, A. O.; Cadena Hinojosa, M- A.; Flores-López, R.; Vázquez-Carrillo, G.: Díaz-Valasis, M.; Valenzuela-Valdés, J. M.: Parga-Torres, V. M.; Rocha-Rodríguez, R. y López-Delgado, H. A. 2017. Citlali variedad de papa tolerante a punta morada. Folleto Técnico No. 3. INIFAP. Campo Experimental Valle de México. Sitio Experimental Metepec. ISBN:978-607-37-0716-9.
- SMN. 2016. Servicio Meteorológico Nacional. Comisión Nacional del Agua. Observatorio Meteorológico 76675. Centro de Previsión Meteorológica Toluca. Recuperado de smn.cna.gob.mx/emas/txt/mx40_10M.TXT.

- SENASICA. 2015. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Norma Oficial Mexicana NOM-041-FITO-2002. Requisitos y especificaciones fitosanitarios para la producción de material propagativo asexual de papa. Recuperado de www.senasica.gob.mx/doc=621.
- Struik, P. C. 2007. The canon of potato science: 25. Minitubers. *Potato Research* 50 (3): 305-308. DOI: 10.1007/s11540-008-9051-z.
- Tierno, R; Carrasco, A. and Ritter, E. 2013. Differential growth response and minituber production of three potato cultivars under aeroponics and greenhouse bed culture. *American Journal of Potato Research*. Published online: 21 November 2013. DOI 10.1007/s12230-013-9354-8
- 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 Hort.* 1013(37):305-312. DOI 10.17660/ActaHortic.2013.1013.37.
- Wheeler, R. M.; Hinkle, R. C.; Mackowiak, C. L.; Sager, J. C. and Knott, W. M. 1990. Potato growth and yield using nutrient film technique (NFT). *American Potato Journal* 67 (3): 177-187.

7.4. Capítulo 4. Productividad de doce genotipos mexicanos de papa en dos ciclos de cultivo con cuatro soluciones nutritivas, en sistema hidropónico e invernadero.

Introducción

En México, la producción de minitubérculos de papa en el sistema formal de producción de semilla es una etapa necesaria entre la producción de vitroplantas (semilla prenuclear o prebásica I) y el incremento de tubérculo semilla en campo (semilla básica, registrada y certificada); la producción de minitubérculos en invernadero en este esquema se denomina semilla prebásica II, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-041-FITO-2002 (SENASICA, 2015). En el proceso de multiplicación de material propagativo, resulta indispensable que los minitubérculos tengan el tamaño y peso apropiado para su siembra en campo, de tal manera que su calidad fisiológica permita altos rendimientos en la producción de la semilla básica (Struik, 2007). La hidroponía es utilizada ampliamente por los productores de semilla de este cultivo, por lo que la nutrición es de alta importancia para el desarrollo y productividad de la papa (Lommen, 2007). La solución nutritiva en sistema hidropónico en papa contempla esencialmente el uso de nitrógeno, fósforo, potasio calcio, azufre y magnesio con productos de alta solubilidad, además de micronutrientes (Coraspe-León *et al.*, 2009). Resulta también importante determinar la respuesta varietal al suministro de diferentes soluciones nutritivas, dado que se requiere especificidad en este sentido (Corrêa *et al.*, 2008; Tierno *et al.*, 2013).

La producción de minitubérculos de papa en invernadero, con perlita grado hortícola y sistema hidropónico, requiere de la suplementación de los elementos esenciales a través del riego, ya que dicho sustrato es inerte y no aporta nutrientes a las plantas (Bonilla, 2008). La absorción de los mismos por la planta ha sido reportada por diversos autores (Salisbury y Ross, 2000; Bonilla, 2008; Favela-Chávez *et al.*, 2006): el nitrógeno es absorbido por las plantas en dos formas iónicas: nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+). El N_2 atmosférico puede aprovecharse por las plantas mediante reducción microbiana; el fósforo se encuentra disponible para la planta como ion fosfato, se absorbe como H_2PO_4^- , aunque también es posible que se realice en forma de HPO_4^{2-} ; el ion H_2PO_4^- es favorecido por pH menor a 7,

mientras que el ion HPO_4^{2-} por valores de pH superiores de 7. El potasio es otro elemento esencial, se absorbe en forma de K^+ y es un activador de más de 50 procesos enzimáticos y otros relacionados con la presión de turgencia de las células y la apertura y cierre estomático; el ion K^+ se redistribuye fácilmente desde los órganos maduros hacia los jóvenes. El calcio tiene varias funciones celulares relacionadas con la estructura de la membrana y la pared celular, provee estabilidad en los ligamientos de las moléculas de pectina (Palta, 2010); es absorbido en su forma Ca^{2+} ; la concentración intracelular de este elemento es muy baja. En el caso de la papa, Beukema y Van der Zaag (1990), Wastermann (1993), Mulder y Turkensteen (2005), Lommen (2007), señalan la importancia de una buena nutrición en ese cultivo, además de que reportan los síntomas característicos de las deficiencias de los diferentes elementos esenciales en la planta de dicho tubérculo. Lommen (2007) señala, además, que las soluciones nutritivas usadas para el cultivo de papa en hidroponía deben contener macro y micronutrientes: N, P, K, S, Ca, Na, Mg, Fe (quelatos), Mn, Zn, B, Cu y Mo.

En cuanto a la nutrición de la papa en sistema hidropónico, existen reportes relativos a la respuesta de diferentes cultivares y ésta ha mostrado diferencias debidas a efectos del genotipo, del ambiente y a la interacción genético ambiental (Muro *et al.*, 1997; Corrêa *et al.*, 2008; Tierno *et al.*, 2013). Con relación a la respuesta de genotipos mexicanos a la nutrición en invernadero, en sistema hidropónico y semihidropónico, diversos reportes señalan la importancia de generar tecnología para el manejo de la nutrición y la densidad de población en estos sistemas, para cultivares mexicanos de papa (Flores-López *et al.*, 2009; Flores-López *et al.*, 2014; Flores-López *et al.*, 2016; Flores-Gutiérrez *et al.*, 2018).

Considerando lo anterior, el objetivo del presente estudio fue determinar la productividad de doce genotipos de papa en dos ciclos de cultivo con cuatro soluciones nutritivas, en sistema hidropónico e invernadero.

Materiales y métodos.

Se establecieron experimentos en dos épocas de cultivo, el ciclo 1 fue del 21 de septiembre al 18 de diciembre de 2015 (otoño-invierno) y el ciclo 2 (primavera-verano), del 31 de marzo al 4 de julio de 2016; en invernadero y sistema hidropónico. Las instalaciones en las que se desarrollaron estos trabajos son propiedad del Programa de Papa del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias y están ubicadas a 2,726 msnm (INEGI, 2009), 19°17'28'' latitud norte y 99°42'51'' longitud oeste (SMN, 2017).

El sustrato que se utilizó fue perlita grado hortícola, se utilizaron macetas de 1.8 litros y sistema de riego con cintilla. La densidad de población fue de 36 plantas por metro cuadrado y se programaron 10 riegos por día, además, hubo control preventivo de plagas con fungicidas e insecticidas. Los genotipos incluidos en este estudio fueron los cultivares mexicanos obtenidos por el INIFAP: Bajío, Citlali, Cristal, Granate, Milagros, Modesta Blanca, Nau, Sierras, Nevada, Real 14 y el clon avanzado 99-39; como testigo comercial se empleó a la variedad Fianna. Los tubérculos empleados fueron seleccionados con un diámetro entre 15 y 18 mm, libres de enfermedades, se sembraron a 10 cm de profundidad. Las soluciones nutritivas ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) evaluadas fueron: a) N:200 - P:80 - K:300 - Ca:100, b) N:200 - P:80 - K:350 - Ca:100, c) N:200 - P:80 - K:450 - Ca:100 y d) N:160 - P:60 - K:250 - Ca:150 (testigo comercial); más microelementos (Flores-López *et al.*, 2009; Flores-Gutiérrez *et al.*, 2018).

La temperatura del invernadero se registró con un termómetro Data logger HANNA modelo HII4ICH CE IP67®; en el ciclo otoño-invierno, la temperatura media fue de 14.3°C, con una máxima de 32°C y mínima de -2°C; mientras que en el ciclo primavera-verano la temperatura media fue de 22°C, con una máxima de 40°C y la mínima de 10°C.

El diseño experimental empleado fue bloques completos al azar con tres repeticiones (anidadas en las soluciones nutritivas), como una serie de experimentos (Martínez-Garza, 1996). Se probó la significancia entre ciclos, soluciones y genotipos, así como la interacción entre ellos. Cuando la prueba de F del análisis de varianza mostró diferencias estadísticas, se

aplicó la prueba de Tukey ($P < 0.05$). Además, considerando la importancia de ofrecer a los productores recomendaciones específicas para cada ciclo de cultivo, se realizaron análisis estadísticos para cada época de producción, aunque únicamente para el número y peso de minitubérculos comerciales. Para dichos análisis estadísticos se empleó el paquete estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2015).

Durante el desarrollo del cultivo, las variables de estudio fueron: altura de planta (cm), índice de área foliar (IAF), índice de verdor (valores SPAD); todo ello, a los 40 y 80 días después de la siembra (dds). El IAF se determinó con un Ceptómetro Lineal modelo LP-80AccuPAR® y los valores SPAD con un SPAD-502 Konica Minolta®. En el momento de la cosecha se evaluó el número y peso de minitubérculos con diámetro menor a 15 mm, el número y peso de minitubérculos de diámetro igual o mayor de 15 mm, el número y peso de tubérculos totales; todo ello, en promedio por planta. Posteriormente, se determinó el peso seco de tubérculos y de planta, así como el índice de cosecha.

Resultados y discusión.

El análisis de la serie de experimentos determinó que se presentó significancia estadística para la mayoría de las fuentes de variación y los valores de los coeficientes de variación permiten considerar que el manejo de los experimentos fue apropiado; la interacción ciclo x solución no presentó significancia en la mayor parte de las variables evaluadas; el genotipo, de forma general, resultó con significancia estadística (Prueba de F) para todas las variables evaluadas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Significancia estadística de acuerdo con el análisis de varianza de la serie de experimentos, de acuerdo con la prueba de F.

