

ESTABLECIMIENTO DE UNA METODOLOGIA PARA LA PRODUCCION DE SEMILLA PREBASICA DE PAPA CRIOLLA VARIEDAD "YEMA DE HUEVO" (*Solanum phureja* Juz et Buk) A PARTIR DE MINITUBERCULOS

Methodology for prebasic seed production of creole potato "Yema de huevo" (*Solanum phureja* Juz. et. Buk.) through mintubers

José M. Cotes¹, Carlos E. Ñustez² y Javier I. Pachón¹

¹ Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. Santafé de Bogotá D.C. Colombia. jmcotes@usa.net

² Profesor Asociado. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. Santafé de Bogotá D.C. Colombia. cnustez@bacata.usc.uanl.edu.co

RESUMEN

En la actualidad, para la producción de semilla de papa, se utiliza, como herramienta, la técnica de micropropagación, la cual garantiza, mediante un adecuado proceso, alta sanidad de los tubérculos semilla y una rápida multiplicación. En la papa diploide *Solanum phureja* cultivar "yema de huevo", la multiplicación "in vitro" fue desarrollada exitosamente y, por lo tanto, el paso siguiente, la producción de minitubérculos en casa de malla (Semilla prebásica) requiere de los estudios necesarios para optimizar esta fase. El presente trabajo tuvo como objetivo conocer la densidad y el tamaño del minitubérculo semilla óptimos para desarrollar la producción de semilla prebásica en condiciones de casa malla. La investigación se realizó bajo un diseño completamente al azar, con arreglo factorial (4x3), siendo el primer factor la distancia entre plantas y, el segundo, el diámetro del minitubérculo semilla. El experimento se realizó en casa de malla en la Estación San Jorge del ICA a 2800 msnm y repetido durante dos semestres consecutivos. Se encontró que la distancia de 6 cm entre sitios de siembra optimiza la producción de semilla prebásica y la distancia de 12 cm entre sitios de siembra, la tasa de multiplicación. Los mejores diámetros de minitubérculo son los comprendidos entre 0,5 y 2 cm

Palabras claves: Densidades, tasa de multiplicación, fisiología vegetal, competencia.

SUMMARY

Presently micropropagation techniques are used a tool for potatoe seed production which guarantees, through an adequate process, healthy seed tubers, and rapid multiplication. In the diploid potato *Solanum phureja* cultivar "yema de huevo" the multiplication "in vitro" was developed successfully. Therefore the following step, the production of minitubers in greenhouse (prebasic seed), requires the studies to optimize this phase. This

work was carried out establish to the density and the size optimum minituber seed, to develop the production of prebasic seed under greenhouse conditions. The trial was carried out following a completely randomized design, with factorial array (4x3). The first factor was the distance among plants and, the second, the diameter of the minituber seed. The experiment was carried out in the San Jorge Experimental Station greenhoused of the ICA to 2800 masl, and it was replicated during two consecutive semesters. It was found that a 6 cm distance between plants optimizes the production and a distance of 12 cm between plants, optimizes the multiplication rate. The best minituber diameters are between 0.5 and 2 cm

Key words: Densities, multiplication rate, *in vitro* propagation, plant physiology, competition.

INTRODUCCION

En la actualidad, el cultivo de papa criolla *Solanum phureja* Juz. et Buk. es exclusivo de los países andinos: Ecuador, Perú, Bolivia y Colombia. Es un tubérculo que no posee periodo de reposo y un alimento exquisito, de mayor calidad nutricional que la papa de año *Solanum tuberosum*. Nuestro país es su principal exponente y productor, razón que ha motivado una inquietud creciente hacia la investigación de este valiosos recurso, buscando aumentar su área de producción.

En el ámbito internacional, se han realizado numerosos estudios en la selección y multiplicación acelerada de distintas variedades de papa, principalmente, de la especie *S. tuberosum*, realizados por el CIP (Centro Internacional de la Papa) en el Perú, INIAP (Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias) en Ecuador y PROINPA (Programa de Investigación de la Papa) en Bolivia. En México y el cono sur (Argentina y Chile), a partir de este tipo de estudios, se han creado compañías particulares que comercializan tubérculo semilla prebásico y básico.

Este trabajo de investigación se estableció con el objetivo de obtener una metodología para la producción de semilla

prebásica de papa criolla (en camas y bajo condiciones de casa malla) a partir de minitubérculos provenientes de plantas madres (propagadas *in vitro*), considerando, como el factor de evaluación, la densidad de siembra.

Las técnicas de multiplicación de minitubérculos en camas debidamente adecuadas, es ampliamente utilizada por presentar las siguientes ventajas:

- Optimiza el espacio físico del invernadero (INIAP, 1993), además de agua y nutrientes (PROINPA, 1996).
- Es recomendable cuando no se tiene suficiente mano de obra (INIAP, 1993).
- Cuando la variedad no responde, adecuadamente, a otros métodos de multiplicación (INIAP, 1993).
- Cuando las condiciones a nivel de campo no son ideales para el trasplante de esquejes (INIAP, 1993), y para la protección contra heladas (PROINPA, 1996).
- Altas tasas de multiplicación (PROINPA, 1996).

