

CRECIMIENTO DE PLANTAS DE PAPA (*Solanum tuberosum* L., cv Romano), EN LA PROVINCIA DE HUAMBO, ANGOLA, BAJO DOS DENSIDADES DE PLANTACIÓN

Growth of potato plants (*Solanum tuberosum* L., cv Romano), in Huambo province, Angola, under two planting densities

Fernando M. de Almeida¹✉, Walfredo Torres de la Noval²,
Juan A. Cabrera Rodríguez² y Jorge Arzuaga Sánchez^{2†}

ABSTRACT. The growth dynamics of potato plants (*Solanum tuberosum* L.), under the edaphoclimatic conditions of Huambo, Angola, with two row distances, were evaluated by planting “seed” tubers (35-45 mm caliber), in October 2011, 2012 and 2013, under two densities of plantation (0,75 x 0,30 and 0,90 x 0,30 m, distances between rows and between plants, respectively). The dynamics of the average height of the main stem, the fresh and dry masses of the tubers were evaluated, which were adjusted by means of the regression analysis to different mathematical functions, in order to estimate their dynamics and obtain different indicators, the nutritional status was diagnosed 45 days after planting, in 2013, by means of foliar analysis. The tubers were started before plants reached their maximum Absolute Growth Rate (TAC) in stem length, which suggests the establishment of a competition for assimilates between organs. The fresh mass of the tubers was more influenced by the density of plantation, with an advance in the growth with superior values of the TAC and the maximum fresh mass, in the minor. The plants showed a deficient nutritional status; however, planting at lower density reached a less unfavorable level. The dynamics of the evaluated variables, showed that the climate is suitable for the development of the plants and point to the water supply during the “linear” growth of the tubers, and to the mineral nutrition, as aspects for a future optimization of the crop.

Key words: height, tuber weights, growth analysis, distances between rows

RESUMEN. Se evaluó la dinámica de crecimiento de la papa (*Solanum tuberosum* L.) a partir de la evaluación de variables morfoagronómicas, en las condiciones edafoclimáticas de la provincia de Huambo, Angola, bajo dos distancias entre surcos, plantando tubérculos semilla de 35-45 mm, en octubre de 2011, 2012 y 2013, a las distancias entre surcos de 0,75 y 0,90 m y entre plantas de 0,30 m. Se evaluó la dinámica de la longitud del tallo principal y de la masa fresca y seca de los tubérculos, ajustándose por medio del análisis de regresión a diferentes funciones matemáticas; el estado nutricional se diagnosticó a los 45 días después de la plantación, en el año 2013, por medio del análisis foliar. Los tubérculos se iniciaron cuando las plantas no habían alcanzado la máxima Tasa Absoluta de Crecimiento en longitud de sus tallos, lo que sugiere el establecimiento de una competencia por asimilados entre órganos. La masa fresca de los tubérculos resultó más influida por los tratamientos, con un adelanto en el crecimiento, con valores superiores de la TAC y la masa fresca máxima, en la menor densidad. Las plantas mostraron un estado nutricional deficiente; no obstante, la plantación a menor densidad alcanzó un nivel menos desfavorable. Las dinámicas de las variables evaluadas, evidenciaron que el clima resulta adecuado para el desarrollo de las plantas y señalan al suministro hídrico durante el crecimiento “lineal” de los tubérculos, y a la nutrición mineral, como aspectos para una futura optimización del cultivo.

Palabras clave: longitud, masas tubérculos, análisis del crecimiento, distancias entre surcos

¹ Profesor Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad José Eduardo dos Santos de Huambo, Angola

² Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), carretera San José-Tapaste, km 3½, Gaveta Postal 1, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. CP 32700

✉ fernandomanueldealmeida@yahoo.com

INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum* L.) ha servido de sustento alimenticio para la población más pobre y cumple este papel en una escala global (1), constituyéndose en el cuarto cultivo alimenticio más importante del mundo.

La calidad nutricional, adaptabilidad a diferentes climas y métodos de cultivo hacen a la papa adecuada para estos propósitos (2). Se cultiva en ambientes que difieren sustancialmente en latitud, altitud, fotoperiodo y temperaturas.

El rendimiento promedio mundial del cultivo en el año 2016 fue de 19,58 t ha⁻¹ (3) y en el continente africano, los rendimientos anuales promedio se mantienen en el orden de 14,7 t ha⁻¹, mientras que otros autores señalan los 12 países productores de papa en África (3,4), encontrándose en último lugar a Angola, con rendimientos en el 2016 de 5,9 t ha⁻¹ (3).

Diversos factores inciden en la obtención de rendimientos óptimos del tubérculo de papa, entre los que se encuentra el empleo de las distancias y densidades de plantación (5), el suministro de nutrientes (6) y el suministro de agua (7).

En la provincia de Huambo, Angola, en el año 2014 la papa se cultivó en aproximadamente 23 715 ha año⁻¹ con una producción estimada de 201 440 t (8) y no existen resultados de investigaciones agrícolas publicados sobre el manejo agronómico del cultivo, ni se conoce el comportamiento del crecimiento de las plantas bajo estas condiciones particulares, pudiendo estas últimas limitar la obtención de rendimientos superiores.

Es por las anteriores razones que se desarrolló el presente trabajo con el objetivo de estudiar la dinámica de crecimiento de plantas de papa a partir de la evaluación de variables morfoagronómicas, en las condiciones edafoclimáticas de la provincia de Huambo, Angola, bajo dos distancias entre surcos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en el Centro Experimental de Chianga, municipio de Huambo, perteneciente al Instituto de Investigación Agronómica (IIA), entre los paralelos 12° 33' y 12° 46' de latitud Sur y los meridianos 15° 49' y 15° 52' de longitud Este del meridiano de Greenwich, a una altitud desde 1 650 m s.n.m hasta 1 740 m s.n.m.

El suelo del área experimental se clasifica como Rhodic Kandiustalf (9) y para determinar las principales características de su fertilidad, se conformaron dos muestras compuestas por 30 submuestras cada una, tomando 2 kg de suelo en toda el área experimental a las profundidades 0,00-0,15 m y 0,15-0,30 m, respectivamente, previo a la plantación de los experimentos y se analizaron empleando los métodos establecidos en el Laboratorio del Instituto de Investigación Agronómica (IIA) de Huambo, Angola, tal como se describe: el pH se determinó por el método potenciométrico con una relación suelo:agua de 1:2.5 (m:V); para la materia orgánica se utilizó el método de Walkley y Black; el P asimilable se extrajo empleando el método de Bray y Kurtz

No. 1, y se determinó colorimétricamente mediante el desarrollo del color azul por la reducción del complejo molibdofosfórico; los cationes intercambiables se extrajeron con la solución de NH₄OAc 1 mol L⁻¹ a pH 7 y se determinaron el Ca y el Mg por espectrofotometría de absorción atómica y el K por fotometría de llama.