Variable	Ciclo	Solución	Genotipo	I ciclo x solución	I ciclo x genotipo	I solución x genotipo	I ciclo x solución x genotipo
AP 40 dds	**	**	**	NS	**	NS	**
AP 80 dds	**	*	**	**	**	**	**
IAF 40 dds	NS	NS	**	NS	**	**	**
IAF 80 dds	**	**	**	NS	**	**	**
SPAD 40 dds	**	*	**	NS	**	**	**
SPAD 80 dds	NS	**	**	NS	**	NS	NS
NT < 15	**	NS	**	NS	**	NS	NS
NT ≥ 15	**	**	**	NS	**	**	*
NTTP	**	**	**	NS	**	**	NS
PT < 15	**	**	**	NS	**	**	**
PT ≥ 15	**	**	**	NS	**	**	**
PFTTP	**	**	**	NS	**	**	**
PSPTA	**	**	**	NS	**	**	**
IC	NS	**	**	NS	**	**	**

AP = altura de planta, IAF = índice de área foliar, SPAD = índice de verdor, NT < 15 = número de tubérculos de diámetro menor a 15 mm, NT ≥ 15 = número de tubérculos de diámetro igual o mayor de 15 mm, NTTP = número de tubérculos totales por planta, PT < 15 = peso de tubérculos de diámetro menor a 15 mm, PT ≥ 15 = peso de tubérculos de diámetro igual o mayor de 15 mm, PFTTP = peso fresco de tubérculos totales por planta, PSTTP = peso seco de tubérculos totales por planta, PSPTA = peso seco de planta, IC = índice de cosecha, dds = días después de la siembra. *($P < 0.05$), ** ($P < 0.01$), NS = no significativo estadísticamente.

En este sentido, la respuesta de los genotipos al suministro de las soluciones nutritivas en ambos ciclos de cultivo se presenta en el Cuadro 2, en donde se indican los valores promedio y su significancia estadística.

Cuadro 2. Valores promedio por planta \pm error estándar de la media para las variables evaluadas en doce genotipos de papa en dos ciclos de cultivo y cuatro soluciones nutritivas, en sistema hidropónico e invernadero. De acuerdo con el análisis de la serie de experimentos.

Variable	Promedio por planta \pm error estándar de la media	Coefficiente de variación %
Altura de planta a los 40 dds (cm)	35.7 \pm 0.79 **	9.72
Altura de planta a los 80 dds (cm)	97.7 \pm 0.70 **	8.11
Índice de área foliar a los 40 dds	3.3 \pm 0.02 **	8.12
Índice de área foliar a los 80 dds	7.1 \pm 0.04 **	4.23
Índice de verdor (SPAD) a los 40 dds	48.1 \pm 0.26 **	5.20
Índice de verdor (SPAD) a los 80 dds	45.4 \pm 0.18 **	4.95
Número de tubérculos de diámetro menor a 15 mm	8.0 \pm 0.30 **	23.96
Número de tubérculos de diámetro igual o mayor de 15 mm	16.9 \pm 0.28 **	13.25
Número de tubérculos totales	24.9 \pm 0.43 **	10.89
Peso de tubérculos de diámetro menor a 15 mm (g)	5.0 \pm 0.18 **	23.59
Peso de tubérculos de diámetro igual o mayor de 15 mm (g)	246.9 \pm 3.91 **	4.35
Peso de tubérculos totales (g)	252.0 \pm 3.91 **	4.33
Peso seco de planta (g)	47.5 \pm 0.84 **	5.52
Peso seco de tubérculos (g)	34.5 \pm 0.61 **	7.60
Índice de cosecha	0.7 \pm 0.003 **	3.86

** = significancia estadística entre genotipos, de acuerdo con la prueba de F del análisis de varianza ($P < 0.01$).

En el Cuadro 3 se indican los promedios de las variables altura de planta, índice de área foliar e índice de verdor (valores SPAD), así como las diferencias estadísticas entre genotipos.

Cuadro 3. Valores promedio de dos épocas de cultivo para las variables altura de planta, índice de área foliar e índice de verdor (SPAD) en doce genotipos de papa, en sistema hidropónico e invernadero.

Genotipo	Altura de planta (cm)		Índice de área foliar		Valores SPAD	
	40 dds	80 dds	40 dds	80 dds	40 dds	80 dds
Bajío	30.0 g *	97.3 cd	3.00 f	6.61 cde	50.05 ab	44.52 b
Citlali	26.0 h	98.4 bcd	3.25 cdef	6.77 cd	49.18 abc	42.36 c
Cristal	33.1 fg	93.7 d	3.03 ef	6.40 e	47.83 bcd	44.73 b
Fianna	34.3 ef	91.1 d	3.10 def	6.53 de	48.36 abc	46.08 b
Granate	39.2 cd	109.3 a	3.41 abc	7.43 b	50.70 a	45.39 b
Milagros	40.7 bc	104.9 ab	3.45 abc	7.59 ab	48.65 abc	46.09 ab
Modesta	44.3 a	104.4 abc	3.54 a	7.81 a	49.42 ab	45.73 b
Nau	38.7 cd	91.8 d	3.27 bcde	6.34 e	44.87 e	46.30 ab
Sierras	37.1 de	93.8 d	3.54 a	7.85 a	45.50 de	44.34 bc
Nevada	32.4 fg	95.9 d	3.33 abcd	7.58 ab	47.89 bc	45.39 b
Real 14	42.9 ab	93.2 d	3.52 ab	6.82 c	48.31 bc	48.21 a
Clon 99-39	30.4 g	98.1 bcd	3.52 ab	7.45 b	47.05 cde	46.13 ab

* = Promedios con la misma letra no difieren estadísticamente ($P < 0.05$), de acuerdo con la prueba de Tukey.

Las variedades Granate, Milagros y Modesta blanca alcanzaron la mayor altura de planta a los 80 días después de la siembra; en tanto, Modesta Blanca, Sierras y Nevada mostraron el mayor índice de área foliar en esa etapa del cultivo. El índice de verdor mostró diferencias, aunque éstas probablemente se debieron a las características fenotípicas de los cultivares y no a las dosis de fertilización o al ciclo del cultivo.

La producción de minitubérculos de diámetro mayor o igual a 15 mm se presenta en la Figura 1, donde es notable que la respuesta de los genotipos en este estudio fue mejor en el ciclo otoño-invierno, aunque Cítlali se comportó de manera inversa; el análisis de varianza mostró diferencias estadísticas entre ambos ciclos (Figura 1). La producción por planta, en ambos ciclos fue superior y estadísticamente igual para los genotipos el clon 99-39 y Real 14; aunque Real 14 resultó igual que Fianna (t) y Cristal, de acuerdo con la prueba de Tukey ($P < 0.05$). Milagros fue la variedad que menor número de tubérculos, del diámetro señalado, produjo. Los resultados obtenidos para esta variable indican que las diferencias encontradas en los dos ciclos de producción probablemente se deben a la respuesta varietal; hecho que coincide con lo reportado por Muro *et al.* (1997), Corrêa *et al.* (2008) y Tierno *et al.* (2013).

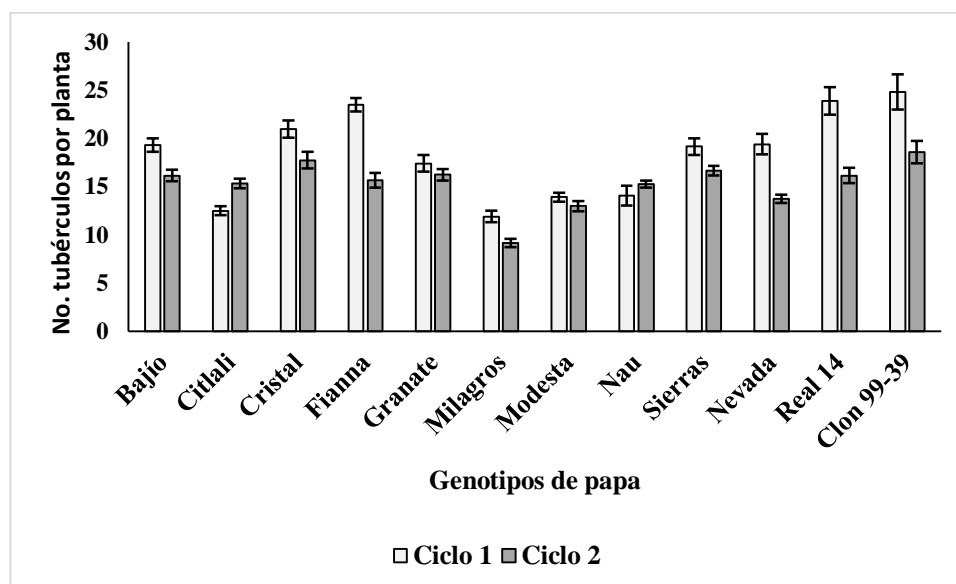


Figura 1. Producción de tubérculos ≥ 15 mm de diámetro por planta, en dos ciclos de cultivo, para doce genotipos de papa, en hidroponía e invernadero. Promedio \pm error estándar.

En relación con el peso de tubérculos por planta de diámetro igual o mayor de 15 mm (Figura 2) la variedad Nau mostró el mejor rendimiento en el promedio de ambos ciclos de cultivo, con 337 gramos por planta, en tanto que Milagros fue la variedad que menor rendimiento mostró, con 149 gramos por planta; probablemente debido a que esta última variedad, así como Modesta blanca, son cultivares de ciclo tardío. Granate aunque es de ciclo intermedio, produce pocos tubérculos por planta, por lo que el peso promedio de la producción fue de 173 gramos; información que coincide con los pesos obtenidos por el clon 020342.1 en un estudio con diferentes concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio (Flores-López *et al.*, 2016).

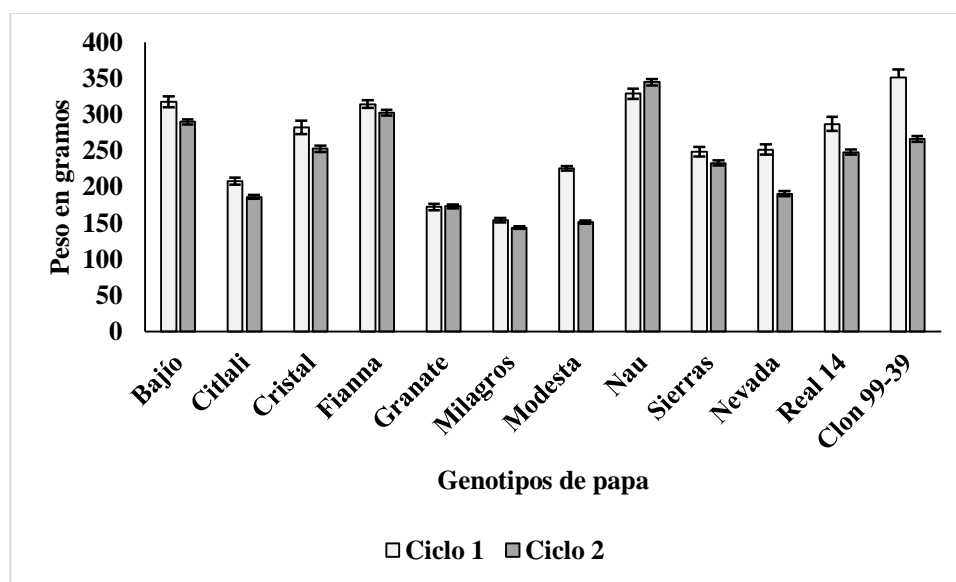


Figura 2. Peso de tubérculos ≥ 15 mm de diámetro por planta, en dos ciclos de cultivo, para doce genotipos de papa, en hidroponía e invernadero. Promedio \pm error estándar.