Como desventajas, se mencionan que: Requiere de infraestructura adecuada y personal técnico especializado para su manejo (INIAP, 1993). Para la obtención de minitubérculos en cama, se puede partir de plantas *in vitro*, esquejes o minitubérculos obtenidos de plantas madres. Se deben mantener las condiciones sanitarias, el control de vectores y realizar pruebas serológicas durante todo el ciclo de producción de minitubérculos (INIAP, 1993).

Las técnicas de propagación vegetativa acelerada aprovechan, al máximo, tanto el área foliar, como los tubérculos, con el propósito de alcanzar altos índices de multiplicación, conservando la calidad sanitaria del material. Se han generado varios métodos de propagación que pueden utilizarse en forma individual o integrada (Bryan *et. al.* 1981).

De acuerdo con Hernández (1996), en condiciones de la Estación Experimental San Jorge para *S. phureja* "clon 1", en la multiplicación de minitubérculos (labor realizada en casa malla), la densidad de siembra de 20 cm entre plantas produjo la mayor cantidad de semilla tamaño primera (25 g de peso en promedio) y, cuando se utilizó la distancia de 10 cm entre plantas, se produjo la mayor cantidad de semilla tamaño cuarta (0,5 g de peso en promedio).

MATERIALES Y METODOS

Este trabajo de investigación se realizó en casa malla en la Estación San Jorge del ICA, localizada en el municipio de Soacha, departamento de Cundinamarca, a 2800 msnm. El genotipo utilizado en el trabajo fue el denominado "clon 1", de la especie *S. phureja*, conocido comúnmente como papa criolla. Este material se multiplicó *in vitro* en el Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional de Colombia y se llevó a San Jorge para la producción de minitubérculos.

El experimento se repitió dos veces en diferentes semestres. El substrato utilizado para la siembra fue una mezcla de suelo orgánico y arena (3:1), garantizando óptimas condiciones físicas. La profundidad de siembra fue de dos veces el diámetro de los minitubérculos. Se utilizó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con arreglo factorial (3X4) y tres repeticiones. El primer factor fue el diámetro del minitubérculo semilla (menor

de 0,5 cm, entre 0,5 y 1,27 cm (½ pulg.) y entre 1,27 y 2 cm de diámetro). El segundo factor fue la distancia entre plantas (sitios de siembra) en las camas (6; 9; 12 y 15 cm en cuadro). La unidad experimental estuvo constituida por 25 sitios de siembra (5X5), de las cuales se consideraron los nueve sitios centrales (3X3) como unidad experimental efectiva. Los tubérculos cosechados se clasificaron, teniendo en cuenta su diámetro, así: primera, entre 2 y 4 cm; segunda, entre 1,27 (½ pulg.) y 2 cm; tercera, entre 0,5 y 1,27 cm y tubérculos totales.

Las variables de producción evaluadas fueron número de tubérculos (N) y tasa de multiplicación (TM) para las categorías anteriormente mencionadas. Los resultados se expresaron por 1 m². Para cuantificar el vigor del material de propagación, se evaluó emergencia (EM), en porcentaje para cada tamaño de minitubérculo. Esta se evaluó cada 3-4 días, con el fin de poder ajustar las curvas de emergencia, realizando un análisis por regresión polinómica, comparando los coeficientes de regresión obtenidos para cada tamaño del minitubérculo semilla mediante una prueba de T (Students). Se realizó un análisis de regresión múltiple para las variables número de tubérculo, donde las variables independientes son distancia entre plantas y diámetro del tubérculo sembrado (marca de clase de cada una de las tres categorías sembradas).

El análisis de la tasa de multiplicación se realizó gráficamente a partir de la siguiente deducción matemática: La tasa de multiplicación es la cantidad de tubérculos cosechados por minitubérculo semilla. Como la recolección de los datos de producción se realizó por unidad experimental, la tasa de multiplicación es estimada a partir de estos datos y, por tal razón, la tasa de multiplicación es función del número de tubérculos por m² y de la distancia entre plantas (densidad).

La tasa de multiplicación se define como $TM = P / N_i$, donde: P es el número de tubérculos cosechados por unidad experimental y N_i es el número de plantas por unidad experimental. La expresión que define tasa de multiplicación, en función de la distancia entre plantas, resulta de la ecuación

$$\frac{P}{m^2} = \frac{P}{A}; \text{ donde } A \text{ es el área de la unidad experimental en } m^2.$$

El área se expresa como $A = N_p * D_p * N_s * D_s$; donde; D_p es la distancia entre plantas en metros; D_s es la distancia entre surcos en metros; N_p es el número de plantas por surco y N_s es el número de surcos. Como $N_i = N_p * N_s$,

entonces, $A = N_i * D_s * D_p$. Finalmente, tenemos la

$$\text{igualdad } \frac{P}{N_i} * \frac{1}{D_s * D_p} = \frac{P}{m^2} \text{ y despejando obtenemos}$$

$$TM = \frac{P}{m^2} * D_s * D_p$$

En estos ensayos la distancia entre surcos, es igual a la distancia entre plantas, por lo cual, la expresión que define tasa de

$$\text{multiplicación es } TM = \frac{P}{m^2} * D_p^2$$

RESULTADOS Y DISCUSION

Vigor de los minitubérculos semilla

Los minitubérculos presentaron un período de 49 días antes que apareciera la primera hoja sin extender (emergencia), por lo cual, antes de dicho período, es imposible esperar algún tipo de emergencia de plántulas. Por este hecho y con el fin de encontrar las tasas reales de emergencia (Roberts E.A., 1992) a la variable días después de siembra, se le resta el número de días en el cual no hubo emergencia, generando la variable días después de siembra corregidos (DDS'), con lo cual el intercepto de la regresiones se convierte en cero (0).