Para la experimentación, se utilizaron tubérculos semilla de producción nacional del cultivar de papa Romano, recomendada por la Dirección Provincial de Agricultura, Desarrollo y Pesca de Huambo; se seleccionaron los de calibre 35-45 mm, empleando un calibrador de fabricación manual. Se almacenaron a luz difusa hasta la brotación múltiple. En el momento de la plantación, fue realizada otra selección para eliminar los tubérculos no aptos y así garantizar la calidad de la semilla a plantar.

Los tubérculos semilla se plantaron el 13, 15 y 21 de octubre, durante los años 2011, 2012 y 2013, respectivamente. Como tratamientos se consideraron las distancias entre surcos de 0,75 m y 0,90 m, con una distancia entre plantas de 0,30 m. Se establecieron dos parcelas de 16 m de largo x 16 m de ancho (256 m²), con 1 137 plantas y 948 plantas para las distancias entre surcos de 0,75 m y 0,90 m, respectivamente.

Durante el desarrollo de cada plantación, se registraron diariamente las temperaturas medias y la precipitación (Figura 1), tomadas en la Estación Meteorológica del IIA, localizada a 200 metros del campo experimental.

La primera fertilización se realizó en el momento de la plantación, con la aplicación de 600 kg ha⁻¹ de la fórmula completa 12-24-12 (N, P₂O₅, K₂O), complementada con la aplicación de 220 kg ha⁻¹ de KCl; una segunda fertilización se realizó a los 30 días después de la plantación (DDP), con 133 kg ha⁻¹ de N utilizando a la urea como portador.

Las labores culturales, excepto la preparación del suelo, se desarrollaron de forma manual y atendiendo a las Normas de Producción de Hortalizas del Ministerio de la Agricultura de Angola. No se aplicó ningún riego, por lo que la satisfacción de las demandas hídricas del cultivo se realizó en base a las precipitaciones ocurridas durante el periodo experimental.

La dinámica del crecimiento de las plantas de papa, se evaluó en las plantas desarrolladas en cada uno de los tratamientos y fechas, a partir de los 21 DDP y hasta 91 días DDP (enero del año posterior a la plantación), para lo cual se realizaron muestreos semanales a diez plantas tomadas al azar en cada parcela experimental.

En cada planta se midió la longitud promedio del tallo principal desde la superficie del suelo hasta la yema terminal, con una regla graduada con ± 1 mm de error y se expresó en centímetros.

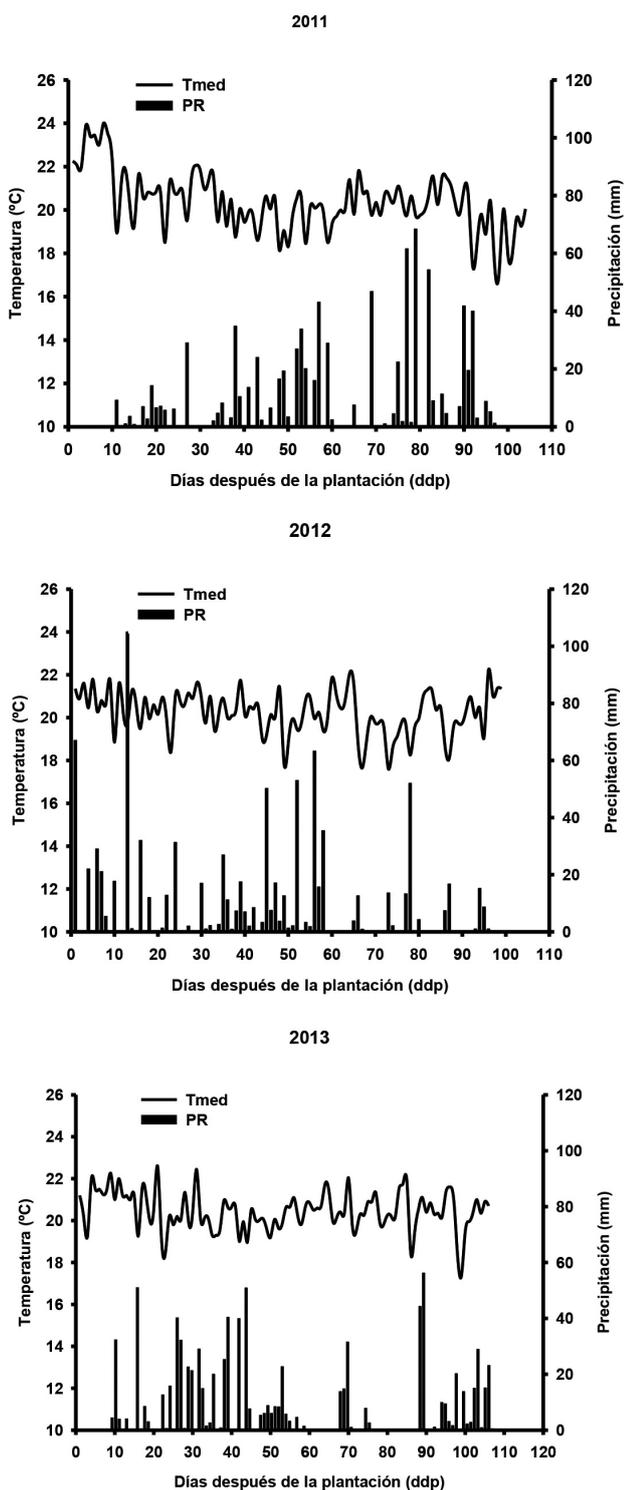


Figura 1. Registro diario de las precipitaciones (mm, Pr) y las temperaturas (°C) media (Tmed), durante el desarrollo de las plantas, en los tres años de experimentación

Para la determinación de la masa fresca de los tubérculos por planta (MFT planta⁻¹), estos se lavaron con agua para eliminar el suelo adherido y se secaron al aire para determinar posteriormente su masa por pesada en balanza técnica con ± 0,01 g de error; la masa seca de los tubérculos por planta (MST planta⁻¹) se estimó a partir de tres muestras representativas de los tubérculos presentes en cada tratamiento, las que fueron trituradas y se pesaron 100 g de cada una, las que se colocaron en recipientes metálicos previamente tarados y se colocaron en estufa de circulación forzada de aire a 80 °C, hasta alcanzar masa constante.