Considerando el número total de tubérculos por planta (tubérculos de diámetro menor de 15 mm más tubérculos de diámetro igual o mayor de 15 mm), la variedad Real 14, Modesta Blanca y Cristal produjeron, en promedio de ambos ciclos, 32, 31 y 30 tubérculos, respectivamente y resultaron estadísticamente iguales, de acuerdo con la prueba de Tukey ($P < 0.05$). No obstante, el clon 99-39 resultó estadísticamente igual a Cristal, con 28 minitubérculos producidos por planta, en promedio.

En la Figura 3 se presenta esta información y es notable que la producción de más tubérculos se dio en el ciclo de otoño-invierno. Además, cabe señalar que Modesta Blanca fue la variedad que mayor cantidad de tubérculos pequeños produjo, con un total de 18; seguida de Real 14, Cristal, Sierras y Bajío, con 13, 10, 9 y 9, respectivamente; estas últimas son de ciclo intermedio.

En la Figura 4 se muestra el peso total de tubérculos, obtenido por los doce genotipos en el promedio de los dos ciclos evaluados, donde la variedad Nau promedió 340 gramos por planta, siendo significativamente diferente ($P < 0.05$). Así mismo, mostraron un rendimiento estadísticamente igual y diferente los genotipos 99-39, Fianna y Bajío, con 314, 313 y 309 gramos promedio por planta. El cultivar Milagros presentó el menor rendimiento por planta, con únicamente 151 gramos por planta; considerando el ciclo tardío de este genotipo. En la gráfica se puede apreciar menos diferencia entre ciclos de producción para la mayoría de los materiales genéticos.

A pesar de la diversidad de genotipos, en general mostraron respuestas similares en ambos ciclos de producción, resultados que comprueban el comportamiento diferencial entre ellas y en la interacción genotipo x ciclo, como lo señalan Corrêa *et al.* (2008) y Tierno *et al.* (2013).

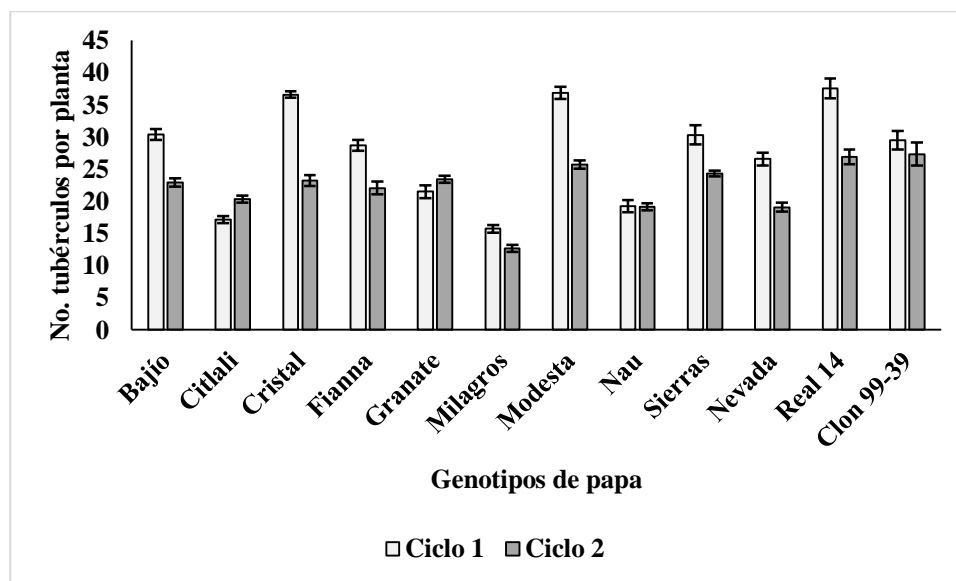


Figura 3. Producción de tubérculos totales por planta, en dos ciclos de cultivo, para doce genotipos de papa, en hidroponía e invernadero. Promedio \pm error estándar.

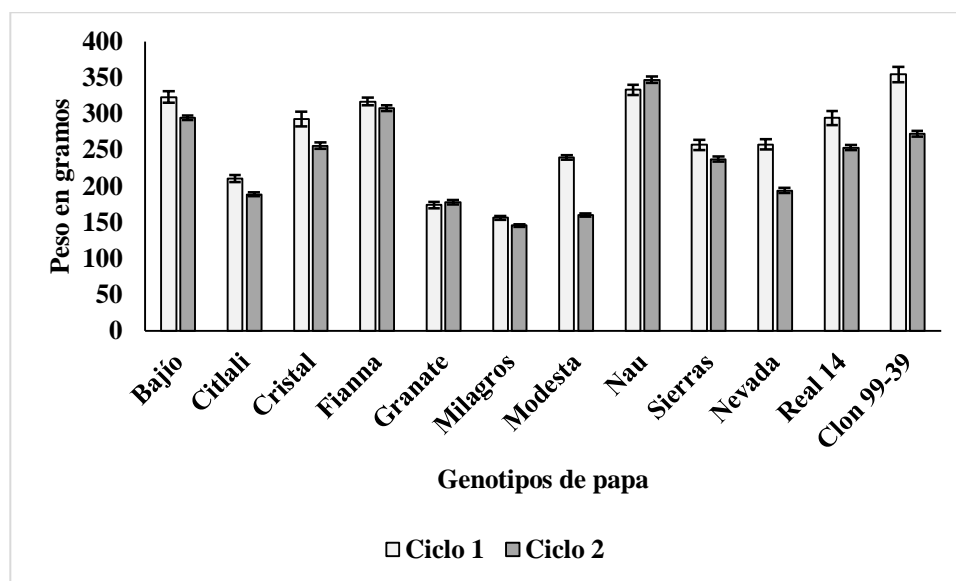


Figura 4. Peso de tubérculos totales por planta, en dos ciclos de cultivo, para doce genotipos de papa, en hidroponía e invernadero. Promedio \pm error estándar.

Con relación al índice de cosecha, las variedades Citlali, Granate y Nau, mostraron el índice de mayor valor, 0.79, 0.78 y 0.77, respectivamente; es decir, el peso seco de sus tubérculos aportó del 77 al 79% del peso seco total de la planta en estos genotipos. En ese sentido, los cultivares con tubérculos con menor cantidad de materia seca, en el promedio de los dos ciclos fueron Real 14 (0.68), clon 99-39 (0.69), Sierras (0.69), Modesta Blanca (0.70), Nau (0.70) y Cristal (0.70).

Los resultados obtenidos en este estudio no coinciden con los observados por Flores Gutiérrez *et al.* (2018) para el clon 99-39; sin embargo, muestran el comportamiento diferencial entre genotipos, razón por la que parece indispensable generar información específica para cada material genético en diferentes ciclos de cultivo.

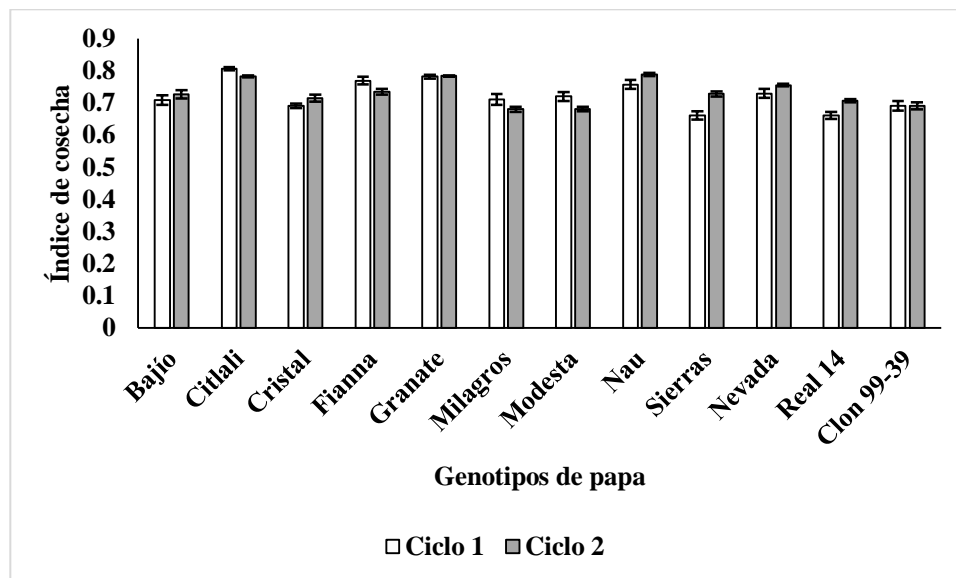


Figura 5. Índice de cosecha para doce genotipos de papa, en dos épocas de cultivo, en hidroponía e invernadero. Promedio \pm error estándar.

Por otro lado, al considerar el número de tubérculos por planta, promedio de los doce genotipos, por la influencia de la nutrición con nitrógeno, fósforo, potasio y calcio (Figura 6), muestra que la solución nutritiva 200:80:450:100 influyó de manera diferencial, estadísticamente, en una mayor producción de tubérculos en los ciclos otoño-invierno (ciclo 1) y primavera-verano (ciclo 2); lo que posiblemente se debe a la concentración superior de potasio, ya que los tratamientos con 450 y 350 mg L⁻¹ obtuvieron tanto el mayor número de minitubérculos, como el mayor peso fresco de los mismos; también se puede apreciar en dicha figura, que la solución testigo fue la que obtuvo el menor valor para ambas variables; lo anterior concuerda con Flores-Gutiérrez *et al.*, 2018, quienes detectaron los mayores rendimientos, peso fresco y número de minitubérculos con concentraciones de 350 mg L⁻¹ de potasio y con lo mencionado por Beukema y Van der Zaag (1990), quienes señalan la importancia del potasio en la expresión del rendimiento de papa.