Como los minitubérculos se sembraron en estado de brotación, estos no estaban en reposo. Es probable que los minitubérculos tardaran 49 días en emerger, debido a una baja tasa de crecimiento de los brotes, como consecuencia del poco peso inicial de los minitubérculos, es decir, los fotosintetizados acumulados en ellos resultan insuficientes para promover un crecimiento rápido de los brotes, haciendo que el proceso de emergencia se demore más que lo comúnmente observado para esta variedad

Las regresiones obtenidas entre el porcentaje de minitubérculos emergidos (EM1 a EM3) y días después de siembra corregidos (DDS') mostraron un alto nivel de significancia (Cuadro 1) para el modelo y sus parámetros en todos los casos. Estas regresiones sugieren modelos cuadráticos (Figura 1) para el porcentaje de minitubérculos emergidos, de la forma :

$$\hat{y} = \hat{\beta}_1 X + \hat{\beta}_2 X^2 + \varepsilon$$

donde: = Porcentaje de minitubérculos emergidos, β_1 = Coeficiente de regresión lineal (%/día); β_2 = Coeficiente de regresión cuadrática (%/día²); X = Días después de siembra corregidos (días). Estrictamente hablando, la derivada de esta ecuación nos representaría la tasa (%/día), a la cual emergen los minitubérculos.

La derivada en todos los casos es una ecuación lineal, así:

$$\frac{dy}{dx} = \hat{\beta}_1 + 2\hat{\beta}_2 x$$

Cuadro 1. Parámetros estimados para la variable porcentaje de emergencia de los minitubérculos semilla.

DIAMETRO DEL MINITUBERCULO	VARIABLE	PARAMETRO ESTIMADO	ERROR ESTANDAR	VALOR DE F	PROB>F
Menores de 0,5 cm, de diámetro (EM1),	DDS'	3,1203	0,1027	922,51	0,0001
	DDS' ²	-0,0323	0,0051	40,81	0,0031
Entre 0,5 y 1,27 cm, de diámetro (EM2),	DDS'	7,6354	0,0545	19606,08	0,0001
	DDS' ²	-0,1724	0,0027	4118,55	0,0001
Entre 1,27 y 2 cm, de diámetro (EM3),	DDS'	5,0806	0,1739	853,21	0,0001
	DDS' ²	-0,0813	0,0086	89,99	0,0007

DDS' = Días después de siembra - 49 días.

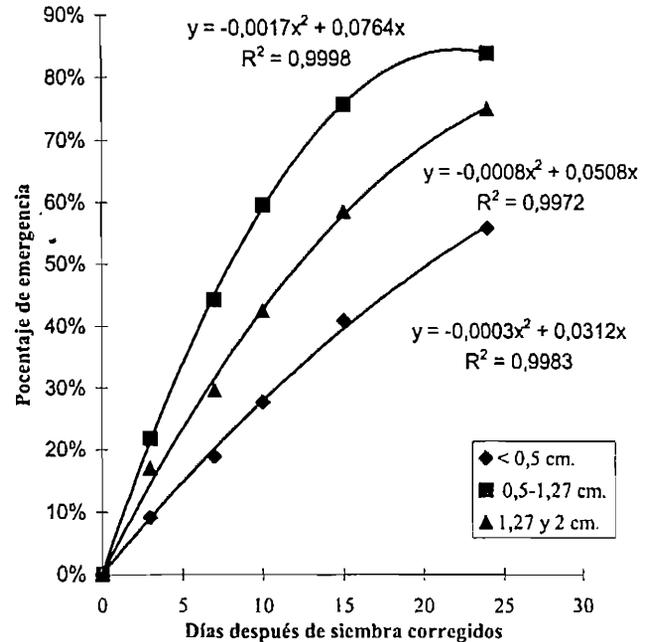


Figura 1. Curvas de emergencia para los diferentes diámetros de minitubérculo semilla sembrados.

