

ARTÍCULO ORIGINAL

Eficiencia de tres fuentes fertilizantes sobre la producción de chile dulce (*Capsicum annuum*) c.v. Natali y sus curvas de absorción, en la producción de chile dulce en invernadero

*Efficiency of three fertilizer sources on the production of sweet pepper (*Capsicum annuum*) cv Natali and absorption curves, in the production of greenhouse sweet pepper*

Prof. Adrián Enrique Chavarría Vidal
Instituto Tecnológico de Costa Rica

RESUMEN. El objetivo de la investigación fue determinar mediante la técnica de curvas de absorción las eficiencias de tres dosis de fertilizante de las fuentes hidrosoluble para fertirriego, granulado convencional y liberación lenta, sobre el crecimiento y producción de chile dulce c.v. Nathalie, en siembra en suelo en invernadero en el campus del I.T.C.R. en la provincia de Cartago, Costa Rica. Las dosis de fertilizantes aplicadas no difirieron entre sí respecto de la cantidad y distribución de las clases comerciales de la cosecha, ni en la cantidad de biomasa producida. La técnica de confección de curvas de absorción fue adecuada para la determinación de las eficiencias de las fuentes fertilizantes. La fuente de liberación lenta en la menor dosis evaluada optimizó la fertilización bajo las condiciones del sistema de producción estudiado.

Palabras clave: fertirriego, granulado convencional, liberación lenta, fuente hidrosoluble.

ABSTRACT. The objective of the research was to determine through technical efficiencies absorption curves of three doses of water-soluble fertilizer for fertigation sources, conventional and slow-release granules, on the growth and yield of sweet pepper cv Nathalie, in planting in soil in the greenhouse on the campus of ITCR in the province of Cartago, Costa Rica. The doses of fertilizer applied showed no significant differences in respect of the amount and distribution of the commercial classes of harvest, or in the amount of biomass produced. Making technique was adequate absorption curves for the determination of the efficiency of the fertilizer source. The source of slow release at the lowest dose tested under optimized conditions fertilizer production system studied.

Keywords: fertigation, conventional granular, slow-release, water soluble source.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de chile dulce, entre las hortalizas de fruto, ocupa el segundo lugar en importancia socioeconómica y de consumo en Centroamérica (MAG, 2007). A éste se le considera una hortaliza de alto valor nutritivo especialmente relacionado con el aporte de vitamina C.

Un aspecto hasta ahora no investigado en Chile en condiciones de invernadero, es el referente a la determinación de las eficiencias agronómicas de las fuentes fertilizantes mayormente utilizadas.

El mejoramiento de la eficiencia de uso de los nutrientes es un factor de importancia a nivel productivo, económico y

ambiental. Se debe considerar que un incremento de la eficiencia de fertilización favorece la rentabilidad y sostenibilidad del sistema de producción, pues disminuye el impacto de los fertilizantes sobre los medios a los que no va dirigido (Ciampitti y García 2008, Bruulsema *et al.* 2008).

La determinación de los parámetros de la eficiencia de fertilización requiere de un estimado del consumo de nutrientes por las plantas. Un método al alcance por su sencillez y por su costo no tan elevado respecto a los métodos con radioisótopos, de estimar la absorción de nutrientes es la utilización de la técnica para la confección de “curvas de absorción de nutrientes”. Éstos permiten conocer la cantidad de nutrientes que es absorbida por un cultivo para producir un rendimiento en un tiempo definido.

Factores que afectan la eficiencia de fuentes fertilizantes

Dibb (2000) y Lora (1984) mencionan que la eficiencia de la fertilización y la viabilidad económica son parte del sistema total de producción y que cada uno de ellos tiene factores que necesitan ser optimizados para lograr la meta de producción propuesta.

Optimizar la eficiencia de uso de los nutrientes conlleva la aplicación correcta de fertilizantes, esto es: dosis correcta, fuente correcta, en el momento correcto y en la ubicación correcta (Ciampitti y García (2008), Espinosa). Estos cuatro factores interactúan entre sí, con las condiciones edafoclimáticas y las prácticas de cultivo (Buresh y Witt 2007; Roberts 2007).