Se graficaron las dinámicas de las medias de las variables evaluadas (variable dependiente) y se ajustaron por medio del análisis de regresión, con el empleo de las funciones matemáticas exponencial polinómica de segundo grado (ecuación I) y gamma (ecuación II), tomándose como variable independiente a los días después de la plantación (DDP):

$$Y = e^{(a+bx+cx^2)} \quad (I)$$

$$Y = b_0 e^{b_1 x} X^{b_2} \quad (II)$$

Se seleccionó la función de mejor ajuste y representación biológica de los datos primarios, siguiendo los principios del método funcional del Análisis del Crecimiento, descrito por Torres (10).

A partir de la primera y la segunda derivadas, de cada ecuación matemática obtenida, se estimó la Tasa Absoluta de Crecimiento (TAC), según la fórmula descrita por Torres (10,11), así como el momento de ocurrencia de la TAC máxima de los tubérculos y su magnitud, el momento del cese del crecimiento de los tubérculos y la magnitud máxima alcanzada por estos.

Para el diagnóstico del estado nutricional de las plantas, se tomó la cuarta hoja totalmente desarrollada y expandida de 40 plantas muestreadas al azar en cada distancia entre surcos, a los 45 DDP en la plantación del 2013-2014, las que se lavaron con agua destilada y se secaron en estufa a 75 °C; posteriormente se molinaron y tamizaron por una malla de 2 mm, realizándose los análisis por triplicado, según la metodología empleada en el Laboratorio del IIA, como se describe a continuación:

digestión a 2 g de la muestra, con 25 mL de H₂SO₄ concentrado, utilizando como catalizador tabletas de CuSO₄; el N se determinó valorando con NaOH 0,1 mol L⁻¹ el destilado recogido en H₃BO₃; el P por el desarrollo del color amarillo del complejo vanadomolibdo fosfórico; el K por fotometría de llama y el Ca y el Mg por espectrofotometría de absorción atómica.

A los resultados del análisis foliar se les determinaron los estadígrafos error estándar (ES) y coeficiente de variación (CV); para comparar el estado nutricional de las plantas se realizó una prueba de “t” de Student al 0,01 % de probabilidad de error.

Los valores obtenidos para cada nutriente se compararon con referencias establecidas en diferentes latitudes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El patrón de la dinámica de la longitud del tallo principal fue similar en los tres años (Figura 2) y las funciones empleadas para el ajuste (Tabla I) describieron satisfactoriamente el comportamiento de los valores reales.

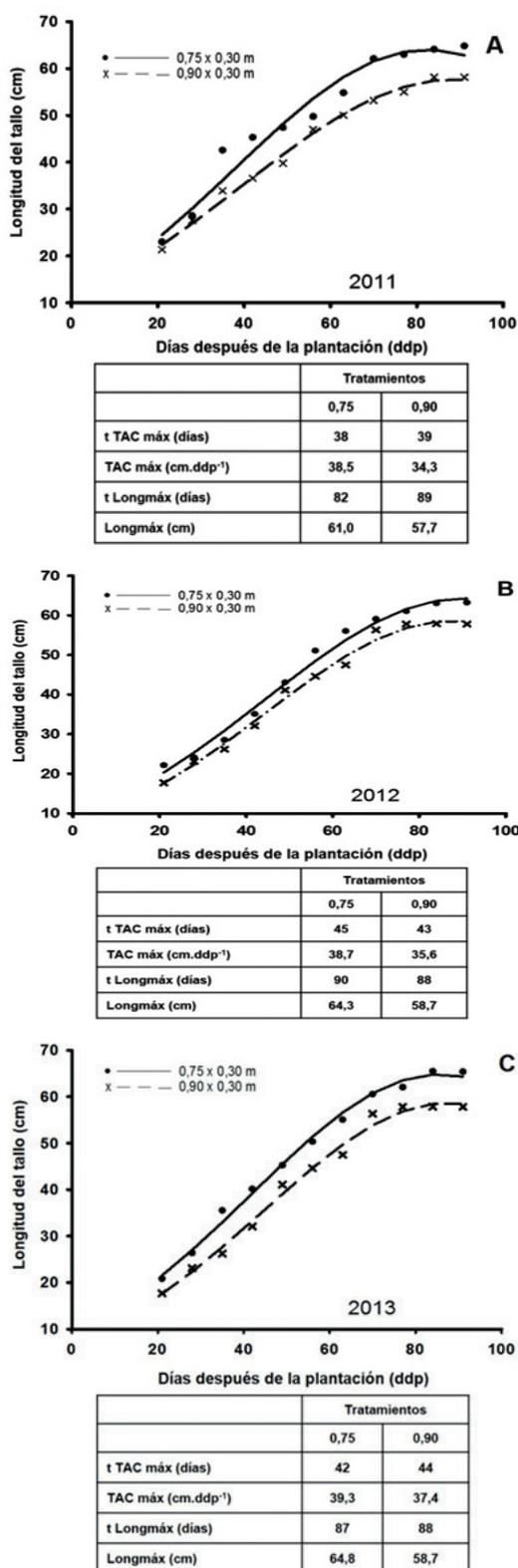
En general para cada año, no se presentaron diferencias entre los dos tratamientos ensayados en el momento (DDP) de alcanzar la máxima Tasa Absoluta de Crecimiento (TAC_{máx}) en longitud del tallo principal (Figura 2), aunque este momento sí varió entre los años y, de manera general, las plantas del tratamiento de 0,75 m entre surcos presentaron valores superiores para esta variable.

La diferencia entre tratamientos para el momento de alcanzar la máxima longitud del tallo principal de las plantas ($T_{Longmáx}$), no presentó una regularidad en los tres años, aunque éstas fueron relativamente despreciables y solo en el primer año de experimentación (2011-2012) fue de siete días, con una detención más temprana del crecimiento en el tratamiento de 0,75 m (Figura 2). Los resultados en la presente investigación demostraron que a los 20 DDP se obtuvieron longitudes entre 17 y 22 cm, a partir del cual las plantas comenzaron un incremento acelerado para ambos tratamientos de distancia entre surcos.

La variable masa fresca de los tubérculos por planta, mostró un comportamiento sigmoideal con la edad del cultivo en todos los tratamientos y años de experimentación (Figura 3), presentando un ajuste satisfactorio a las funciones escogidas para la descripción de la dinámica del crecimiento (Tabla II).

Para ambas distancias estudiadas y en los tres años evaluados, la iniciación de los tubérculos de las plantas ocurrió entre los 20 y los 28 DDP (Figura 3). Después de su iniciación se presentó un incremento sostenido de la masa fresca de los mismos; de esta manera, se estableció un nuevo sitio de consumo y de competencia, entre el crecimiento en longitud de los tallos (tendiendo a decrecer) y el crecimiento de los tubérculos (tendiendo a incrementar), por los productos de la fotosíntesis elaborados por el follaje, a edades tempranas del desarrollo de las plantas.