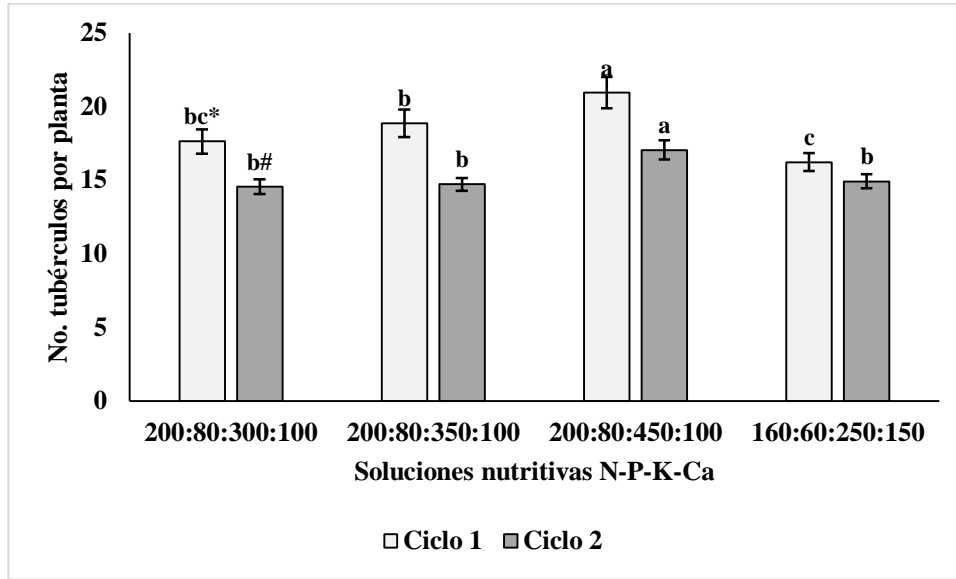


Figura 6. Respuesta de doce genotipos de papa a cuatro soluciones nutritivas en la producción de tubérculos ≥ 15 mm de diámetro, en dos ciclos de cultivo, sistema hidropónico e invernadero. *, # Promedios con la misma letra no difieren estadísticamente $P < 0.05$, de acuerdo con la prueba de Tukey.

La respuesta en el rendimiento en gramos por planta, se mostró de forma similar (Figura 7).

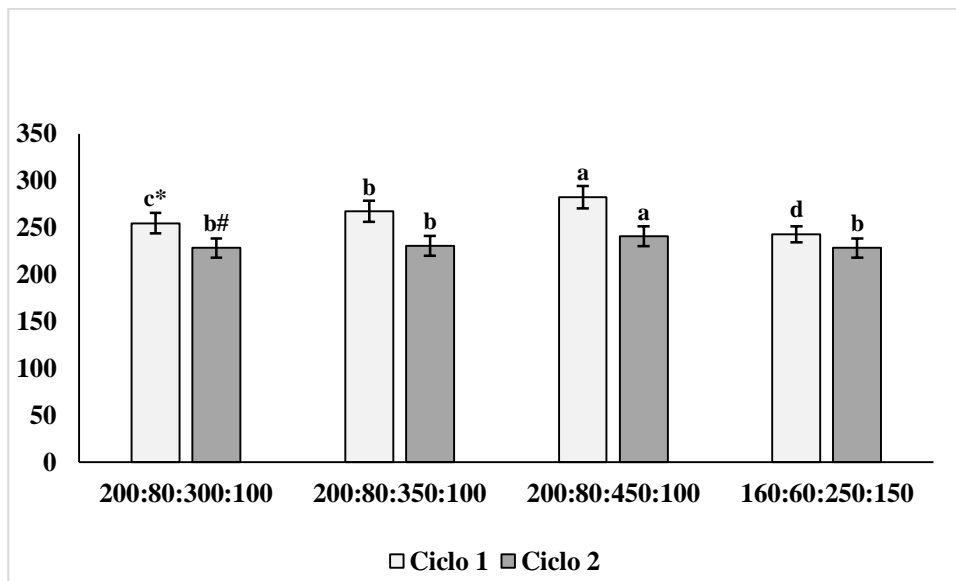


Figura 7. Respuesta de doce genotipos de papa a cuatro soluciones nutritivas en el peso (gramos) de tubérculos ≥ 15 mm de diámetro, en dos ciclos de cultivo, sistema hidropónico e invernadero. *, # Promedios con la misma letra no difieren estadísticamente $P < 0.05$, de acuerdo con la prueba de Tukey.

Así mismo, en relación con la producción de minitubérculos de diámetro igual o mayor de 15 mm, como promedio para los dos ciclos de cultivo mostró que la dosis de nutrición en

mg·L⁻¹, 200 N – 80 P – 450 K – 100 Ca, fue la que estadísticamente produjo más tubérculos comerciales promedio por planta (Figura 8).

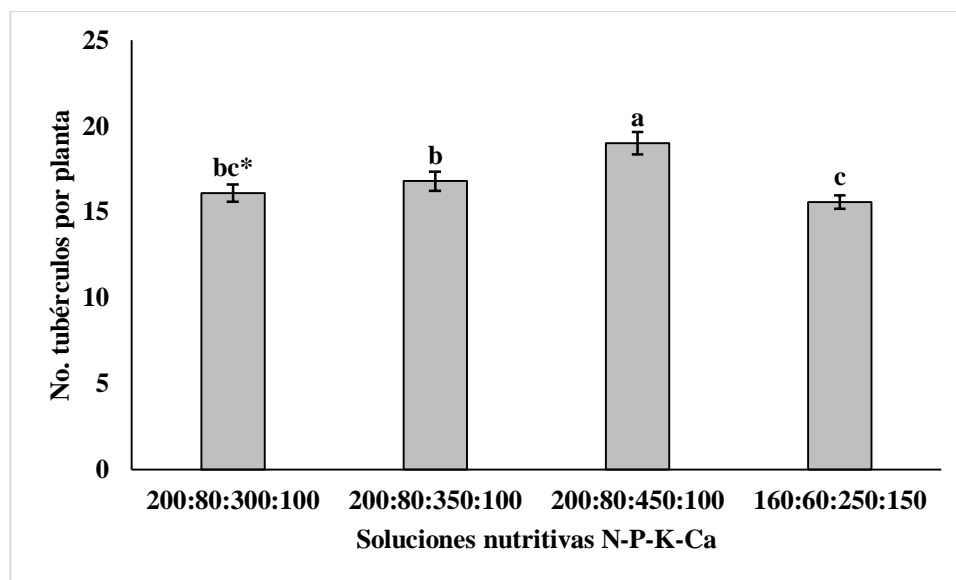


Figura 8. Respuesta promedio (número de tubérculos ≥ 15 mm de diámetro) de doce genotipos de papa a la aplicación de cuatro soluciones nutritivas, en dos ciclos de cultivo, en sistema hidropónico e invernadero. ** Promedios con la misma letra no difieren estadísticamente $P < 0.05$, de acuerdo con la prueba de Tukey.

La interacción ciclo x solución x genotipo resultó altamente significativa en el análisis de varianza; con esos resultados y buscando contar con información sobre el manejo de la producción de semilla prebásica II en los ciclos otoño-invierno y primavera-verano, en los cuadros 4 al 7 se muestra la información para cada genotipo en los ciclos otoño-invierno y primavera-verano, así como para cada una de las cuatro soluciones nutritivas.

En el Cuadro 4 es evidente que, en general, las dosis nutritivas evaluadas en el ciclo otoño-invierno, promovieron la producción de minitubérculos de forma estadísticamente igual para cada genotipo en particular; sin embargo, destacan los casos de Nau, Sierras, Nevada, Real 14 y del clon 99-39. Nau respondió mejor con la dosis testigo, en tanto que Sierras mostró menor producción de tubérculos de diámetro mayor o igual a 15 mm de diámetro con la dosis testigo. Las dosis con 350 y 450 mg·L⁻¹ de potasio promovieron mayor número de tubérculos comerciales en la variedad Real 14 y para el clon 99-39; Chang et al. (2008) encontraron resultados similares, al determinar diferencias para la interacción genotipo x solución

nutritiva; por lo que resulta necesario probar dosis de nutrición para cada genotipo, con el fin de determinar la más eficiente.

Cuadro 4. Productividad de doce genotipos mexicanos de papa en el ciclo de cultivo julio a noviembre con cuatro soluciones nutritivas. Interacción genotipo x solución. Número de tubérculos ≥ 15 mm de diámetro, promedio por planta.

Genotipo	Ciclo 1 (septiembre a diciembre 2015)			
	Soluciones (N:P:K:Ca)			
	1 200:80:300:100	2 200:80:350:100	3 200:80:450:100	4 (t) 160:60:250:150
Bajío	20.0 a*	18.33 a	21.33 a	17.67 a
Citlali	12.67 a	12.00 a	13.33 a	12.00 a
Cristal	21.33 a	24.33 a	21.33 a	17.00 a
Fianna (t)	21.00 a	24.00 a	26.00 a	23.00 a
Granate	16.67 a	16.00 a	22.00 a	15.00 a
Milagros	9.67 a	13.67 a	13.33 a	11.00 a
Modesta	14.00 a	13.67 a	15.33 a	12.67 a
Nau	11.00 b	11.33 b	15.33 ab	18.67 a
Sierras	19.33 a	21.33 a	20.67 a	15.33 b
Nevada	19.00 ab	19.67 ab	24.00 a	15.00 b
Real 14	23.33 bc	26.00 ab	29.33 a	17.00 c
Clon 99-39	23.67 b	26.00 ab	29.33 a	20.33 c

* Promedios con la misma letra no difieren estadísticamente $P < 0.05$, de acuerdo con la prueba de Tukey. Aplica para los valores de cada genotipo, no entre genotipos.

En el Cuadro 5 destacan los casos de la variedad Bajío que obtuvo mayor peso de tubérculos con las dosis de 350 y 450 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de potasio; Nau lo hizo con la dosis nutritiva testigo; en tanto que Sierras, y el clon 99-39 mostraron menor peso de tubérculos por planta con la dosis testigo. Para Nevada los tratamientos de nutrición con 300 y 450 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ de potasio resultaron mejores y en el caso de Real 14 el tratamiento 450 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ resultó estadísticamente superior ($P < 0.05$). Para los genotipos Bajío, Citlali, Cristal, Fianna, Granate, Milagros, Modesta Blanca, y Nevada resultó indistinta la dosis nutritiva que se suplementó, por lo que resulta mejor el empleo del testigo comercial. Los resultados muestran que no todos los genotipos responden de igual manera a la nutrición con nitrógeno, fósforo, potasio y calcio; por ello, es necesario evaluar su respuesta en diferentes condiciones de cultivo.

En el cuadro 6 se presenta la producción de minitubérculos de diámetro mayor o igual a 15 mm para los doce genotipos en el ciclo primavera-verano, como respuesta a la nutrición con cuatro soluciones. Solamente el clon avanzado del Programa de Papa del INIFAP 99-39

mostró diferencias estadísticas, con mayor producción al suministrar la solución nutritiva 200:80:450:100, lo que probablemente se debió a la alta productividad de ese material genético.

Cuadro 5. Productividad de doce genotipos mexicanos de papa en el ciclo de cultivo julio a noviembre con cuatro soluciones nutritivas. Interacción genotipo x solución. Peso de tubérculos ≥ 15 mm de diámetro, promedio por planta.