Parámetros de la eficiencia de fertilización

Según Hädter y Fairhurst (2003), Prochnow *et al.* (2009) y Bruulsema *et al.* (2008) los parámetros empleados para determinar la eficiencia en el uso de nutrientes deben contestar cuatro interrogantes básicas que son:

- ¿Cuánto de los nutrientes aplicados es tomado por el cultivo?
- ¿Cuánto rendimiento adicional se obtiene por cada unidad de nutriente aplicado?
- ¿Cuánto puede el cultivo actual beneficiarse de los nutrientes nativos y residuales de cultivos anteriores?
- ¿Cuál es el retorno monetario de los nutrientes aplicados?

Los indicadores que pueden ser usados para evaluar la eficiencia del uso de nutrientes se describen a continuación.

Eficiencia de recuperación (ERFa)

Según Sahrawat *et al.* (2003), Zhao *et al.* (2007) y Dobermann y Fairhurst (2007), Dobermann (2007) este parámetro se refiere a: ¿cuánto del fertilizante aplicado es absorbido por el cultivo?

$$ERFa = (NeFa - Ne0Fa) / Fa$$

o por la comparación de dos tratamientos diferentes

$$ERFa = (NeFa2 - Ne1Fa) / (Fa2 - Fa1)$$

donde:

ERFa-Eficiencia de recuperación del fertilizante aplicado ($kg \cdot kg^{-1}$);

NeFa-total de nutriente extraído por la planta medido en biomasa seca cuando se aplicó fertilizante, kg ;

Ne0Fa-total de nutriente extraído medido en biomasa seca sin la aplicación de fertilizante, kg ;

Fa1 y Fa2-nutriente adicionado en dos tratamientos diferentes donde Fa2 recibe mayor dosis de nutriente que Fa1, kg .

Eficiencia agronómica (EAFa)

Según Scholbewrg *et al.* (2009) y Snyder (2009) esta eficiencia se refiere a ¿cuánto rendimiento adicional se obtiene por cada kilogramo de fertilizante aplicado?

$$EAFa = (YFa - Y0Fa) / Fa$$

donde:

EAFa-Eficiencia agronómica del nutriente aplicado, $kg \cdot kg^{-1}$;

Y0Fa-producción sin aplicación de fertilizante, kg ;

YFa-Producción con aplicación de fertilizante, kg ;

Fa-Cantidad de fertilizante aplicado, kg .

Eficiencia económica (EEFa)

Buresh y Witt (2007), Clif (2009), Espinosa y García (2009) indican que este parámetro se refiere a: ¿cuánto ingreso adicional se produce por la inversión en la aplicación del fertilizante?

$$EEFa = (RFa - R0Fa) / CFa$$

donde:

EEFa-Eficiencia económica de la fertilización aplicada, $\$/\$$;

RFa-Retorno monetario cuando se aplica fertilizante;

R0Fa-Retorno monetario cuando no se aplica fertilizante;

CFa-Costo de la fertilización.

MÉTODOS

Factores evaluados

Para el cultivo de chile dulce c.v. Nathalie evaluó las eficiencias de las fuentes y dosis fertilizantes en condiciones de invernadero y suelo arcilloso.

Fuentes fertilizantes

Se evaluaron las siguientes fuentes fertilizantes:

- Granulado convencional (Gr): la fórmula aplicada fue 13,1 (N) – 10,4 (P_2O_5) – 15,8 (K_2O) – 2,1 (MgO) – 3,2 (CaO) – 4,6 (S). La formulación fue física a partir de las siguientes materias primas: NH_4NO_3 (33,5% N), $(NH_4)_2SO_4$ (21% N; 23,7% S), Ca (NO_3)₂ (15% N; 27,1% CaO), M.A.P. (10% N, 50% P_2O_5), KCl (60% K_2O), K-Mag (22% K_2O , 18% MgO, 22% S) y $CaSO_4 \cdot MgSO_4$ (22% CaO, 17% MgO, 19% S).
- Granulado de liberación lenta (LL): la fórmula aplicada fue 13,0 (N) – 10,6 (P_2O_5) – 15,8 (K_2O) – 2,1 (Mg) – 3,1 (CaO) – 4,5 (S). La formulación física fue a partir de las siguientes materias primas de liberación lenta: 37-0-0 (agrocote),