Consecuentemente, las $TAC_{máx}$ se lograron en un momento temprano del desarrollo de las plantas, entre 50 y 64 DDP aproximadamente y, siempre de manera más temprana en el tratamiento de 0,90 m entre surcos, con una diferencia, de 8 a 13 días con relación al de 0,75 m, dependiendo del año de plantación.



TTAC_{máx}: tiempo en el que se alcanza la máxima Tasa Absoluta de Crecimiento; TAC_{máx}: valor de la máxima Tasa Absoluta de Crecimiento; TLong_{máx}: tiempo en el que se alcanza el valor máximo de la longitud; Long_{máx}: valor máximo de la Longitud del tallo

Figura 2. Dinámicas estimadas de la longitud promedio del tallo (cm) de plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) en diferentes distancias entre surcos y variables derivadas de las mismas

Tabla I. Ecuaciones para la dinámica de la longitud promedio del tallo principal (cm) en función de los días después de la plantación (DDP), a partir del ajuste por medio del análisis de regresión de los datos experimentales, de plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.), bajo dos distancias entre surcos

Tratamiento	2011-2012	2012-2013	2013-2014
Longitud promedio del tallo principal (cm)			
0,75 m	$Y = e^{(2,4+0,04X-0,0003X^2)}$ $R^2 = 94,7$	$Y = e^{(2,2+0,04X-0,0002X^2)}$ $R^2 = 98,1$	$Y = e^{(2,2+0,05X-0,0003X^2)}$ $R^2 = 99,2$
0,90 m	$Y = e^{(2,4+0,04X-0,0002X^2)}$ $R^2 = 98,9$	$Y = e^{(1,9+0,05X-0,0003X^2)}$ $R^2 = 99,1$	$Y = e^{(2,2+0,04X-0,0002X^2)}$ $R^2 = 99,6$

Tabla II. Ecuaciones para la dinámica de la masa fresca promedio de tubérculos por planta (g) en función de los días después de la plantación (DDP), a partir del ajuste por medio del análisis de regresión de los datos experimentales, de plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.), bajo dos distancias entre surcos

Tratamiento	2011-2012	2012-2013	2013-2014
Masa fresca de tubérculos por planta (g pl ⁻¹)			
0,75 m	$Y = -29,9e^{-0,1x}X^{10,6}$ $R^2 = 98,4$	$Y = e^{(-2,1+0,2X-0,001X^2)}$ $R^2 = 98,1$	$Y = e^{(-2,1+0,2X-0,001X^2)}$ $R^2 = 98,1$
0,90 m	$Y = -19,3e^{-0,1x}X^{7,7}$ $R^2 = 97,9$	$Y = -19,9e^{-0,09x}X^{7,9}$ $R^2 = 98,3$	$Y = -19,9e^{-0,09x}X^{7,9}$ $R^2 = 98,3$

Las magnitudes de estas TAC_{max} resultaron siempre superiores en el tratamiento de menor densidad de plantación.

La máxima masa fresca y el momento de desarrollo en que se alcanza ésta, mostraron diferencias entre tratamientos (Figura 3), de manera más temprana y siempre con una magnitud superior en el tratamiento de menor densidad de plantación. Atendiendo a la generalidad del cultivo para las condiciones de experimentación en la provincia de Huambo, el valor máximo de masa fresca de los tubérculos se alcanzó en un período de tiempo aproximado entre 78 y 85 DDP.

Al igual que para la masa fresca de los tubérculos por planta, su masa seca mostró un comportamiento sigmoidal al relacionarla con los días después de la plantación, en todos los tratamientos y campañas (Figura 4), presentando un ajuste satisfactorio a las funciones empleadas para la estimación de su dinámica (Tabla III).

Los momentos de alcanzar la TAC_{max} del crecimiento de los tubérculos, en función de la masa seca y sus valores (Figura 4), no coincidieron de manera general con lo logrado para la masa fresca, encontrándose una demora, en el 66 % de los tratamientos y años de plantación, para lograr la máxima intensidad de crecimiento.

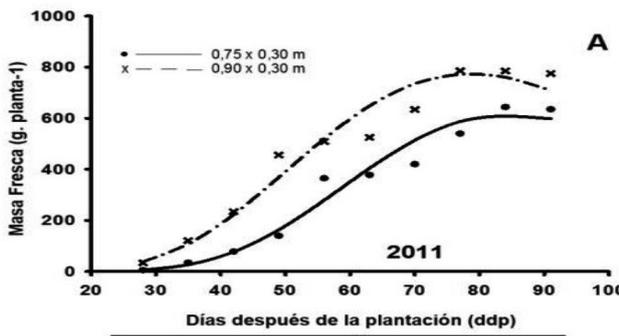
Una situación similar se presentó para el momento de lograr la máxima masa seca de los tubérculos, la que por lo general se alcanza de manera más tardía en comparación con lo mostrado por la masa fresca. Se

demonstró que no necesariamente, la acumulación de masa fresca va aparejada a un comportamiento similar en la masa seca de los tubérculos, lo que permite interpretar que, aunque son variables relacionadas, los factores que rigen la acumulación de masa fresca no son los mismos a los de la masa seca (12).

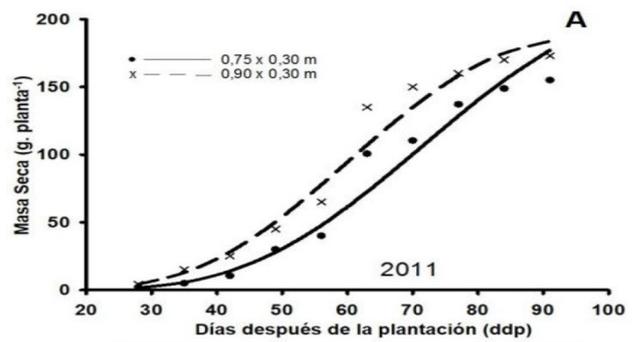
Aun cuando el análisis funcional permite lograr una visión general del mismo, se pudo detectar en todos los años en estudio, la influencia de los tratamientos de distancia entre surcos, en las variables evaluadas, mostrando la mayor longitud promedio del tallo principal el tratamiento de 0,75 m y las mayores masas fresca y seca, el tratamiento de 0,90 m. Por otra parte, las curvas de crecimiento de los tubérculos mostraron el inicio temprano de los mismos y su duración en un período de aproximadamente 90 DDP.

Autores señalaron que el inicio de la tuberización es un proceso influido por factores ambientales tales como la temperatura y el fotoperíodo (13)7 and 14 mm, mediado por los niveles de reguladores endógenos del crecimiento (14); resultando en un incremento del volumen de la médula y la corteza del estolón, debido a la división celular y expansión.