Dentro de esta ecuación lineal, tenemos un intercepto (componente lineal en la ecuación original, β_1) y un coeficiente de regresión (componente cuadrático en la ecuación original, β_2). Las unidades de β_1 nos indican por si solas una tasa de emergencia y, teniendo en cuenta que el componente lineal, en magnitud, es mucho mayor que el componente cuadrático, la comparación de los distintos β_1 obtenidos será válida para comparar el vigor de cada uno de las categorías de minitubérculo semilla sembrados (EM1, EM2 y EM3). El vigor de los minitubérculos semilla menores de 0,5 cm de diámetro (EM1) fue inferior al nivel altamente significativo (Cuadro 2) con el vigor de los minitubérculo semilla mayores de 0,5 cm de diámetro (EM2 y EM3), por lo cual, no se recomiendan para la producción de semilla prebásica, pues se espera que semillas de bajo vigor no genere buenos resultados. Dentro de las dos categorías que comprende los minitubérculos mayores de 0,5 cm de diámetro, no se presentan diferencias significativas, por lo cual, en la producción de semilla prebásica, se puede utilizar cualquiera de estas.

Finalmente, las regresiones obtenidas cumplen a satisfacción supuestos básicos (Cuadro 3) y las curvas obtenidas para las distintas variables confirman el excelente ajuste mostrado por el análisis estadístico.

Cuadro 2. Valor de T para la diferencia entre los β_1 de las curvas de emergencia para cada diámetro de minitubérculo semilla ensayado.

	EM1	EM2	EM3
EM1	-	-15,79 **	-9,23 **
EM2		-	2,61
EM3			-

** Diferencias significativas al 0.01%

Cuadro 3. Pruebas para la validación de las regresiones obtenidas.

Diámetro Minitubér. Semilla	R ²	Normalidad de errores	Independ. de errores
		PROB<W	PROB>Z
< 0,5 cm.	0,9994	0,5487	0,3027
0,5 a 1,27 cm	0,9999	0,2325	0,3027
1,27 a 2 cm	0,9991	0,4478	0,3027

Variables de producción

En el 90% del experimento, se presentó un tallo por minitubérculo sembrado, y la floración fue menor al 5%. Los tubérculos fueron cosechados a los 175 días después de siembra, clasificados según su diámetro. La demora en el tiempo a cosecha (120 DDS, normalmente en cultivos de campo (Fedepapa, 1988) y el bajo porcentaje de floración, probablemente se deba al material de origen, plantas madres de propagación *in vitro*, los cuales se están adaptando al medio. Se produjeron uno o dos tubérculos en los estolones subterráneos y los más grandes fueron localizados en la parte terminal del estolón. Esto confirma lo encontrado por Obando y Pulido (1987) en cuanto al crecimiento radial de la parte terminal del estolón en la formación del tubérculo.

Las regresiones múltiples obtenidas para las variables número de tubérculos de 1ª, 2ª, 3ª y total, muestran un alto nivel de significancia (PR>0,001), tanto para el modelo, como sus parámetros (Cuadro 4). En el Cuadro 5, se presentan las pruebas realizadas para comprobar algunos supuestos de la regresión, observándose que, las regresiones cumplen con estos supuestos, además de que el coeficiente de determinación para cada una de ellas es bastante alto.

Número de tubérculos totales

Para esta variable, el modelo de regresión múltiple hallado fue:

$$NT = 10889,3 - 2841,6D + 249,5D^2 - 7,2D^3 + 473,0\emptyset - 16,9D\emptyset$$

donde D es la distancia entre plantas en cm y \emptyset es el diámetro del minitubérculo semilla en cm

La regresión múltiple para esta variable (Figura 2a) nos indica que la distancia entre plantas sigue una ecuación cúbica, mientras el diámetro la afecta de una manera lineal. La interacción distancia por diámetro al cuadrado ($D*\emptyset^2$) nos indica un ligero efecto cuadrático del diámetro dependiendo de la distancia entre plantas utilizada.

El mayor número de tubérculos totales por m² (NT) se obtiene a una distancia de 6 cm entre plantas y con un diámetro promedio del minitubérculo semilla de 1,635 cm, es decir, el mayor diámetro de minitubérculos ensayado. A esta misma distancia, con diferente tamaño de minitubérculo semilla, se obtienen buenas producciones de tubérculos, pero significativamente menores, evidenciado por la significancia del componente lineal del diámetro del minitubérculo semilla (Figura 2a.). Es importante, resaltar que, a partir de la distancia de 6 cm entre plantas, el número de tubérculos totales decrece en forma cúbica, por lo tanto, a distancia mayores la producción disminuye substancialmente. Si analizamos la importancia de los factores evaluados, es evidente que la distancia de siembra influye más sobre el número de tubérculos totales que sobre el diámetro del minitubérculo semilla, confirmado por la magnitud del coeficiente de regresión lineal de cada una de los factores, -2841,6 tub/cm para la distancia entre plantas en comparación con 473,0 tub/cm para el diámetro del minitubérculo semilla.

Número de tubérculos de tercera (3ª)

Para esta variable el modelo de regresión múltiple encontrado fue:

$$N3 = 3634,2 - 759,3D + 59,2D^2 - 1,6D^3 - 426,8\emptyset + 27,5D\emptyset$$

La regresión múltiple para esta variable (Figura 2g) nos indica que la distancia entre plantas sigue una ecuación cúbica, mientras el diámetro es afectado de una manera lineal, pero inversa, evidenciado esto por el parámetro negativo obtenido para este factor. La interacción distancia por diámetro ($D*\emptyset$) nos indica que la pendiente del efecto lineal del diámetro varía, dependiendo de la distancia entre plantas utilizada. La pendiente del componente diámetro aumenta cuando la distancia entre plantas disminuye.