38-0-0 (agrocote), 0-0-10 (agrocote) y 0-0-51 (agrocote). Además, en la formulación se emplearon las fuentes convencionales M.A.P., K-Mag, KCl, $(\text{NH}_4)\text{SO}_4$ y $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. La estructura de la mezcla dió como resultado un 76,64% de N y un 56,56% del K_2O en forma de liberación lenta.

c. Hidrosoluble para fertirriego (Fr): se emplearon las siguientes materias primas, todas en formulación hidrosoluble: urea (46% N), $(\text{NH}_4)\text{SO}_4$ (21% N; 23,7% S), M.A.P. (12% N, 61% P_2O_5), K_2SO_4 (50% K_2O , 17% S), KCl (62% K_2O), MgSO_4 (17% MgO, 14% S) y $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (15% N, 18% CaO).

La fórmula sumariada fue: 13 (N) – 10,5 (P_2O_5) – 15,6 (K_2O) – 2,1 (MgO) – 3,2 (CaO) – 4,5 (S) que se aplicó en dos formulaciones (Fórmula 1: 7,9 (N) – 10,5 (P_2O_5) 15,6 (K_2O) – 0 (MgO) – 0 (CaO) – 2,8 (S). Fórmula 2: 5,1 (N) – 0 (P_2O_5) – 0 (K_2O) – 2,1 (MgO) – 3,2 (CaO) – 1,7 (S).

Dosis de las fuentes fertilizantes

Las tres fuentes fertilizantes fueron formuladas tal que las cantidades de los nutrimentos aplicados por dosis fueron equivalentes (Cuadro 1). Esta condición se logró para N, P_2O_5 , K_2O , MgO y CaO; elementos que se contemplaron en la investigación.

Para la selección de las dosis a evaluar se tomó como referencia la cantidad media de fertilizante aplicado por el productor, en iguales sistemas de producción en la región de estudio. A esta cantidad se le designó dosis 2 (D2); luego la dosis 1 (D1) correspondió a un 25% más de fertilizante y la dosis 3 (D3) correspondió a un 25% menos de fertilizante sobre la dosis 2.

La fuente granulada convencional se aplicó cada 15 días; la cantidad de fertilizante respectiva por dosis y planta se aplicó en círculo alrededor de la misma.

La fuente granulada de liberación lenta se aplicó en dos fracciones iguales, a los 28 y 98 D.D.S., también en círculo alrededor de la planta.

La fuente hidrosoluble se aplicó junto con el riego por goteo cada semana, en este caso se aplicó la fórmula 1 (7,9 – 10,5 – 15,6 – 2,8 (S)) un día y al siguiente se aplicó la fórmula 2 (5,1 – 0 – 0 – 2,1 (MgO) – 3,2 (CaO) – 1,7 (S)).

Se estableció un tratamiento adicional para cada una de las fuentes fertilizantes con cero fertilización al cual se le llamó testigo.

Para preparar el suelo del invernadero se pasó un rotador a una profundidad de 20 cm en promedio, luego se confeccionaron los surcos. El riego por goteo sin fertirriego se instaló en los otros ocho surcos donde se estableció la fertilización granulada convencional (4 surcos) y la fertilización por fertilizante granulada de liberación lenta (4 surcos). En el sistema de riego por goteo se instaló tubería con diámetro interno de 15,60 mm, con goteros cada 40 cm y con un caudal de 1,66 L·hr⁻¹. Anteriores investigaciones en la misma área demostraron que riegos de 1,0 hora todos los días eran suficientes para cubrir las necesidades hídricas del cultivo de chile dulce según Villalobos *et al.* (2005).