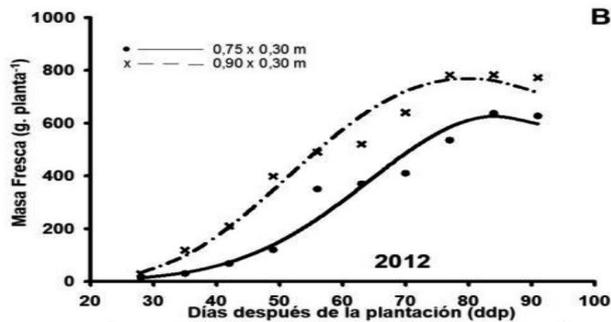
La ubicación geográfica de la provincia de Huambo, Angola, hace que el fotoperíodo para el desarrollo del cultivo se encuentre alrededor de las 12 horas, lo que provoca que el crecimiento de los tubérculos esté favorecido, atendiendo a que, en general, el fotoperíodo corto acelera el inicio de la tuberización. La exportación de asimilados desde las hojas es mayor en días cortos que en días largos (15).



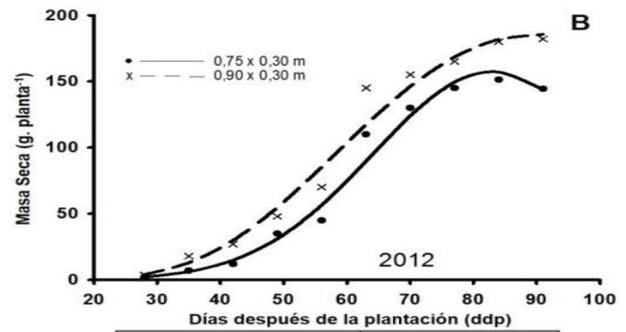
	Tratamientos	
	0,75	0,90
t TAC máx (días)	59	50
TAC máx (g.pta.ddp ⁻¹)	329,0	397,3
t MF tmáx (días)	85	79
MF máx (g pta ⁻¹)	619,5	773,3



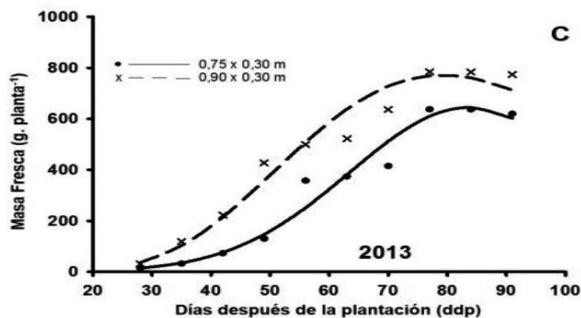
	Tratamientos	
	0,75	0,90
t TAC máx (días)	71	60
TAC máx (g.pta.ddp ⁻¹)	118,56	94,50
t MS tmáx (días)	97	96
MS máx (g pta ⁻¹)	171,26	185,45



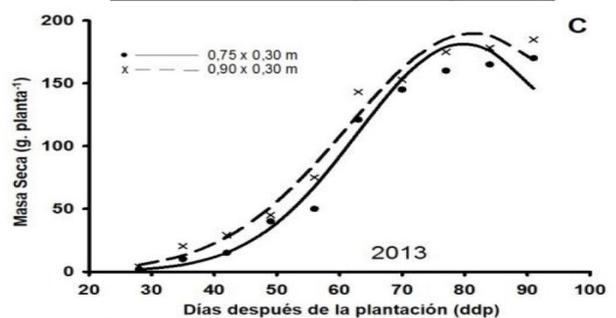
	Tratamientos	
	0,75	0,90
t TAC máx (días)	64	51
TAC máx (g.pta.ddp ⁻¹)	380,0	395,9
t MF tmáx (días)	85	79
MF máx (g pta ⁻¹)	626,5	741,8



	Tratamientos	
	0,75	0,90
t TAC máx (días)	64	58
TAC máx (g.pta.ddp ⁻¹)	95,78	95,56
t MS tmáx (días)	83	90
MS máx (g pta ⁻¹)	157,69	185,67



	Tratamientos	
	0,75	0,90
t TAC máx (días)	64	51
TAC máx (g.pta.ddp ⁻¹)	390,8	396,5
t MF tmáx (días)	84	79
MF máx (g pta ⁻¹)	644,3	771,0



	Tratamientos	
	0,75	0,90
t TAC máx (días)	60	61
TAC máx (g.pta.ddp ⁻¹)	90,75	115,14
t MS tmáx (días)	80	81
MS máx (g pta ⁻¹)	181,27	189,27

TTACmáx: tiempo en el que se alcanza la máxima Tasa Absoluta de Crecimiento; TACmáx: valor de la máxima Tasa Absoluta de Crecimiento; TMFmáx: tiempo en el que se alcanza el valor máximo de la masa fresca del tubérculo; MFmáx: valor máximo de la masa fresca; pta: planta; dist.: distancia

Figura 3. Dinámicas estimadas de la masa fresca del tubérculo (g por planta⁻¹) de plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) en diferentes distancias entre surcos y variables derivadas de las mismas

TTACmáx: tiempo en el que se alcanza la máxima Tasa Absoluta de Crecimiento; TACmáx: valor de la máxima Tasa Absoluta de Crecimiento; TMSmáx: tiempo en el que se alcanza el valor máximo de la masa seca del tubérculo; MSmáx: valor máximo de la masa seca; pta: planta; dist.: distancia

Figura 4. Dinámicas estimadas de la masa seca del tubérculo (g por planta⁻¹) de plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) en diferentes distancias entre surcos y variables derivadas de las mismas

Tabla III. Ecuaciones para la dinámica de la masa seca promedio de tubérculos por planta (g) en función de los días después de la plantación (DDP), a partir del ajuste por medio del análisis de regresión de los datos experimentales, de plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.), bajo dos distancias entre surcos

Tratamiento	2011-2012	2012-2013	2013-2014
Masa seca de tubérculos por planta (g pl ⁻¹)			
0,75 m	$Y = -23,1e^{-0,07x}X^{7,7}$ $R^2 = 98,10$	$Y = e^{(-4,6+0,2X-0,001X^2)}$ $R^2 = 97,9$	$Y = e^{(-3,5+0,2X-0,001X^2)}$ $R^2 = 97,2$
0,90 m	$Y = -19,6e^{-0,07x}X^{6,9}$ $R^2 = 97,0$	$Y = -17,7e^{-0,06x}X^{6,4}$ $R^2 = 98,5$	$Y = e^{(-1,2+0,15X-0,0009X^2)}$ $R^2 = 97,3$

Lo anterior permite señalar que las condiciones de fotoperíodo en Angola son adecuadas para una iniciación de la tuberización rápida, ya que éste se enmarca en el rango de 12,4 a 12,7 horas.