Esto puede deberse a que a menor distancia entre plantas se presenta mayor competencia por luz y nutrientes y, por lo tanto, las plantas provenientes de un minitubérculo con un diámetro mayor (los más vigorosos) tendrán una mayor competencia que los de menor diámetro y, así, su producción de tubérculos entre 0,5 y 1,27 cm será menor, ya que los fotoasimilados se destinarán a llenar los tubérculos más grandes (mayores de 1,27 cm de diámetro). El mayor número de tubérculos entre 0,5 y 1,27 cm de diámetro (N3) se obtiene a una distancia de 6 cm entre plantas y con un diámetro promedio del minitubérculo semilla de 0,25 cm

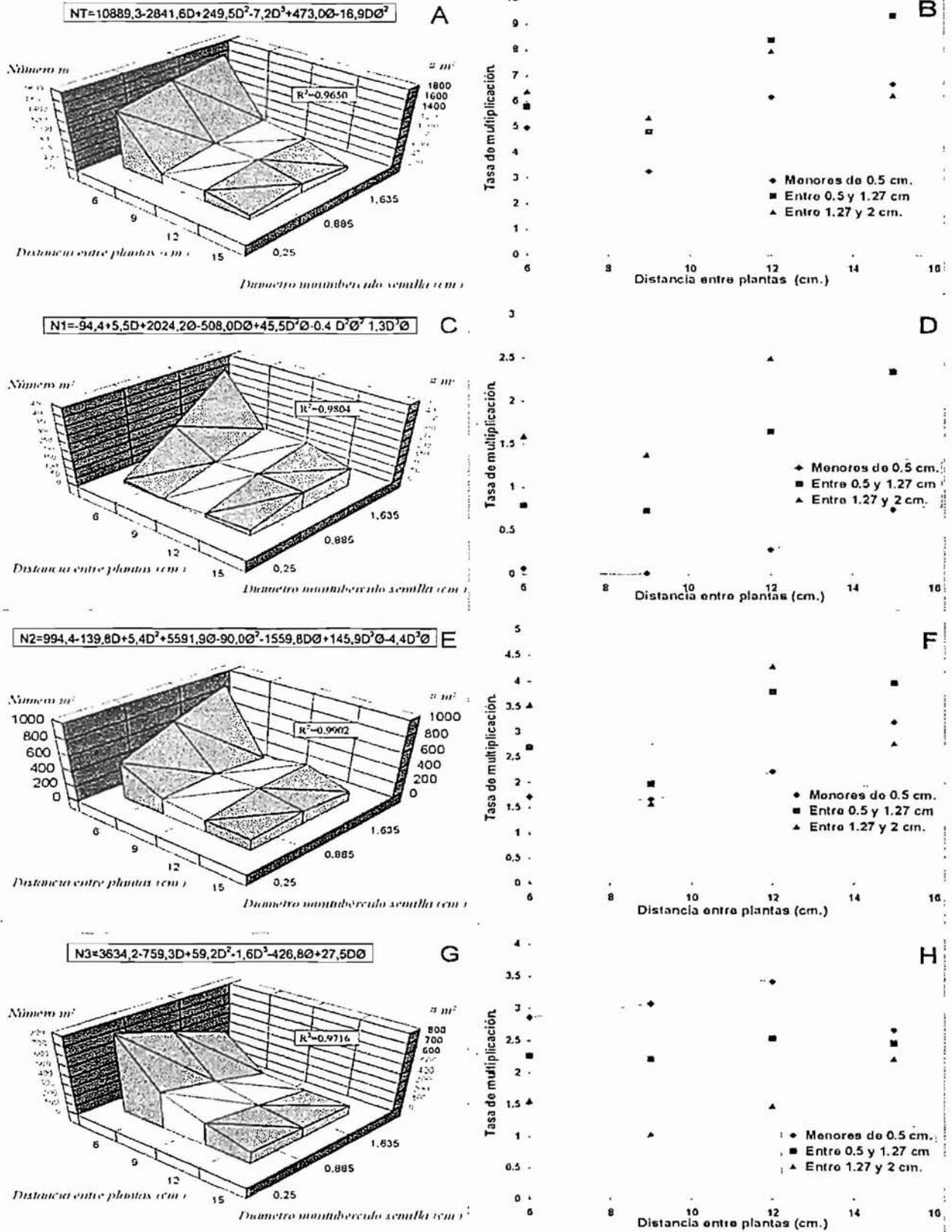


Figura 2. Producción de tubérculos y tasa de multiplicación, respectivamente: a y b) tubérculos totales; b y c) tubérculos entre 2 y 4 cm de diámetro; e y f) tubérculos entre 1,27 y 2 cm de diámetro; g y h) tubérculos entre 0,5 y 1,27 cm.

Cuadro 4. Parámetros estimados para la variable número de tubérculos, clasificados según su diámetro.