El establecimiento de los tratamientos en el invernadero se realizó en tres parcelas grandes de cuatro surcos cada una. Cada parcela grande se subdividió en 10 subparcelas, con 8 plantas por surco para un total de 32 plantas por cada subparcela experimental. En las 10 subparcelas se distribuyeron de manera aleatoria las 3 diferentes dosis con 3 repeticiones cada una y una subparcela para el testigo sin fertilizante de los tratamientos experimentales.

En todos los tratamientos se aplicó una fertilización de arranque de la fórmula 10-30-10 granulada. Las cantidades aplicadas al momento de la siembra fueron 52,08 kg N·ha⁻¹, 156,25 kga P_2O_5 ·ha⁻¹ y 52,08 kg K_2O ·ha⁻¹. Posteriormente entre la semana 5 hasta la 23 se aplicaron los tratamientos, según la fuente fertilizante; para hidrosoluble se aplicó semanalmente, para granulada convencional cada dos semanas y para liberación lenta en las semanas 4 y 14.

CUADRO 1. Fertilizante aplicado (kg·ha⁻¹) de tres fuentes en tres diferentes dosis en el experimento

Fuente Fertilizante Dosis 1	N	P_2O_5	K_2O	MgO	CaO
Convencional granulada	286,60	344,28	333,45	37,59	58,89
Liberación Lenta	287,69	344,28	334,09	38,06	53,21
Hidrosoluble	287,82	344,40	335,27	37,74	54,55
Fuente Fertilizante Dosis 2					
Convencional granulada	227,97	297,27	263,11	28,20	44,17
Liberación Lenta	228,79	297,27	263,59	28,54	39,90
Hidrosoluble	228,88	297,36	264,48	28,31	40,91
Fuente Fertilizante Dosis 3					
Convencional granulada	169,34	250,26	192,77	18,79	29,44
Liberación Lenta	169,89	250,26	193,09	19,03	26,60
Hidrosoluble	169,95	250,32	193,68	18,87	27,28

Se identificaron el 2do. y 3er. surco de cada subparcela y se seleccionaron tres plantas para realizar las medidas de cosecha. Las medidas de cosecha se realizaron a partir de la semana 12 hasta la 24 inclusive, donde se tomó el peso fresco de los frutos, la categoría comercial de los frutos y el número de frutos en cada categoría comercial. Los frutos se clasificaron en calidades 1, 2

y 3. La calidad 1 se refiere a todos los frutos con peso mayor a 120 g, la calidad 2 a los frutos entre los pesos de 80 a 120 g y la calidad 3 a los frutos con pesos menores a 80 g.

Para la estimación de la absorción nutricional se realizaron muestreos de plantas las cuales se separaron en raíces, hojas, tallos y frutos, a los 65, 93, 113, 141 y 169 días después de la siembra que representaron las principales etapas fenológicas. Estos muestreos se realizaron siguiendo el procedimiento general para confección de curvas de absorción según Bertsch (2003).

Se utilizó un diseño experimental irrestricto al azar con arreglo factorial de tres dosis crecientes en cada fuente fertilizante. Además, se estableció un tratamiento al cual no se le aplicó fertilizante (testigo). Adicionalmente se realizó una

prueba de balance ortogonal que valoró las diferencias entre los tratamientos fertilizados y el tratamiento testigo. El análisis de varianza se aplicó a las variables de cosecha. Para el análisis estadístico se utilizó el programa Statistical Analysis System (SAS).

Caracterización química del suelo del invernadero

El pH del suelo fue ligeramente ácido y el porcentaje de saturación de acidez indicó que no tiene problemas con acidez intercambiable. Además, el suelo tanto en macroelementos como en microelementos no mostró problemas de deficiencias nutricionales (Cuadro 2).