Genotipo	Ciclo 1 (septiembre a diciembre 2015)			
	Soluciones (N:P:K:Ca)			
	1 200:80:300:100	2 200:80:350:100	3 200:80:450:100	4 (t) 160:60:250:150
Bajío	304.3 b*	325.7 ab	349.3 a	291.7 b
Citlali	185.3 a	204.3 a	217.0 a	224.3 a
Cristal	289.0 a	290.3 a	316.3 a	234.0 a
Fianna (t)	297.0 a	314.7 a	333.7 a	312.7 a
Granate	164.3 a	174.7 a	164.3 a	185.3 a
Milagros	148.7 a	159.7 a	163.7 a	144.0 a
Modesta	233.3 a	234.0 a	233.0 a	219.0 a
Nau	217.7 c	343.7 a	349.7 a	293.3 b
Sierras	241.0 ab	247.3 ab	279.3 a	227.7 b
Nevada	264.7 ab	238.0 b	278.7 a	225.0 b
Real 14	251.0 c	311.3 b	324.7 a	260.0 c
Clon 99-39	365.0 a	364.3 a	379.3 a	297.3 b

* Promedios con la misma letra no difieren estadísticamente $P < 0.05$, de acuerdo con la prueba de Tukey. Aplica para los valores de cada genotipo, no entre genotipos.

En el ciclo primavera-verano, la respuesta de los doce genotipos a las cuatro soluciones nutritivas, en relación con el número de tubérculos de diámetro igual o mayor de 15 mm, no indicó fuertes diferencias; solamente el clon avanzado del Programa de Papa del INIFAP 99-39 mostró diferencias estadísticas, con mayor producción al suministrar la solución nutritiva 200:80:450:100, lo que probablemente se debió a la alta productividad de ese material genético. En ese ciclo, no se encontraron diferencias estadísticas ($P < 0.05$) cuando se comparó el número de minitubérculos por planta, de diámetro igual o mayor de 15 mm, producido con las cuatro soluciones nutritivas evaluadas, para Bajío, Citlali, Cristal, Fianna, Granate, Milagros, Modesta Blanca, Nau, Sierras, Nevada y Real 14.

En el ciclo primavera-verano se observó menor producción de tubérculos y, por consecuencia, menor peso de tubérculos por planta, para la mayoría de los genotipos; ello puede deberse a las temperaturas templadas por la noche que pudieron evitar la movilización eficiente de fotosintatos de las hojas a estolones, relación que ha sido reportada por

Beukema y Van der Zaag (1990) y encontrada también por Flores-Gutiérrez *et al.* (2018) en el cultivo de papa, en los valles altos del centro de la República Mexicana.

En el Cuadro 6 se presenta el peso de tubérculos de diámetro igual o mayor de 15 mm y se observa que las dosis con 350 y 450 mg·L⁻¹ de potasio promovieron mayor peso en los tubérculos de la variedad Cristal; para el caso de Fianna, la nutrición con la solución testigo resultó la de menor peso de tubérculos por planta.

Cuadro 6. Productividad de doce genotipos mexicanos de papa en el ciclo de cultivo marzo a julio con cuatro soluciones nutritivas. Interacción genotipo x solución. Peso de tubérculos \geq 15 mm de diámetro, promedio por planta.

Genotipo	Ciclo 2 (marzo a julio 2016)			
	Soluciones (N:P:K:Ca)			
	1 200:80:300:10 0	2 200:80:350:100	3 200:80:450:100	4 160:60:250:150
Bajío	278.3 a*	288.0 a	304.7 a	288.3 a
Citlali	183.3 a	181.7 a	195.0 a	184.3 a
Cristal	242.7 b	253.0 ab	274.0 a	241.7 b
Fianna (t)	311.3 ab	293.7 ab	317.3 a	282.3 b
Granate	169.7 a	166.3 a	178.7 a	178.0 a
Milagros	138.7 a	144.4 a	146.0 a	147.0 a
Modesta	156.7 a	148.7 a	154.7 a	145.0 a
Nau	335.0 a	354.7 a	331.0 a	359.0 a
Sierras	225.0 a	241.3 a	243.7 a	222.0 a
Nevada	180.3 a	191.3 a	204.7 a	186.3 a
Real 14	245.3 a	249.0 a	256.7 a	241.0 a
Clon 99-39	271.3 a	255.7 a	282.0 a	257.3 a

* Promedios con la misma letra no difieren estadísticamente $P < 0.05$, de acuerdo con la prueba de Tukey. Aplica para los valores de cada genotipo, no entre genotipos.

Conclusiones

Concentraciones de potasio por arriba de 350 mg L⁻¹, suministradas desde el inicio del cultivo, favorecen el número y diámetro de minitubérculos.

La influencia en la productividad por el genotipo se hizo evidente al detectar algunos con mayor potencial de rendimiento.

El mayor índice de cosecha se presentó en genotipos con potencial para uso industrial.

La estación del año, afecta fuertemente la productividad de los genotipos en estudio.

Literatura citada

- Beukema, H. P.; 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 90-0963-7.
- Bonilla, I. (2008). Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. In Fundamentos de fisiología vegetal, ed. J. Azcon-Bieto y M. Talón. 103-121. España. McGraw-Hill Interamericana.
- Chang, D. C.; Park, C. S.; Kim, S. Y.; Kim, S. J.; Lee, Y. B. (2008). Physiological growth responses by nutrient interruption in aeroponically grown potatoes. American journal of Potato Research, 85(5), 315-323.
- Coraspe-León, H. M.; Muraoka, T.; Franzini, V. I.; y do Prado G. N. 2008. Nitrógeno y potasio en solución nutritiva para la producción de tubérculos-semilla de papa. Agronomía Tropical 58 (4): 417-425.
- Corrêa, R. M.; Pinto, J. E. B. P.; Pinto, C. A. B. P.; Faquin, V.; Reis, E. S.; Monteiro, A. B. and Dyer, W. E. 2008. A comparison of potato seed tuber yields in beds, pots and hydroponic systems. Scientia Horticulturae 116 (1): 17-20.
- 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.
- Favela-Chávez, E.; Preciado-Rangel, P.; Benavides-Mendoza, A. (2006). Manual para la preparación de soluciones nutritivas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, México. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Flores-Gutiérrez, F. X; Flores-López, R.; Mora-Herrera, M. E.; Franco-Mora, O. 2018. Respuesta del clon mexicano de papa 99-39 a potasio en hidroponía e invernadero. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 9 (6): 1123-1135.
- Flores-López, R.; Sánchez del Castillo, F.; Rodríguez- Pérez, J. R.; Colinas-León, M. T; Mora-Aguilar, R. y Lozoya-Saldaña, H. 2009. Densidad de población en cultivo hidropónico para la producción de tubérculo-semilla de Papa (*Solanum tuberosum* L.). Revista Chapingo. Serie Horticultura 3, 251-258.

- Flores-López, R.; Rubio-Covarrubias, O. A. y Sotelo-Ruiz, E. D. 2014. Manual de producción de papa apta para siembra en invernaderos rústicos. Manual Técnico Núm. 1. Sitio Experimental Metepec, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México.
- Flores-López, R.; Sotelo-Ruiz E.; Rubio-Covarrubias, O.; Álvarez-González, A. y Marín-Casimiro, M. 2016. Niveles de NPK para la producción de minitubérculos de papa en invernadero en el Valle de Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7 (5): 1131-1142.
- INEGI. (2009). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Zinacantepec, México. Clave Geoestadística 15118. INEGI, México, D. F.
- Lommen, W.J.M. 2007. The canon of potato science: 27. Hydroponics. *Potato Research* 50 (3), 315-318. DOI 10. 1007/s11540-008-9053-x.
- Martínez-Garza, Á. 1996. Diseños Experimentales: métodos y elementos de teoría. Editorial Trillas. México.
- Mulder, A. and Turkensteen, L. 2005. Potassium deficiency. In: Mulder, A. and Turkensteen, L. (Eds.) *Potato diseases: diseases, pests and defects* (pp 209-2011). NIVAP, Holland.
- Muro, J.; V. Díaz; J. L. Goñi; C. Lamsfus. (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 Research* 40 (4): 431-438.
- Palta, J. P. (2010). Improving potato tuber quality and production by targeted calcium nutrition: the discovery of tuber roots leading to a new concept in potato nutrition. *Potato research* 53(4): 267-275.
- Salisbury, B. F.; C. W Ross. (2000). *Fisiología de las plantas 1: Células, agua y superficies*. Spanish translation by J. M. Alonso. Spain: International Thompson Editores.
- SENASICA. 2015. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Norma Oficial Mexicana NOM-041-FITO-2002. Requisitos y especificaciones fitosanitarios para la producción de material propagativo asexual de papa. Recuperado de www.senasica.gob.mx/doc=621.
- SMN. 2017. Servicio Meteorológico Nacional. Comisión Nacional del Agua. Observatorio Meteorológico 76675. Centro de Previsión Meteorológica Toluca. Disponible en

- línea: smn.cna.gob.mx/emas/txt/mx40_10M.TXT. Consultado el 15 de septiembre de 2019.
- Struik, P. C. 2007. The canon of potato science: 25. Minitubers. *Potato Research* 50 (3): 305-308. DOI: 10.1007/s11540-008-9051-z.
- Tierno, R; Carrasco, A. and Ritter, E. 2013. Differential growth response and minituber production of three potato cultivars under aeroponics and greenhouse bed culture. *American Journal of Potato Research*. Published online: 21 November 2013. DOI 10.1007/s12230-013-9354-8.
- Wastermann, D. T. (1993). Fertility management In *Potato health management*, ed. Randall C. Rowe, 77-86 USA: The American Phytopathological Society, APS Press.

VIII. Discusión General

La ausencia de potasio en la solución nutritiva repercutió en una baja altura de planta del clon mexicano de papa 99-39, lo que coincide con lo reportado por Beukema y Van der Zaag (1990) en el sentido de que la falta de potasio provoca enanismo en las plantas de papa; además de que se observó la presencia de lesiones en las hojas causadas por Tizón Tardío (*Phytophthora infestans*) en la siembra de julio a octubre (época húmeda) lo que coincide con lo señalado 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. La coloración de los folíolos de las plantas sin potasio fue parda/café, síntoma característico de la deficiencia de este elemento en la planta de papa (Mulder y Turkensteen, 2005).

La producción de minitubérculos de tamaño comercial (diámetro igual o mayor de 15 mm) se vio afectado por la disponibilidad de potasio en la solución nutritiva; en este sentido; la dosis de 350 mg L⁻¹ 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, probablemente debido a es relevante en el rendimiento, como lo señalan Westermann *et al.* (1994). 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. El bajo número de tubérculos por planta en los tratamientos con menor potasio, lo que probablemente puede deberse a la competencia por asimilados al iniciarse la diferenciación y puede ocasionar el aborto de tubérculos Viola *et al.* (2001). Por lo que posiblemente, al tener mayor disponibilidad de potasio en las primeras etapas de desarrollo de la planta, posiblemente la dosis de 350 mg L⁻¹ de K produjera 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).