VARIABLE DEPEND.	VARIABLE INDEPEND.	PARAMETRO ESTIMADO	ERROR ESTAND.	SUMA DE CUADRADOS	VALOR DE F	PROB>F
Número de tubérculos totales (NT).	Intercepto	10889,323	788,446	2180385,360	190,75	0,0001
	D	-2841,582	251,844	1455227,170	127,31	0,0001
	D ²	249,536	25,235	1117714,960	97,78	0,0001
	D ³	-7,175	0,799	921265,176	80,60	0,0001
	Ø	473,046	67,404	563001,962	49,25	0,0001
	D * Ø ²	-16,919	3,148	330149,212	28,88	0,0001
Número de tubérculos entre 2 y 4 cm (N1).	Intercepto	-94,390	16,134	11884,729	34,22	0,0001
	D	5,466	1,750	3386,704	9,75	0,0029
	Ø	2024,255	126,034	89580,083	257,96	0,0001
	D * Ø	-508,054	40,267	55280,823	156,19	0,0001
	D ² * Ø	45,514	4,030	44294,227	127,55	0,0001
	D ² * Ø ²	-0,355	0,077	7263,390	20,92	0,0001
	D ³ * Ø	-1,316	0,127	37123,788	106,90	0,0001
Número de tubérculos entre 1,27 y 2 cm (N2).	Intercepto	994,474	88,142	112454,418	127,30	0,0001
	D	-139,782	18,250	51821,871	58,66	0,0001
	D ²	5,383	0,870	33814,835	38,28	0,0001
	Ø	5591,950	216,383	589986,439	667,85	0,0001
	Ø ²	-90,039	17,143	24369,067	27,59	0,0001
	D * Ø	-1559,764	66,131	491436,005	556,29	0,0001
	D ² * Ø	145,925	6,478	448247,638	507,40	0,0001
	D ³ * Ø	-4,406	0,203	415823,066	470,70	0,0001
Numero de tubérculos entre 0,5 y 1,27 cm (N3).	Intercepto	3634,224	300,346	241735,675	146,41	0,0001
	D	-759,34	95,771	103792,290	62,86	0,0001
	D ²	59,247	9,591	62993,302	38,15	0,0001
	D ³	-1,615	0,303	46681,786	28,27	0,0001
	Ø	-426,763	30,290	327727,155	198,49	0,0001
	D * Ø	27,508	2,789	160581,876	97,26	0,0001

D = Distancia entre plantas (cm) Ø = Diámetro del minitubérculo semilla (cm)

Cuadro 4. Pruebas para la validación de las regresiones obtenidas.

VARIABLE DEPENDIENTE	COEFICIENTE DE DETERMINACION R ²	NORMALIDAD DE ERRORES		PRUEBA DE INDEPENDENCIA	
		W	Prob.<W	Z	Prob.>Z
NT.	0.9650	0.9288	0.5025	2.5393	0.5055
N3.	0.9716	0.9573	0.3839	0.1336	0.4468
N2.	0.9902	0.9465	0.2231	0.1336	0.4468
N1.	0.9804	0.9809	0.7238	2.2720	0.3115

Número de tubérculos de segunda (2^a)

Para esta variable, el modelo de regresión múltiple encontrado fue:

$$N2 = 994,4 - 139,8D + 5,3D^2 + 5591,9\text{Ø} - 90,0\text{Ø}^2 - 1559,8D\text{Ø} + 145,9D^2\text{Ø} - 4,4D^3\text{Ø}$$

La regresión múltiple para esta variable (Figura 2e) nos indica que, tanto la distancia entre plantas como el diámetro del minitubérculo semilla, siguen una ecuación cuadrática. Tres términos independientes de los siete que entran en la regresión son interacciones, lo cual nos da una idea sobre su importancia.

Todas ellas tienen el componente lineal del diámetro de minitubérculo semilla y, así, la distancia entre plantas se comporta como una ecuación cúbica, pero variando de acuerdo con el tamaño del minitubérculo semilla, como se aprecia en la Figura 2e.

El mayor diámetro del minitubérculo semilla (1,635 cm en promedio), combinado con la menor distancia entre plantas (6 cm) es la mejor combinación de estos factores para obtener el mayor número de tubérculos entre 1,27 y 2 cm de diámetro (N2).

Número de tubérculos de primera (1^a)

Para esta variable, el modelo de regresión múltiple hallado fue:

$$NI = -94,4 + 5,5D + 20242D - 508,0D^2 - 45,5D^3 - 0,4D^4 - 1,3D^5$$

La regresión múltiple para esta variable (Figura 2c) nos indica que, tanto la distancia entre plantas como el diámetro del minitubérculo semilla, siguen una ecuación lineal. Cuatro términos independientes de los seis que entran en la regresión son interacciones. Tres de ellas tienen el componente lineal del diámetro de minitubérculo semilla, por lo cual, al mismo tamaño del minitubérculo semilla, el comportamiento lineal, cuadrático y cúbico de la distancia entre plantas es diferencial. El mayor diámetro del minitubérculo semilla (1,635 cm en promedio), combinado con la menor distancia entre plantas (6 cm) es la mejor combinación de estos factores para obtener el mayor número de tubérculos entre 2 y 4 cm de diámetro (N1).