Por otra parte, las temperaturas promedio prevalecientes, en las fechas de plantación empleadas, se encontraron entre 20 a 21 °C (Figura 1), las que resultan adecuadas para el proceso de inicio y desarrollo de los tubérculos, y se mantuvieron relativamente bajas durante todo el período de crecimiento, tomando en consideración lo planteado, de que los efectos negativos del incremento en las temperaturas depende del estadio de desarrollo de la planta, presentando un efecto más pronunciado en el crecimiento y el rendimiento a medida que se presenten de manera más temprana en el desarrollo de las plantas (16).

Para un óptimo crecimiento y desarrollo del cultivo de la papa se requiere que las temperaturas se encuentren en el rango entre 15 a 25 °C, debiendo ser éstas más bajas durante la noche para lograr la óptima para la actividad fotosintética, facilitar el transporte de los fotoasimilados, la masa seca final y la mayor proporción de la masa de tubérculos a la total (17).

El cultivo se desarrolló sin la aplicación de riego y el acumulado de las precipitaciones durante el desarrollo de las plantas estuvo en el orden de los 835; 959 y 889 mm, en las fechas de plantación del 2011; 2012 y 2013, respectivamente (Figura 1). Se pudiera pensar que estos volúmenes garantizan el desarrollo adecuado del tubérculo ya que las precipitaciones se encontraron entre los 400 a 800 mm durante el ciclo biológico de la planta, cantidades que se requieren para lograr un óptimo crecimiento y desarrollo de las plantas de papa; sin embargo, la distribución de las precipitaciones no resultó regular, presentándose períodos de escasa lluvia, sobre todo durante el crecimiento "lineal" de los tubérculos, uno de los estadios más afectados por la deficiencia hídrica (18), y que aproximadamente se relacionan con las detenciones de éste que se aprecian entre los 50 y 80 DDP en las tres fechas (puntos reales, Figura 3).

Para producir rendimientos de tubérculos de óptima calidad, las plantas requieren un adecuado suministro de recursos del suelo (agua y nutrientes minerales) y recursos de la atmósfera, como CO₂, O₂ y Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA). Más del 90 % de la masa seca de una planta de papa se obtiene en el proceso de fotosíntesis, en el cual el CO₂, fijado y reducido a carbohidratos, es determinante para la producción de tubérculos y otros órganos vegetales.

En general, el cultivo de la papa desarrolla un follaje de larga duración, que favorece la intercepción de una alta proporción de la RFA, que para interceptar de 90 a 95 % de la RFA, se ha encontrado que el Índice de Área Foliar crítico (IAF) debe estar cercano a tres (19), aspecto que además está estrechamente vinculado a la distancia de plantación.

Al respecto, al determinar la influencia de la densidad de plantación (45; 25; 16 y 8 plantas m⁻²), sobre la producción de mini tubérculos mayores de 10 mm de diámetro e indicadores fisiológicos del crecimiento, en condiciones de invernadero e hidroponía en la variedad Gigant (20), concluyeron que la Tasa de Crecimiento (TAC) de la planta completa fue influida positivamente por la densidad y la etapa de desarrollo del cultivo, mientras que la TAC de los tubérculos, a menor densidad fue superior al tratamiento con 45 plantas m⁻²; la eficiencia fotosintética y el traslado de carbohidratos al tubérculo, medidos como Tasa de Asimilación Neta (TAN) y Tasa de Asimilación Económica Neta (TAEN), fueron de 118 a 160 % mayores en la densidad de 8 plantas·m⁻², lo que pudo haber ocurrido en la masa fresca y seca de los experimentos de esta investigación.

Se encontró que el tratamiento de la distancia entre surcos de 0,90 m provocó plantas de menor altura y mayor masa fresca y seca de los tubérculos, con respecto a la distancia de 0,75 m. Una de las causas puede ser que en la medida que se incrementa la distancia de plantación existe un menor auto sombreado entre las plantas y con ello se logra un mayor aprovechamiento de la RFA por las plantas, que se traduce en una mayor producción de fotoasimilados que garantiza las sustancias necesarias para el proceso de tuberización.

A su vez, otros estudios indicaron que la producción de masa seca total es el resultado de la eficiencia del follaje del cultivo en la interceptación y utilización de la radiación solar disponible durante el ciclo de crecimiento (21); lo que se resume en factores internos de crecimiento relacionados con el genotipo y factores externos relacionados con el ambiente y las prácticas de manejo utilizadas durante el ciclo del cultivo.

En la Tabla IV, se presentan los resultados del análisis foliar realizado a los 45 DDP, momento que se enmarca en la etapa de mayor demanda de nutrientes por la planta.

Tabla IV. Resultados del análisis foliar de la papa a los 45 DDP, en la cuarta hoja totalmente desarrollada y expandida, a una distancia entre plantas de 30 cm, en un suelo Rhodic Kandistalf de Huambo, Angola

Nutriente	Distancia entre surcos	
	0,75 m	0,90 m
Nitrógeno	43,6 ± 0,81 b	52,2 ± 0,63 a
CV	12,44	8,16
t	-7,89**	
Fósforo	1,30 ± 0,21 b	2,10 ± 0,33 a
CV	12,18	10,14
t	-18,21**	
Potasio	20,52 ± 0,45 b	37,31 ± 0,63 a
CV	1,48	11,16
t	-25,5**	
Calcio	7,12 ± 0,11 b	11,20 ± 0,14 a
CV	5,55	3,96
t	-43,37**	
Magnesio	1,61 ± 0,22 b	12,2 ± 0,33 a
CV	9,53	8,4
t	-13,92**	

n = 40. (2013-2014)

± Error estándar. CV: Coeficiente de Variación. t: t de Student

Todos los nutrientes expresados en mg g⁻¹

Medias con letras diferentes en una misma fila difieren significativamente a un nivel de confianza de 99 %

A una menor densidad de plantación, se encontraron las mayores concentraciones foliares de los nutrientes N, P, K, Ca y Mg, expresando un mejor estado nutricional de la planta, lo que sugiere que a la distancia entre surcos de 0,90 m, las plantas fueron capaces de asimilar una mayor cantidad del fertilizante aplicado, en comparación con las plantas desarrolladas a 0,75 m, manifestando estas últimas una mayor competencia por nutrientes.

No obstante lo anterior, al comparar los resultados de los análisis foliares obtenidos, con Índices Críticos de nutrientes establecidos para plantas de papa en las condiciones de Cuba (22), se observó, en sentido general, una nutrición inadecuada de las plantas para

los principales macro nutrientes, en las dos distancias entre surcos estudiadas.