Cuadro 2. Análisis químico del suelo del invernadero ubicado en el Instituto Tecnológico de Costa Rica en Cartago

Soluciones Extractoras: KCl y Olsen Modificado	pH		Cmol (+)·L ⁻¹				%			Mg·L ⁻¹			
	H ₂ O	ACIDEZ	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn	
Invernadero	5,5	0,26	10,4	4,79	0,58	16,03	2	34	7,2	22	106	230	
Valores críticos	5,5	0,5	4	1	0,2	5		10	3	1	10	5	

Los valores debajo de cada elemento corresponden con los valores críticos generales para las soluciones extractoras Usadas

SA- Porcentaje de Saturación de Acidez = (Acidez/CICE)·100

CICE-Capacidad de intercambio de Cationes Efectiva = (Acidez+Ca+Mg+K)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Absorción de nutrimentos en la fuente hidrosoluble aplicada en fertirriego

Cuando se aplicó la fuente hidrosoluble la tendencia de absorción de los elementos N, P, Ca, Mg y K fue similar en el tiempo independientemente de la dosis aplicada (Figura 1). Sin embargo, se observó una mayor absorción total en la dosis mayor (D1) para todos los elementos valorados.

En las dosis 1 y 2 se encontró la mayor absorción de nutrimentos de los 0 a los 65 DDS que incluye las fases de establecimiento y crecimiento exponencial y de los 113 a los 141 DDS, periodo de máxima producción de fruto (Figura 1).

En el caso de la dosis 3 (menor dosis) la absorción se comportó de forma similar de los 0 a los 65 DDS, pero a partir de esa edad se observó una absorción homogénea a través del desarrollo del cultivo (Figura 1).

En general, se observó el siguiente orden de absorción: K > N > Ca > Mg ≈ P.

Los ámbitos de absorción que mostraron los elementos evaluados con la fuente hidrosoluble para las distintas dosis fueron:

N = 112,59 (D2) a 160,93 (D1);
 P = 15,21 (D2) a 18,44 (D1);
 Ca = 41,93 (D3) a (D1) 54,50;
 Mg = 17,07 (D2) a 20,54 (D1) y
 K = 176,19 (D3) a 225,47 (D1) kg·ha⁻¹.

Absorción de nutrimentos en la fuente granulada convencional

Con la fuente granulada convencional la tendencia de absorción de los elementos N, P, Ca, Mg y K fue similar en el tiempo

para todas las dosis (Figura 2). Para esta fuente las cantidades absorbidas de los nutrimentos entre dosis fueron similares.

En las dosis 1 y 2 se observó una mayor absorción de nutrimentos de los 0 a los 65 DDS y a partir de los 113 días hasta el último muestreo hecho (169 DDS). En la dosis 3 se observó una absorción más homogénea a través de todo el periodo evaluado, comportándose de manera similar a la fuente hidrosoluble en la misma dosis (Figura 2).

En general se presentó una tendencia de absorción en el siguiente orden K > N > Ca > Mg ≈ P, igual orden al que se presentó en la fuente hidrosoluble.

Los ámbitos de absorción total que presentaron los elementos nutritivos en la fuente granulada convencional en los diferentes dosis fueron:

N = 129,59 (D2) a 141,58 (D1);
 P = 13,03 (D2) a 16,42 (D3);
 Ca = 35,51 (D2) a 45,70 (D1);
 Mg = 14,71 (D2) a 18,52 (D1) y
 K = 163,42 (D2) a 188,63 (D3) kg·ha⁻¹.

Absorción de nutrimentos en la fuente granulada de liberación lenta

Cuando se aplicó la fuente granulada de liberación lenta la tendencia de absorción de los elementos N, P, Ca, Mg y K fue similar en el tiempo en las tres dosis evaluadas (Figura 3). En esta fuente la dosis 2 (intermedia) produjo la mayor absorción de todos los elementos evaluados. En las tres dosis evaluadas se observó la mayor absorción de nutrimentos entre los 0 y los 65 DDS y de los 113 DDS hasta el último muestreo hecho (169 DDS). Comportamiento similar al hallado en las otras fuentes evaluadas.