Para la producción de tubérculos ≥ 15 mm de diámetro se estimó la dosis óptima de potasio que fue de 400 mg L⁻¹ de K para la producción de 20.67 minitubérculos ≥ 15 mm de diámetro por planta; lo que equivale a 827 tubérculos por m² y a 827 mil tubérculos en 1 000 m² de superficie útil de invernadero, cantidad suficiente para sembrar más de 10 hectáreas en primera generación de campo.

La interacción fecha x dosis para las variable producción de tubérculos ≥ 15 mm de diámetro, mostró mejor repuesta en el período julio a octubre, cuando las temperaturas y fotoperiodo fueron superiores a las exhibidas entre septiembre y diciembre; lo anterior posiblemente se asocia 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 mg L⁻¹ 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 serie de experimentos tendientes a determinar la dosis óptima de calcio, no se encontraron grandes diferencias entre las dosis probadas, 0, 50, 100, 150, 250 y 350 mg L⁻¹ Ca para la mayoría de variables evaluadas; sin embargo, las plantas de la parcela experimental a las que no se les aplicó calcio en la solución nutritiva, mostraron un color amarillo en las hojas pequeñas y en los puntos de crecimiento, síntoma de falta de ese elemento (Mulder y Turkensteen, 2005), aspecto que podría ser de importancia al calificar la producción de semilla prebásica II, ya que podría confundirse con síntomas de alguna enfermedad. Aunque la concentración testigo no evidenció reducciones fuertes en la productividad del clon 99-39, sí es importante el efecto de amarillamiento en las plantas sin calcio, por lo que es indiscutible la necesidad de aplicación de este elemento esencial (Favela-Chávez *et al.*, 2006). Los resultados obtenidos en este estudio corresponden a las dosis de calcio utilizadas en otros estudios de nutrición en papa (Corape-León *et al.*, 2009; Flores-

López *et al.*, 2016; Flores-Gutiérrez *et al.*, 2018). Considerando la sintomatología de la ausencia de calcio, en este trabajo se encontró que las dosis de 50, 100 y 150 mg·L⁻¹ de este elemento esencial pueden ser suficientes para el clon mexicano de papa 99-39. En la interacción fecha de cultivo x dosis de calcio, sobresalió la dosis de 100 mg·L⁻¹ de calcio.

Cuando se probaron dos sustratos (perlita grado hortícola y agregados) con dos genotipos (clon 99-39 y Citlali) en tres épocas de cultivo, se determinó que el índice de verdor (SPAD) de los genotipos resultó relativamente constante para cada uno de los clones a través del ciclo de cultivo y en las tres épocas de siembra; en general, la variedad Citlali tuvo valores SPAD estadísticamente superiores ($P \leq 0.05$) a los registrados para el clon 99-39; lo cual es debido a las características fenotípicas de ambos cultivares, Citlali tiene coloración verde más intensa en su follaje. El valor del IAF en perlita fue superior ($P \leq 0.05$) al de perlita que en agregados. Tanto el índice de área foliar, como la altura de planta fueron estadísticamente superiores en perlita, respecto a los valores registrados en la mezcla de sustratos, probablemente debido a la frecuencia de suministro de la solución nutritiva.

Ambos genotipos tuvieron mayor producción de minitubérculos cuando se cultivaron en perlita que en la mezcla de turba:perlita, en la interacción ciclo x sustrato, se produjeron más tubérculos pequeños en perlita que en agregados, considerando los tres ciclos. El hecho de que en perlita la planta produjo más tubérculos de diámetro menor a 15 mm, probablemente se debió a la disponibilidad de nutrientes de forma continua, lo que se reflejó en el número de tubérculos totales por planta, lo anterior coincide con lo señalado por Minhas *et al.* (2004), quienes mencionan una mayor producción de tubérculos a mayor disponibilidad de asimilados.

Los genotipos cultivados en perlita grado hortícola produjeron 83% más minitubérculos que en el de agregados, lo que coincide con lo reportado por Adams (2004), quien reporta que los rendimientos son menores en sustratos orgánicos que en sustratos inorgánicos en hidroponía; además de considerar el suministro continuo de la solución nutritiva en el sustrato perlita y el abastecimiento de nutrientes cada dos días en el sustrato agregados. El clon 99-39 tuvo una productividad por planta de 24.83 minitubérculos mayores de 15 mm de

diámetro, rendimiento estadísticamente superior ($P \leq 0.05$) al obtenido por la variedad Citlali con 13.92 tubérculos por planta, en promedio de los tres ciclos y dos sustratos.

Por otro lado, se produjeron más minitubérculos de tamaño igual o mayor a 15 mm de diámetro en el ciclo otoño-invierno, respecto a lo obtenido en primavera-verano y verano-otoño como promedio de los dos cultivares en los dos sustratos. Se sabe que la papa tiene mayor rendimiento cuando la diferencia entre las temperatura máxima y mínima son altas y la temperatura nocturna es menor de 18°C, lo que coincide con lo señalado por Beukema y Van der Zaag (1990). Se encontró que el clon 99-39 produjo más tubérculos por planta que la variedad Citlali; así mismo, en los tres ciclos de producción el clon 99-39 generó, en promedio por planta, 34 minitubérculos iguales o mayores de 15 mm de diámetro, con perlita; no obstante, la productividad de ese clon se redujo significativamente cuando se cultivó en agregados, en donde solamente produjo 15.41 tubérculos por planta > 15 mm de diámetro. La variedad Citlali produjo por planta 15.9 tubérculos de tamaño igual o mayor de 15 mm de diámetro, cuando se cultivó en perlita y 11.9 en agregados.

La interacción ciclo x sistema fue la de mayor impacto, ya que fue notable la producción de minitubérculos de diámetro igual o mayor de 15 mm en el ciclo otoño en perlita, época en que los genotipos produjeron 42.25 tubérculos por planta, cifra significativamente mayor a la del resto de en la interacción ciclo x sustrato x genotipo, el clon 99-39 sembrado en el ciclo otoño-invierno rindió 10 veces más que la variedad Citlali sembrada en agregados. por ello, es posible señalar que el efecto de temperatura es fundamental en la productividad de los materiales y coincide con lo mencionado por Beukema y Van der Zaag (1990); y es también evidente que la respuesta de los cultivares fue diversa en este trabajo realizado en sistema hidropónico y concuerda con lo señalado por Muro *et al.* (1997), Corrêa *et al.* (2008) y Tierno *et al.* (2013).

Considerando solo el genotipo 99-39 en otoño y sembrado en perlita produjo 58 tubérculos por planta, el mismo clon sembrado en primavera con perlita obtuvo 34.3. Este clon sembrado en agregados rindió 33.5 tubérculos por planta en otoño, Sin embargo, su respuesta en agregados fue de 33.5 tubérculos por planta en otoño, en primavera solo 10.8 y 8.5 en verano.

La variedad Citlali mostró una producción de 34.5 tubérculos por planta cuando se cultivó en perlita, en el ciclo otoño – invierno. En este estudio, el ciclo de cultivo más productivo fue el de otoño-invierno 2015-2016; las condiciones de temperaturas frías por la noche y la diferencia entre la máxima y mínima diaria favoreció la movilización de fotoasimilados hacia los tubérculos, en concordancia con lo señalado por Beukema y Van der Zaag (1990), y la mayor producción de estolones, reportado por Struik y Wiersema (1999).

El peso de los tubérculos del clon 99-39, en general fue menor, probablemente debido a que solamente se cultivaron por 90 días, cuando su ciclo es de al menos 110 días, por ello, sus tubérculos, aunque en buen número, aún podrían ganar mayor peso; especialmente en el ciclo otoño-invierno, cuando las plantas tienden a tener un ciclo más tardío y este hecho sí coincide con lo reportado por Beukema y Van der Zaag (1990).

Al probar doce genotipos en dos ciclos con cuatro soluciones nutritivas, la respuesta varietal al suministro de las soluciones nutritivas en ambos ciclos de cultivo fue diversa entre genotipos; las variedades Granate, Milagros y Modesta blanca alcanzaron la mayor altura de planta a los 80 días después de la siembra; en tanto, Modesta Blanca, Sierras y Nevada mostraron el mayor índice de área foliar en esa etapa del cultivo. El índice de verdor mostró diferencias, aunque éstas probablemente se debieron a las características fenotípicas de los cultivares y no a las dosis de fertilización o al ciclo del cultivo.

La producción de minitubérculos de diámetro mayor o igual a 15 mm presentó mejor respuesta en el ciclo otoño-invierno; en tanto que la producción por planta, en ambos ciclos fue superior y estadísticamente igual para los genotipos, entre ellos 99-39 y Real 14; aunque Real 14 resultó igual que Fianna (t) y Cristal. Milagros fue la variedad que menor número de tubérculos produjo, de este diámetro. Los resultados obtenidos para esta variable indican que las diferencias encontradas en los dos ciclos de producción probablemente se deben a la respuesta varietal; hecho que coincide con lo reportado por Muro *et al.* (1997), Corrêa *et al.* (2008) y Tierno *et al.* (2013).

En relación con el peso de tubérculos por planta de diámetro igual o mayor de 15 mm, la variedad Nau mostró el mejor rendimiento en el promedio de ambos ciclos de cultivo, con

337 gramos por planta, en tanto que Milagros fue la variedad que menor rendimiento mostró, con 149 gramos por planta; probablemente debido a que esta última variedad, así como Modesta blanca, son cultivares de ciclo tardío. Granate aunque es de ciclo intermedio, produce pocos tubérculos por planta, por lo que el peso promedio de la producción fue de 173 gramos; información que coincide con los pesos obtenidos por el clon 020342.1 (liberado como variedad Nevada) en un estudio con diferentes concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio (Flores-López *et al.*, 2016).

Considerando el número total de tubérculos, la variedad Real 14, Modesta Blanca y Cristal produjeron, en promedio de ambos ciclos, 32, 31 y 30 tubérculos, respectivamente y resultaron estadísticamente iguales, y el clon 99-39 resultó estadísticamente igual a Cristal, con 28 minitubérculos producidos por planta, en promedio. La producción de más tubérculos se dio en el ciclo de otoño-invierno y la variedad Modesta Blanca fue la que mayor cantidad de tubérculos pequeños produjo, con un total de 18; seguida de Real 14, Cristal, Sierras y Bajío, con 13, 10, 9 y 9, respectivamente.

El peso total de tubérculos obtenido por los doce genotipos en el promedio de los dos ciclos evaluados mostró que la variedad Nau promedió 340 gramos por planta, siendo significativamente superior, en tanto que los genotipos 99-39, Fianna y Bajío, con 314, 313 y 309 gramos promedio por planta fueron estadísticamente iguales entre sí, pero el cultivar Milagros presentó el menor rendimiento por planta, con únicamente 151 gramos; considerando el ciclo tardío de este genotipo.

A pesar de la diversidad de genotipos, en general mostraron respuestas similares en ambos ciclos de producción, resultados que comprueban el comportamiento diferencial entre ellas y en la interacción genotipo x ciclo, como lo señalan Corrêa *et al.* (2008) y Tierno *et al.* (2013).