Discusión general

El anterior comportamiento de las variables de número de tubérculos es congruente con los principios de fisiología de cultivos. Uno de ellos se relaciona con la distancia, pues, a una menor distancia de siembra, se obtendrá una mayor producción hasta un punto óptimo, después del cual los rendimientos decrecen. En el trabajo, no se logró determinar el punto óptimo al no evaluar distancia menores de 6 cm, la cual arrojó la mejor producción; con distancias mayores el número de tubérculos disminuye considerablemente, debido al componente cúbico en todos los modelos. Otro principio básico afirma que el crecimiento de una planta se comporta como el interés compuesto, ya que, si el capital de iniciación es pequeño, el crecimiento será más lento y la producción menor. Nuestro capital inicial es el tamaño del minitubérculo semilla, por lo cual, a un menor tamaño de éste, tendremos un crecimiento más lento y una producción menor, como evidenció el análisis de número de tubérculos totales (NT) y del número de tubérculos mayores de 1,27 cm de diámetro (N2 y N1).

Hernández (1996), en la Estación Experimental San Jorge, trabajando con el clon 1 de *S. phureja*, encontró que la distancia de 10 cm entre plantas produjo la mayor cantidad de tubérculos de 0,5 gr. y, a 20 cm de distancia, la mayor producción de tubérculos de 25 gr. Nuestros resultados encuentran que a 6 cm entre plantas se obtiene la mayor producción de estos dos tipos de tubérculos, variando la calidad según el diámetro del minitubérculo sembrado. Wiersema (1981) reporta, en *S. tuberosum*, que a mayores densidades de siembra, se obtiene altas producciones, lo cual es concordante con lo encontrado en los experimentos.

Nuestro interés, como productores de semilla prebásica, es producir tubérculos con un diámetro superior a 1,27 cm de diámetro para llevar a campo; estos tubérculos se encuentran analizados en dos categorías, la primera entre 2 y 4 cm de diámetro (N1) y la segunda, entre 1,27 y 2 cm de diámetro (N2). Los dos modelos seleccionados muestran una fuerte interacción entre la distancia entre plantas y el diámetro del minitubérculo semilla, mostrando una respuesta consistente, donde la mayor producción se presentó con un diámetro de minitubérculo semilla entre 1,27 y 2 cm a una distancia entre

plantas de 6 cm (277 plantas/m²).

La presencia de interacciones en ambos modelos es debida a que plantas provenientes de minitubérculos semilla grandes (entre 1,27 y 2 cm de diámetro) genera plantas con mayor elongación, compitiendo por luz, mientras que las plantas provenientes de minitubérculo semilla pequeño (menor de 0,5 cm de diámetro) no presentan tal competencia (Figura 1b) y, por lo tanto, su respuesta a la distancia entre plantas es diferencial (interacciones).

Para minitubérculos de mayor diámetro (entre 1,27 y 2 cm), la gráfica sugiere probar distancias de siembra no menores a 5 cm, debido al espacio físico que ocupan los minitubérculos sobre el suelo. Para minitubérculos de diámetro pequeño (menores de 0,5 cm de diámetro) se pueden intentar distancias menores de 5 cm, pues el espacio físico ocupado por éstos es mínimo y, además, por el desarrollo tan pequeño de la planta, no hay una fuerte competencia por luz y nutrientes (Figura 1b).

En *S. Tuberosum*, se han encontrado densidades de 50 plantas/m² (INIAP, 1993), 20 a 24 plantas / m² (PROINPA, 1996), con lo cual queda de manifiesto que *S. phureja* acepta mayores densidades de siembra (277 plantas/m²) y es posible aprovechar los tamaños más pequeños (menores de 0,5 cm de diámetro) como minitubérculo semilla.

Tasa de multiplicación

Como se demostró anteriormente, la tasa de multiplicación es función del cuadrado de la distancia entre plantas y de la producción por m². Encontramos que, ésta última, es a su vez, dependiente de la distancia entre plantas (en forma cúbica) y del diámetro del minitubérculo semilla, por lo cual, la función de tasa de multiplicación tendrá, en sus términos independientes, efectos hasta de quinto orden (D⁵) y, por lo tanto, existirán cuatro coordenadas que puntualizarán tasas de multiplicación máximas o mínimas. Como nos encontramos limitados a unas distancias entre plantas y unos diámetros de minitubérculo semilla ensayados, obtuvimos la tasa de multiplicación, para cada tratamiento, graficando luego, estos datos en función de la distancia entre plantas.

La mejor tasa de multiplicación total (Figura 2b) la obtenemos discriminando de la siguiente manera: Para minitubérculos semilla entre 0,5 y 1,27 cm de diámetro, la mejor tasa de multiplicación total (TMT) es 9,3 tub./minitubérculos a una distancia entre plantas de 15 cm. Para minitubérculos semilla entre 1,27 y 2 cm de diámetro, la distancia entre plantas de 12 cm muestra la mayor tasa de multiplicación total (8 tub./minitubérculo) y, para minitubérculos menores de 0,5 cm de diámetro, la mayor tasa de multiplicación total es 6,7 tub./minitubérculo a una distancia entre plantas de 15 cm. La distancia entre plantas no recomendable para todos los diámetros de minitubérculo semilla es de 9 cm entre plantas.