En gran medida, el estado nutricional de las plantas se correspondió con la baja disponibilidad de nutrientes y la acidez del suelo (Tabla V).

Tabla V. Algunas propiedades que caracterizan la fertilidad del suelo Rhodic Kandistalf de Huambo, Angola, empleado en la experimentación

Profundidad del suelo (cm)	pH Unidades	MO (mg g ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
0-15	4,90	28,8	7,00	0,23	15,00	2,00
15-30	4,60	24,5	8,29	0,12	15,50	2,50

Es bien conocida la importancia de la nutrición nitrogenada para el adecuado desarrollo del cultivo y diferentes investigadores informan resultados que apuntan a la interacción con la densidad de plantación (5), el suministro hídrico (23) y momento de aplicación (24).

Para el P, en el horizonte cultivable se consideró una disponibilidad baja. Una causa de esta manifestación lo constituye el efecto que provocó la acidez del suelo ya que la disponibilidad de P es mayor a valores de pH entre 5,5 y 7,0.

Al considerar el grado de acidez del suelo, el P del fertilizante aplicado pudo reaccionar con los óxidos hidratados de Fe y Al y ser precipitado mediante la formación de fosfatos de esos cationes; a su vez, ser adsorbido al enlazarse químicamente a los cationes respectivos presentes en la superficie de los minerales del suelo.

Al evaluar la ecuación propuesta por Cabrera (25) para estimar el P presente en la solución del suelo a partir de la aplicación del fertilizante fosfórico que fue 144 kg ha⁻¹ de P₂O₅, se obtuvo solo 0,030 mg L⁻¹ de P en la solución.

Todo lo expresado anteriormente, permite explicar la baja disponibilidad fosfórica del suelo y, debido a la nutrición fosfórica inadecuada manifestada por la planta y reflejada en los análisis foliares, puede inferirse que la dosis de fertilizante fosfórico aplicada no fue suficiente para incrementar el P niveles satisfactorios ni para garantizar un crecimiento y desarrollo adecuados del cultivo.

En particular, los niveles insuficientes de potasio provocan alteraciones en la calidad interna de los tubérculos (26) y también se ha planteado que presentan una interacción con las densidades de plantación (27).

La papa presenta un sistema radical fibroso, ramificado, poco desarrollado y superficial, cuestiones estas que limitan la absorción de nutrientes, por lo que demanda altos niveles de nutrientes en el suelo, atendiendo además a su elevada velocidad de crecimiento del follaje y tubérculos.

El estado nutricional insatisfactorio que presentaron las plantas de papa, cultivadas en el medio edafoclimático descrito (suelo ácido y pobre en nutrientes y suministro irregular elevado de precipitaciones), constituye un elemento más a tener en cuenta al considerar los rendimientos del cultivo que se obtienen en las condiciones de producción.

CONCLUSIONES

- ◆ Las plantas obtenidas en las diferentes distancias entre surcos (0,75 y 0,90 m), presentaron un desarrollo de la parte aérea (tallos), menor en masa seca a lo señalado por diferentes autores; además, la iniciación de los tubérculos fue temprana, con una duración de este proceso menor a la señalada en los países templados. Este comportamiento de las plantas llevó a la obtención de rendimientos potencialmente menores a los alcanzados para el cultivo en otros países.
- ◆ De manera general, los tratamientos provocaron variaciones en el crecimiento de la longitud, tanto en momento como en valores de magnitudes de este crecimiento, resultando más significativo en la altura máxima alcanzada, donde la distancia entre surcos más estrecha provocó mayores aumentos.
- ◆ La masa fresca de los tubérculos fue la variable del rendimiento más influida por la distancia entre surcos, específicamente la de 0,90 m por ser la más amplia y que provocó un adelanto en el crecimiento en masa fresca con valores superiores de la tasa absoluta de crecimiento (TAC) y la masa fresca máxima.
- ◆ No hubo un patrón definido para el comportamiento de la masa seca del tubérculo para los diferentes tratamientos empleados; por otra parte, no hubo correspondencia de las dinámicas del crecimiento de los tubérculos, expresada éstas en función de la masa fresca y la masa seca.
- ◆ En todo momento el inicio de la tuberización ocurrió antes que los órganos aéreos alcanzaran su TAC máxima, lo que sugiere que se debe haber establecido una competencia por asimilados entre la parte aérea de la planta y los tubérculos.
- ◆ El estado nutricional de la planta de papa según el resultado del análisis foliar, fue deficiente en general; no obstante, la plantación a menor densidad alcanzó un nivel nutricional más favorable, aunque sin llegar a ser la óptima.

- ◆ Se demuestra que, en la provincia de Huambo, Angola, las condiciones de temperatura ambiente resultan adecuadas para el desarrollo de los tubérculos de plantas de papa y se pueden presentar períodos de bajo suministro hídrico al cultivo, cuando las plantas reciben éste solo a partir de las precipitaciones.
- ◆ Las condiciones de bajo pH del suelo y su contenido de nutrientes, provocan un insuficiente estado nutricional en las plantas, que no logra ser compensado por la fertilización química, probablemente con un desbalance en la composición de cada nutriente; esto apunta a la necesidad del mejoramiento de estos suelos y al desarrollo de estudios de nutrición y fertilización más detallados para estas condiciones edáficas, con el manejo integrado del suministro de nutrientes, con abono orgánico y fertilizantes químicos.
- ◆ Los resultados apuntan al suministro hídrico, sobre todo durante el período de crecimiento "lineal" de los tubérculos, y a la nutrición mineral, como aspectos a tener en cuenta para una futura optimización del cultivo.