Con relación al índice de cosecha, las variedades Citlali, Granate y Nau, mostraron el índice de mayor valor, 0.79, 0.78 y 0.77, respectivamente; es decir, el peso seco de sus tubérculos aportó del 77 al 79% del peso seco total de la planta en estos genotipos. En ese sentido, los cultivares con tubérculos con menor cantidad de materia seca, en el promedio de los dos

ciclos fueron Real 14 (0.68), clon 99-39 (0.69), Sierras (0.69), Modesta Blanca (0.70), Nau (0.70) y Cristal (0.70).

Al considerar el número de tubérculos por planta, promedio de los doce genotipos, por la influencia de la nutrición con nitrógeno, fósforo, potasio y calcio, la solución nutritiva 200:80:450:100 influyó en la producción de una mayor cantidad tubérculos en los ciclos otoño-invierno (ciclo 1) y primavera-verano (ciclo 2); lo que posiblemente se debe a la concentración superior de potasio, ya que los tratamientos con 450 y 350 mg L⁻¹ obtuvieron tanto el mayor número de minitubérculos, como el mayor peso fresco de los mismos; la solución testigo fue la que obtuvo el menor valor para ambas variables; lo anterior concuerda con Flores-Gutiérrez *et al.*, 2018, quienes detectaron los mayores rendimientos, peso fresco y número de minitubérculos con concentraciones de 350 mg L⁻¹ de potasio y con lo mencionado por Beukema y Van der Zaag (1990), quienes señalan la importancia del potasio en la expresión del rendimiento de papa.

Las dosis nutritivas evaluadas en el ciclo otoño-invierno, promovieron la producción de minitubérculos de forma estadísticamente igual para cada genotipo; sin embargo, destacan los casos de Nau, Sierras, Nevada, Real 14 y del clon 99-39. Nau respondió mejor con la dosis testigo, en tanto que Sierras mostró menor producción de tubérculos de diámetro mayor o igual a 15 mm de diámetro con la dosis testigo. Las dosis con 350 y 450 mg·L⁻¹ de potasio promovieron mayor número de tubérculos comerciales en la variedad Real 14 y para el clon 99-39; Chang et al. (2008) encontraron resultados similares, al determinar diferencias para la interacción genotipo x solución nutritiva. La variedad Bajío que obtuvo mayor peso de tubérculos con las dosis de 350 y 450 mg·L⁻¹ de potasio; en tanto que Sierras, y el clon 99-39 mostraron menor peso de tubérculos por planta con la dosis testigo. Para Nevada los tratamientos de nutrición con 300 y 450 mg L⁻¹ de potasio resultaron mejores, aunque para Real 14 el tratamiento 450 mg L⁻¹ resultó más eficiente. Para los genotipos Bajío, Citlali, Cristal, Fianna, Granate, Milagros, Modesta Blanca, y Nevada resultó indistinta la dosis nutritiva que se suplemento, por lo que resulta mejor el empleo del testigo comercial.

Solamente el clon avanzado del Programa de Papa del INIFAP 99-39 mostró diferencias estadísticas, con mayor producción al suministrar la solución nutritiva 200:80:450:100, lo que probablemente se debió a la alta productividad de ese material genético. En el ciclo primavera-verano se observó menor producción de tubérculos y, por consecuencia, menor peso de tubérculos por planta, para la mayoría de los genotipos; ello puede deberse a las temperaturas templadas por la noche que pudieron evitar la movilización eficiente de fotosintatos de las hojas a estolones, relación que ha sido reportada por Beukema y Van der Zaag (1990) y encontrada también por Flores-Gutiérrez *et al.* (2018) en el cultivo de papa, en los valles altos del centro de la República Mexicana.

IX. Conclusiones Generales

Concentraciones mayores de 350 mg L⁻¹ de potasio durante todo el ciclo de cultivo promovieron mayor producción de minitubérculos por planta, en hidroponía bajo condiciones de invernadero, en la mayoría de los clones en estudio.

Las dosis de calcio entre 50 y 150 mg·L⁻¹ en perlita mostraron la mejor repuesta para el clon 99-39.

El sistema de producción en Perlita e hidroponía fue más eficiente con respecto al empleo de agregados.

La estación del año afecta fuertemente la respuesta en número de tubérculos por planta en papa en invernadero e hidroponía.

El mayor índice de cosecha se presentó en genotipos con potencial para uso industrial.

X. Literatura Citada

- Adams, P. 2004. Aspectos del manejo de los diferentes sustratos, su composición, elección y factores medioambientales a considerar. En: Urrestarazu G., M. Coordinador. 2004. Tratado de cultivos sin suelo 3ª Ed. Mundi-Prensa. España.
- Aguilar-León, M. G.; Carrillo-Salazar, J. A.; Rivera-Peña, A. y González-Hernández, 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.
- Alva, A. K.; Hodges, T.; Boydston, R. A.; Collins, H. P. 2002. Dry matter and nitrogen accumulations and partitioning in two potato cultivars. Journal of Plant Nutrition 25 (8): 1621-1630.
- Álvarez-Sánchez, E.; Etchevers, D.; Ortiz, J., Núñez, R.; Volke, V.; Tijerina, L. Martínez A. (1999). Biomass production and phosphorus accumulation of potato as affected by phosphorus nutrition. Journal of Plant Nutrition 22 (1): 205-217.
- Arellano-García, M. A.; Villavicencio-Gutiérrez, E. E. y García-Garza, S. J. 2010. Producción de plántulas y semilla prebásica de variedades comerciales de papa libres de enfermedades. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Saltillo. Folleto Técnico Num. 41.
- Benson, J. H.; Geary, B.; Miller, J. S.; Hopkins, B. G., von Jolley, D.; Stevens M. R. 2009a. *Phytophthora eritroseptica* (pink rot) development in Russet Norkotah potato grown in buffered hydroponic solutions I. Calcium nutrition effects. American Journal of Potato Research 86 (6): 466-471. DOI 10.1007/s12230-009-9101-3.
- Benson, J. H.; Geary, B.; Miller, J. S.; Hopkins, B. G.; von Jolley, D.; Stevens M. R. 2009b. *Phytophthora eritroseptica* (pink rot) development in Russet Norkotah potato grown in buffered hydroponic solutions II. pH effects. American Journal of Potato Research 86 (6): 472-475. DOI 10.1007/s12230-009-9102-2.
- 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.
- Boersig, M. R.; Wagner, S. A. 1988. Hydroponic systems for production of seed tubers. *American Potato Journal* 65 (8): 470-471.
- Bonilla, I. 2013. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. In *Fundamentos de fisiología vegetal*, ed. J. Azcon-Bieto y M. Talón. 103-121. España: McGraw-Hill Interamericana.
- Bonilla, I. 2008. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. In *Fundamentos de fisiología vegetal*, ed. J. Azcon-Bieto y M. Talón. 103-121. España: McGraw-Hill Interamericana.
- Brown, C. R. (2005). Antioxidants in potato. *American Journal of Potato Research* 82: 163-172.
- Chang, D. C.; Park, C. S.; Kim, S. Y.; Kim, S. J.; Lee, Y. B. 2008. Physiological growth responses by nutrient interruption in aeroponically grown potatoes. *American journal of Potato Research*, 85(5), 315-323.
- Chang, D. C.; Choo II, C.; Suh, J. T.; Kim, S. J.; Lee, Y. B. 2011. Growth and yield response of three aeroponically grown potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.) to different electrical conductivities of nutrient solution. *American Journal of Potato Research* 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/s 11540-012-9208-7.
- Chuquillanqui, C.; J. Tenorio; L. F. Salazar 2008. Producción de semilla de papa por hidroponía. En: Centro Internacional de la Papa (CIP). División de Manejo Integrado de Cultivos. Alternativas al uso de bromuro de metilo en la producción de semilla de papa de calidad. Lima, Perú.
- Cogo, C. M.; Andriolo, J. L.; Bisogin, D. A.; dos Santos Godoi, G., R.; Bortolotto, O. C.; Lopes da Luz, G. 2006. Relação potássio-nitrogênio para o diagnóstico e manejo nutricional da cultura da batata. *Pequisa Agropecuaria Brasileira* 41 (12): 1781-1786.

- CONPAPA. 2013. Confederación Nacional de Productores de Papa. 2013. Monografía del sector papa. Recuperado de www.conpapa.org.mx/files/pages/0000000018/ficha-tecnica-2013.pdf.
- Coraspe-León, H. M.; Muraoka, T.; Franzini, V. I.; y do Prado G. N. 2008. Nitrógeno y potasio en solución nutritiva para la producción de tubérculos-semilla de papa. *Agronomía Tropical* 58 (4): 417-425.
- Corrêa, R. M.; Pinto, J. E. B. P.; Pinto, C. A. B. P.; Faquin, V.; Reis, É. S.; Monteiro, A. B.; Dyer, W. E. 2008. A comparison of potato seed tuber yields in beds, pots and hydroponic systems. *Scientia Horticulturae* 116 (1): 17-20.
- Corrêa, R.M.; J.E.B.P. Pinto; V. Faquin; C.A.B.P. Pinto; E.S. Reis. 2009. The production of seed potatoes by hydroponic methods in Brazil. *Fruit, Vegetable and Cereal Science and Biotechnology*. Global Science Books. pp 133-139.
- Cooke, L. R.; Little, G. 2001. The effect of foliar application of phosphonate formulations on the susceptibility of potato tubers to late blight. *Pest Management Science* 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.
- Donnelly, D.J.; Warren K.C.; Coleman S.E. 2003. Potato microtuber production and performance: A Review. *American Journal of Potato Research* 80 (1):103-115.
- Ezeta, F. N. 2001. Producción de semilla de papa en Latinoamérica. *Revista Latinoamericana de la Papa* 12: 1-14.
- Factor, T. L.; de Araujo, A. C.; Kawakami, F. P. C.; Iunck, V. 2007. Produção de minitubérculos básicos de batata em três sistemas hidropônicos. *Horticultura Brasileira* 25: 82-87.
- Fan, R.; Yang, X.; Xie, H.; Reeb, M. A. (2012). Determination of nutrients in hydroponic solutions using mid-infrared spectroscopy. *Scientia Horticulturae* 144 (1): 48-54.
- FAO. 2008. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Nueva luz sobre un tesoro enterrado. Recuperado de www.fao.org/potato-2008/es/actividades/libro.html.
- FAOSTAT. 2019. FAO. Producción de Cultivos. Recuperado de www.fao.org/faostat.