Como se muestra en la Figura 2b, existe un incremento en la tasa de multiplicación muy leve a distancias de siembra de 6 cm entre plantas y una tendencia a incrementarse dicha tasa a menor distancia, corroborando los análisis estadísticos de producción por m². A medida que la curva aumenta y se acerca a una distancia entre plantas de 15 cm, la pendiente de la curva tiende a cero, indicando que a mayores distancias, el aumento

de la tasa es escaso o mínimo. La tendencia global para obtener altas tasas de multiplicación total es utilizando las distancia de siembra de 12 y 15 cm entre plantas, junto con minitubérculos grandes (entre 1,27 y 2 cm de diámetro) y medianos (entre 0,5 y 1,27 cm de diámetro), respectivamente.

En la Figura 2h, se observa como tendencia general que los minitubérculos semilla entre 1,27 y 2 cm producen bajas tasas de multiplicación (cerca de 1 tub./minitubérculo) para tubérculos entre 0,5 y 1,27 cm de diámetro (TM3) y producen la mejor tasa de multiplicación (2,5 tub./minitubérculo) de tubérculos entre 2 y 4 cm de diámetro (TM1, Figura 1d). En cambio, los minitubérculos semilla menores de 0,5 cm de diámetro generan la mayor tasa de multiplicación de tubérculos (3,43 tub./minitubérculo) entre 0,5 y 1,27 cm de diámetro (TM3) y la menor tasa de multiplicación (0,18 tub./minitubérculo) de tubérculos, entre 2 y 4 cm (TM1). En estos dos tipos de minitubérculos cosechados, la distancia que optimiza la tasa de multiplicación es la de 12 cm entre plantas y la que genera menores tasa de multiplicación es la de 9 cm entre plantas.

Para cosechar tubérculos entre 1,27 y 2 cm de diámetro, la mejor tasa de multiplicación (TM2) es 4,5 tub./minitubérculo, lo cual se consigue utilizando minitubérculo semilla entre de 1,27 cm y 2 cm de diámetro a distancias de 12 cm entre plantas (Figura 1f). La curva que describe el comportamiento de este minitubérculo semilla indica, además, que a una distancia de 6 cm entre plantas, se consigue la siguiente mejor tasa (3,5 tub./minitubérculo) y, por lo tanto, si deseamos producir una mayor cantidad de tubérculos entre 1,27 y 2 cm de diámetro, nuestra mejor opción es multiplicar tubérculo semilla entre 1,27 y 2 cm de diámetro utilizando distancias de 12 cm entre plantas; o si queremos obtener altas tasas de multiplicación y producción por m², utilizaremos distancias de 6 cm entre plantas.

Como nos interesa producir semilla prebásica entre 1,27 y 4 cm de diámetro, la mejor opción, con el fin de obtener la mayor tasa (TM2 y TM1), es utilizar distancias entre plantas de 12 cm y minitubérculo semilla entre de 1,27 y 2 cm de diámetro.

LITERATURA CITADA

- DRAPER, N. R., H. SMITH. Applied Regression Analysis. Segunda Edición. John Wiley & Sons. New York. U.S.A. 709 p. 1981.
- FEDEPAPA. La papa criolla una alternativa agroindustrial. Boletín informativo. Número 10:3. Bogotá. Colombia. 1988.
- HERNANDEZ, E. Producción de semilla básica de papa criolla *S. phureja*. memorias II simposio de papa criolla. Santa fe de Bogotá. 1996.
- INIAP. "Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias". Producción de semilla de papa con alta calidad sanitaria a partir de cultivos de tejidos. Revista Pracipa. Boletín técnico No 73, Quito. Ecuador. 26 p. 1993.
- OBANDO, B. O. y M. A Pulido. Evaluación de dos edades fisiológicas de semilla asexual de papa sobre los estados

de crecimiento y desarrollo y el rendimiento comercial. Tesis. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Agronomía. Bogotá. 1987.

- PROINPA. Programa de investigación de la papa. Informe Anual. Compendio 1994 - 1995. IBTA (Instituto Boliviano de Tecnología Agrícola. La Paz. Bolivia. p. 59-62. 1996.
- ROBERTS E.A. Secuencial data in biological experiments. Chapman & Hall. Primera Edición. Great Britain. 238 p. 1992.
- SALISBURY, B. F. y W. C. Ross. Fisiología vegetal. Editorial Iberoamericana. United States of América. 555 p. 1992.
- SAS Institute Inc. SAS/STAT Guide for Personal Computers, Version 6 Edition. SAS Institute Inc. Cary, NC. USA. p. 549-640, 773-876, 941-948. 1987.
- STEEL, R. y J. Torrie. Bioestadística Principios y procedimiento. Segunda edición (primera en español) Mc Graw Hill. México D. F., México. 622 p. 1990.
- WIERSEMA, S. G. Efectos de la densidad de tallos en la producción de papa. Boletín de información técnica No 1. Centro internacional de la papa. CIP. Lima. Perú. 16 p. 1981.