BIBLIOGRAFÍA

1. De Jong H. Impact of the Potato on Society. *American Journal of Potato Research*. 2016;93(5):415–29. doi:10.1007/s12230-016-9529-1
2. Devaux A, Kromann P, Ortiz O. Potatoes for Sustainable Global Food Security. *Potato Research*. 2014;57(3–4):185–99. doi:10.1007/s11540-014-9265-1
3. FAO. Anuario Estadístico de la FAO [Internet]. Vitacura, Santiago de Chile: FAO; 2014 p. 198. (La alimentación y la agricultura en América Latina y el Caribe). Available from: <http://www.fao.org/3/a-i3592s.pdf>
4. Kesiime VE, Tusiime G, Kashiija IN, Edema R, Gibson P, Namugga P, et al. Characterization and Evaluation of Potato Genotypes (*Solanum tuberosum* L) for Tolerance to Drought in Uganda. *American Journal of Potato Research*. 2016;93(6):543–51. doi:10.1007/s12230-016-9533-5
5. Getie AT, Dechassa N, Tana T. Response of Potato (*Solanum tuberosum* L.) Yield and Yield Components to Nitrogen Fertilizer and Planting Density at Haramaya, Eastern Ethiopia. *Journal of Plant Sciences*. 2015;3(6):320. doi:10.11648/j.jps.20150306.15
6. Islam M, Akhter S, Majid N, Ferdous J, Alam M. Integrated nutrient management for potato (*Solanum tuberosum*) in grey terrace soil (Aric Albaquipt). *Australian Journal of Crop Science*. 2013;7(9):1235–41.
7. Abdullah A-M, Hossain Md A, Abdullah-Al-Mamun M, Shamimuzzaman M, Shafiur Rahmsn Ehm, Ali Khans M, et al. Plant canopy, tuber yield and growth analysis of potato under moderate and severe drought condition. *Journal of Plant Sciences*. 2014;2(5):201–8. doi:10.11648/j.jps.20140205.18

8. INE. Resultados Definitivos Recenseamento Geral da População e Habitação (Censo 2014). [Internet]. Luanda – Angola: Instituto Nacional de Estatística de Angola. Gabinete Central do Censo, Subcomissão de Difusão de Resultados; 2016 p. 203. Available from: http://www.embajadadeangola.com/pdf/Publicacao%20Resultados%20Definitivos%20Censo%20Geral%202014_Versao%2022032016_DEFINITIVA%2018H17.pdf
9. Soil Survey Staff. Claves para la Taxonomía de Suelos [Internet]. Washington, DC: Natural Resources Conservation Service. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos; 2010 p. 365. Report No.: Undécima Edición. Available from: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf
10. Torres W. Análisis del crecimiento de las plantas. San José de las Lajas. 1984;38.
11. Torres W. Influencia de distintas fechas de plantación sobre el crecimiento de los tubérculos de papa (*Solanum tuberosum*), var. Desireé. Cultivos Tropicales. 1984;5(3):151–69.
12. Liamwirat C, Cheevadhanarak S, Netrphan S, Chaijaruwanich J, Bhumiratana S, Meechai A. Rational identification of target enzymes for starch improvement through system-level analysis of a potato tuber model. Australian Journal of Crop Science. 2014;8(5):760–77.
13. Akoumianakis KA, Alexopoulos AA, Karapanos IC, Kalatzopoulos K, Aivalakis G, Passam HC. Carbohydrate metabolism and tissue differentiation during potato tuber initiation, growth and dormancy induction. Australian Journal of Crop Science. 2016;10(2):185–92.
14. Aksenova NP, Konstantinova TN, Golyanovskaya SA, Sergeeva LI, Romanov GA. Hormonal regulation of tuber formation in potato plants. Russian Journal of Plant Physiology. 2012;59(4):451–66. doi:10.1134/S1021443712040024
15. Vreugdenhil D, Bradshaw J, Gebhardt C, Govers F, Taylor M, MacKerron D, et al. Potato biology and biotechnology: Advances and perspectives [Internet]. 1st Edition. Laboratory of Plant Physiology Wageningen University and Research Centre Wageningen, The Netherlands: Elsevier Science; 2007 [cited 2018 Jul 6]. 856 p. Available from: <https://www.elsevier.com/books/potato-biology-and-biotechnology/vreugdenhil/978-0-444-51018-1>
16. Rykaczewska K. The effect of high temperature occurring in subsequent stages of plant development on potato yield and tuber physiological defects. American Journal of Potato Research. 2015;92(3):339–49. doi:10.1007/s12230-015-9436-x
17. Timlin D, Lutfor Rahman SM, Baker J, Reddy VR, Fleisher D, Quebedeaux B. Whole plant photosynthesis, development, and carbon partitioning in potato as a function of temperature. Agronomy Journal. 2006;98(5):1195–203. doi:10.2134/agronj2005.0260
18. Ali G. Study of the influence of water stress on growth and development of crop plants. International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research. 2014;1(3):28–32.
19. Wu J, Wang D, Bauer ME. Assessing broadband vegetation indices and QuickBird data in estimating leaf area index of corn and potato canopies. Field Crops Research. 2007;102(1):33–42. doi:10.1016/j.fcr.2007.01.003
20. Flores R, Sánchez F, Rodríguez JE, Colinas MT, Mora R, Lozoya H. Densidad de población en cultivo hidropónico para la producción de tubérculo-semilla de papa (*Solanum tuberosum* L.). Revista Chapingo. Serie horticultura. 2009;15(3):251–8.
21. Jerez E, Martín R, Díaz Y. Estimación de la superficie foliar en dos variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) por métodos no destructivos. Cultivos Tropicales. 2014;35(1):57–61.
22. Herrera JA, Moreno V. Nutrición y fertilización. In: Estévez A, editor. El cultivo de la papa en Cuba. San José de las Lajas, La Habana, Cuba: Ediciones INCA; 2007. p. 411–500.
23. Saravia D, Farfán-Vignolo ER, Gutiérrez R, De Mendiburu F, Schafleitner R, Bonierbale M, et al. Yield and physiological response of potatoes indicate different strategies to cope with drought stress and nitrogen fertilization. American Journal of Potato Research. 2016;93(3):288–95. doi:10.1007/s12230-016-9505-9
24. Kelling KA, Hensler RF, Speth PE. Importance of early-season nitrogen rate and placement to russet burbank potatoes. American Journal of Potato Research. 2015;92(4):502–10. doi:10.1007/s12230-015-9464-6
25. Cabrera A. Caracterización agroquímica de los suelos Ferralíticos donde se cultiva la caña de azúcar en Cuba [Internet] [Tesis de Doctorado]. [La Habana, Cuba]: Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar; 1991. 99 p. Available from: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Caracterizaci%C3%B3n+agroqu%C3%ADmica+de+los+suelos+Ferral%C3%ADticos+donde+se+cultiva+la+ca%C3%B1a+de+az%C3%BAcar+en+Cuba&btnG=#d=gs_cit&p=&u=%2Fscholar%3Fq%3Dinfo%3AEysNPsuZxCEJ%3Ascholar.google.com%2F%26output%3Dcite%26scirp%3D0%26hl%3Des
26. Bansal SK, Trehan P. Effect of potassium on yield and processing quality attributes of potato. Karnataka Journal Agricultural Science. 2011;24(1):48–54.
27. Razaq M, Rab A, Alam H, Salahuddin, Saud S, Ahmad Z. Effect of potash levels and plant density on potato yield. Journal of Biology, Agriculture and Healthcare. 2015;5(13):54–62.

Recibido: 5 de diciembre de 2017

Aceptado: 21 de junio de 2018