- Farran, I.; and Mingo-Castel, M. 2006. Potato minituber production using aeroponics: Effect of plant density and harvesting intervals. *American Journal of Potato Research* 83 (1): 47-53.
- Favela-Chávez, E.; Preciado-Rangel, P.; Benavides-Mendoza, A. 2006. Manual para la preparación de soluciones nutritivas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, México. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Fernie, A. R. and Willmitzer, L. 2001. Molecular and biochemical triggers of potato tuber development. *Plant Physiol.* 127(4):1459-1465.
- Flores-Gutiérrez, F. X.; Flores-López, R.; Mora-Herrera, M. E. y Franco-Mora, O. 2018. Respuesta del clon mexicano 99-39 a potasio en hidroponía e invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 9 (6): 1123-1135.
- Flores-López, R.; F. Sánchez del Castillo; J.E. Rodríguez-Pérez, R. Mora-Aguilar, M. T. Colinas-León; H. Lozoya-Saldaña. 2009a. Influencia de la radiación solar sobre la producción de tubérculo-semilla de papa bajo cultivo sin suelo. *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 15 (1): 25-30.
- Flores-López, R., F. Sánchez del Castillo; J.E. Rodríguez-Pérez; M.T. Colinas-León; R. Mora-Aguilar; H. Lozoya-Saldaña. 2009b. Densidad de población en cultivo hidropónico para la producción de tubérculo-semilla de Papa (*Solanum tuberosum* L.). *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 3: 251-258.
- Flores López, R.; Sánchez del Castillo, F.; Rodríguez Pérez, J. E.; Mora Aguilar, R.; Colinas León, M. T.; Lozoya Saldaña, H. 2011. Paclobutrazol, uniconazol y cycocel en la producción de tubérculo-semilla de papa en cultivo hidropónico. *Revista Chapingo. Serie horticultura* 17 (2): 173-182.
- Flores-López, R.; O. A. Rubio-Covarrubias; E. Sotelo-Ruiz. 2014. Manual de producción de papa apta para siembra en invernaderos rústicos. Centro de Investigación Regional Centro. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Folleto Técnico Núm. 1.
- Flores-López, R.; E. Sotelo-Ruiz; O. Rubio-Covarrubias; Álvarez-González, A; Marín-Casimiro, 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 y Geografía. 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Zinacantepec, México. Clave Geoestadística 15118. INEGI, México, DF.
- Herrera J. E.; G. J. Scott. 1993. Factores limitantes a la producción y uso de la papa; resultados de la encuesta a los programas nacionales de América Latina. *Revista Latinoamericana de la Papa* 5/6: 122-134.
- Huamán, Z. 1986. Botánica sistemática y morfología de la papa. *Boletín de Información técnica* No.6. 2a ed. Centro Internacional de la papa (CIP).
- Huber, D. M. 1980. The role of mineral nutrition in defense In: *Plant disease: An advanced Treatise: How plants defend themselves*, ed. James G. Horsfall, 381-406 London: Academic Press Ltd.
- Jones, J. B. 2012. *Plant nutrition and soil fertility manual*. 2nd ed. CRC Press. New York, USA.
- Lommen, W.J.M. 2007. The canon of potato science: 27. Hydroponics. *Potato Research* 50 (3): 315-318. DOI 10.1007/s11540-008-9053-x.
- Medeiros, C. A. B.; Ziemer, A. H.; Daniels, J.; Pereira, A. S. 2002. Produção de sementes pré-básicas de batata em sistemas hidropônicos. *Horticultura Brasileira* 20 (1): 110-114.
- Marschner, H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants* 2nd 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.
- Mateus-Rodríguez, J. R.; de Haan, S.; Andrade-Piedra, J. L.; Maldonado, L.; Hareau, G.; Barker, I.; Chuquillanqui, C.; Otazú, V.; Frisancho, R.; Bastos, C.; Pereira, A. S.; Medeiros, C. A.; Montesdeoca, F.; Benítez, J. 2013. Technical and economic analysis of aeroponics and other systems for potato mini-tuber production in Latin America. *American Journal of Potato Research* 90 (4): 353-368. DOI 10.1007/s12230-013-9312-5.

- 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* (pp 209-2011). NIVAP, Holland.
- Muller, D. R.; Bisognin, D. A.; Andriolo, J. L.; Copetti, F. 2007. Produção hidropônica de batata em diferentes concentrações de solução nutritive e épocas de cultivo. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 42 (5): 647-653.
- Muro, J.; V. Díaz; J. L. Goñi; C. Lamsfus. 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 Research* 40 (4): 431-438.
- Novella, M. B.; Andriollo, J. L.;Bisognin, D. A.;Cogo, C. M.; Bandinelli, M- C. 2008. Concentration of nutrient solution in the hydroponic production of potato minitubers. *Ciência Rural, Santa María* 38 (6): 1529-1533.
- Otazú, V. 2008a. Otros productos usados en la esterilización de sustratos. En: Centro Internacional de la Papa (CIP). División de Manejo Integrado de Cultivos. Alternativas al uso de bromuro de metilo en la producción de semilla de papa de calidad. Lima, Perú.
- Otazú, V. 2008b. Solarización de sustratos para invernadero. En: Centro Internacional de la Papa (CIP). División de Manejo Integrado de Cultivos. Alternativas al uso de bromuro de metilo en la producción de semilla de papa de calidad. Lima, Perú.
- Otazú, V. 2008c. Esterilización de sustratos de invernadero por vapor. En: Centro Internacional de la Papa (CIP). División de Manejo Integrado de Cultivos. Alternativas al uso de bromuro de metilo en la producción de semilla de papa de calidad. Lima, Perú.
- 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.

- Pérez L., D. J.; A. González H.; O. Franco M.; A. Balbuena M.; F. Gutiérrez R. 2013. Producción de papa: cultivo y mejoramiento. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Perrenoud, S. 1993. Potato. Fertilizers for yield and quality. International Potash Institute, Berne/Switzerland. IPI Bulletin No. 8. 53-61 pp.
- Palta, J. P. 2010. Improving potato tuber quality and production by targeted calcium nutrition: the discovery of tuber roots leading to a new concept in potato nutrition. *Potato research* 53(4): 267-275.
- Resh, H. M. 2006. Cultivos hidropónicos. Nuevas técnicas de producción. España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Ritter, E.; Angulo, B.; Riga, P.; Herrán, C.; Relloso and M. San Jose, M. 2001. Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers. *Potato Research* 44 (2): 127-135.
- Rocha-Rodríguez, R.; J. A. Quijano-Carranza. 2015. Producción de papa en México. Folleto Técnico Núm. 1. Campo Experimental Bajío. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Rodríguez, L. E. 2010. Origen y evolución de la papa cultivada. *Agronomía Colombiana*, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia 28 (1) 9-17.
- Rolot, J.L; H. Seutin. 1999. Soilless production of potato minitubers using a hydroponic technique. *Potato Research* 42 (3-4): 457-469.
- Rowe, R, C. 1993. Potato health management: a holistic approach. In: *Potato health management*. Rowe, R. C. ed. American Phytopathological Society. USA.
- Rubio C., O. A.; I. H. Almeyda L.; J. Ireta M.; J. A. Sánchez S.; R. Fernández S.; J. T. Borbón S.; C. Díaz H.; J. A. Garzón T.; R. Rocha R.; M. A. Cadena H. 2006. Distribución de la punta morada y *Bactericera cockerelly* Sulco. En la principales zonas productoras de papa en México. *Agricultura Técnica en México* 32 (2): 201-211.
- Rubio-Covarrubias, C. O; Rangel-González, J. A.; Flores-López, R.; Magallanes-González, J. V.; Díaz-Hernández, C.; Zavala-Quintana, T. E.; Rivera-Peña, A.; Cadena-Hinojosa, M. A.; Rocha-Rodríguez, R.; Ortiz-Trejo, C.; López-Delgado, H. A.; Díaz Valasis, M. y Paredes-Tenorio, A. 2000. Manual para la producción de papa en las

- sierras y valles altos del Centro de México. SAGAR. INIFAP. CIRCE. Campo Experimental Valle de Toluca. Libro Técnico No. 1. Zinacantepec, Estado de México. México.
- Rubio-Covarrubias, A. O.; Cadena Hinojosa, M- A.; Flores-López, R.; Vázquez-Carrillo, G.: Díaz-Valasis, M.; Valenzuela-Valdés, J. M.: Parga-Torres, V. M.; Rocha-Rodríguez, R. y López-Delgado, H. A. 2017. Citlali variedad de papa tolerante a punta morada. Folleto Técnico No. 3. INIFAP. Campo Experimental Valle de México. Sitio Experimental Metepec. ISBN:978-607-37-0716-9.
- Salisbury, B. F.; C. W Ross. 2000. Fisiología de las plantas 1: Células, agua y superficies. Spanish translation by J. M. Alonso. Spain: International Thompson Editores.
- SIAP. 2019. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Recuperado de www.infosiap.siap.gob.mx.
- SMN. 2016. Servicio Meteorológico Nacional. Comisión Nacional del Agua. Observatorio Meteorológico 76675. Centro de Previsión Meteorológica Toluca. Recuperado de smn.cna.gob.mx/emas/txt/mx40-10M.TXT.
- SNICS. 2015. Estadísticas de producción de semillas 2011-2014. Recuperado de www.snics.sagarpa.gob.mx/certificación/estadísticas.
- SNICS. 2019. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. Catálogo Nacional de Variedades Vegetales 2018. Recuperado de www.snics.sagarpa.gob.mx.
- SENASICA. 2015. Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Norma Oficial Mexicana NOM-041-FITO-2002. Requisitos y especificaciones fitosanitarios para la producción de material propagativo asexual de papa. Recuperado de www.senasica.gob.mx.
- Silva, E. C. D.; Giusto, A. B.; Sousa-Dias, J. A. C. 2006. Produção de minitubérculos a partir de brotos de batata em diferentes combinações de substratos. Horticultura Brasileira 24 (2): 241-244.
- Silva C., J. G.; França F, T. F.; Gomide J.; Magalhaes, R. 2013. Different nitrogen sources affect biomass partitioning and quality of potato production in a hydroponic system. American Journal of Potato Research 90 (2): 179-185.

- Smiko, J. 1991. Potato tuberization in hydroponic conditions. *Biology Ser. A. (CSFR)* 46:89-90.
- 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
- Tierno, R; Carrasco, A. and Ritter, E. 2013. Differential growth response and minituber production of three potato cultivars under aeroponics and greenhouse bed culture. *American Journal of Potato Research*. Published online: 21 November 2013. DOI 10.1007/s12230-013-9354-8
- Ulrich, A. and K. H. Fong. 1969. Effects of potassium nutrient on growth and cation content of potato leaves and tubers relative to plant analysis. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 94 (1): 356-359.
- 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.
- Wastermann, D. T. 1993. Fertility management In *Potato health management*, ed. Randall C. Rowe, 77-86 USA: The American Phytopathological Society, APS Press.
- Wheeler, R. M.; Hinkle, C. R.; Mackowiak, C. L.; Sager, J. C.; Knott, W. M. 1990. Potato growth and yield using nutrient film technique (NFT). *American potato journal*, 67 (3): 177-187.

- 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.