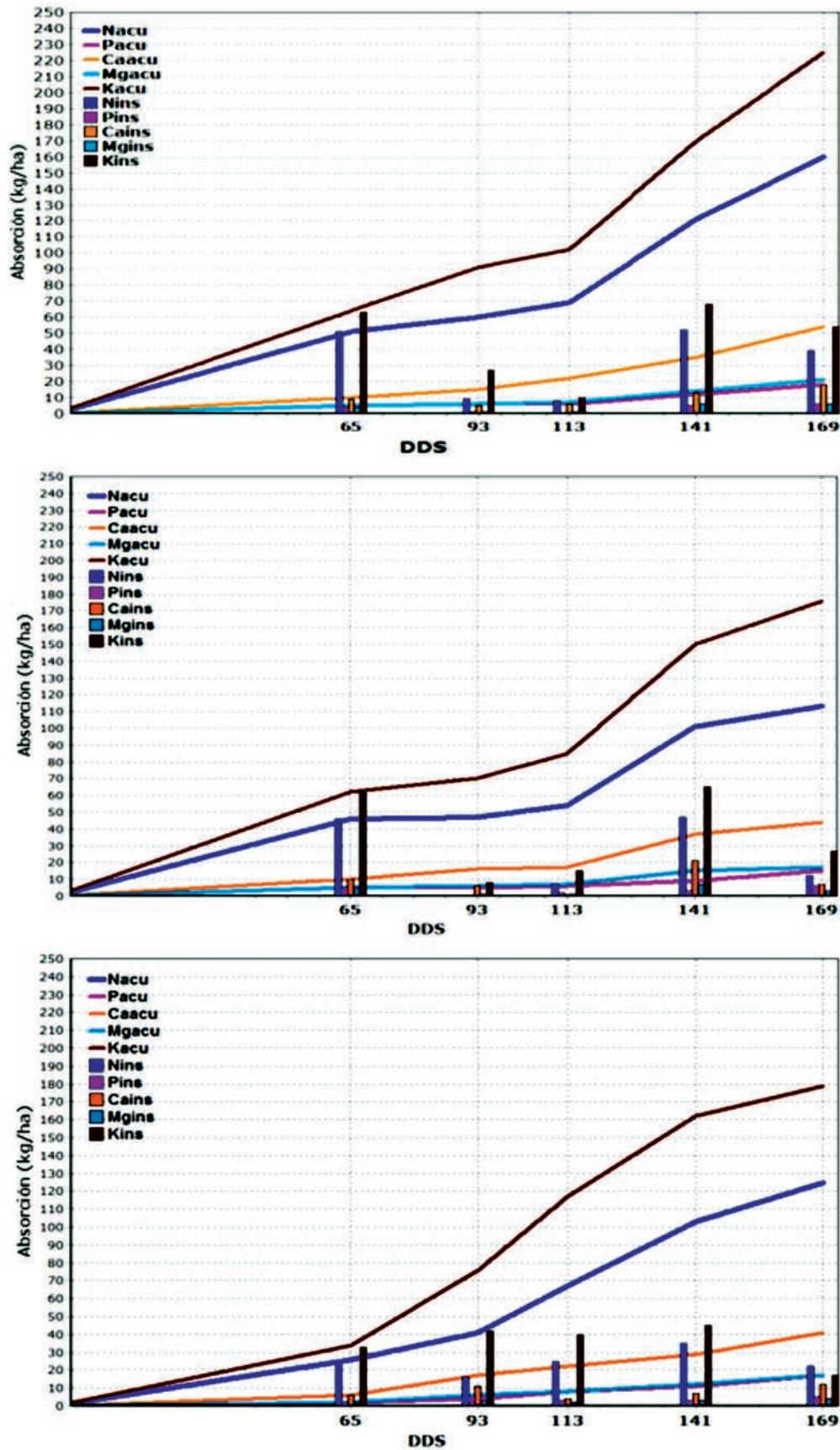


FIGURA 1. Absorción de nutrientes acumulada (acu) y absorción por etapa fenológica (ins) de chile dulce (c.v. Nathalie) en invernadero en la fuente hidrosoluble en dosis crecientes (D1>D2>D3).

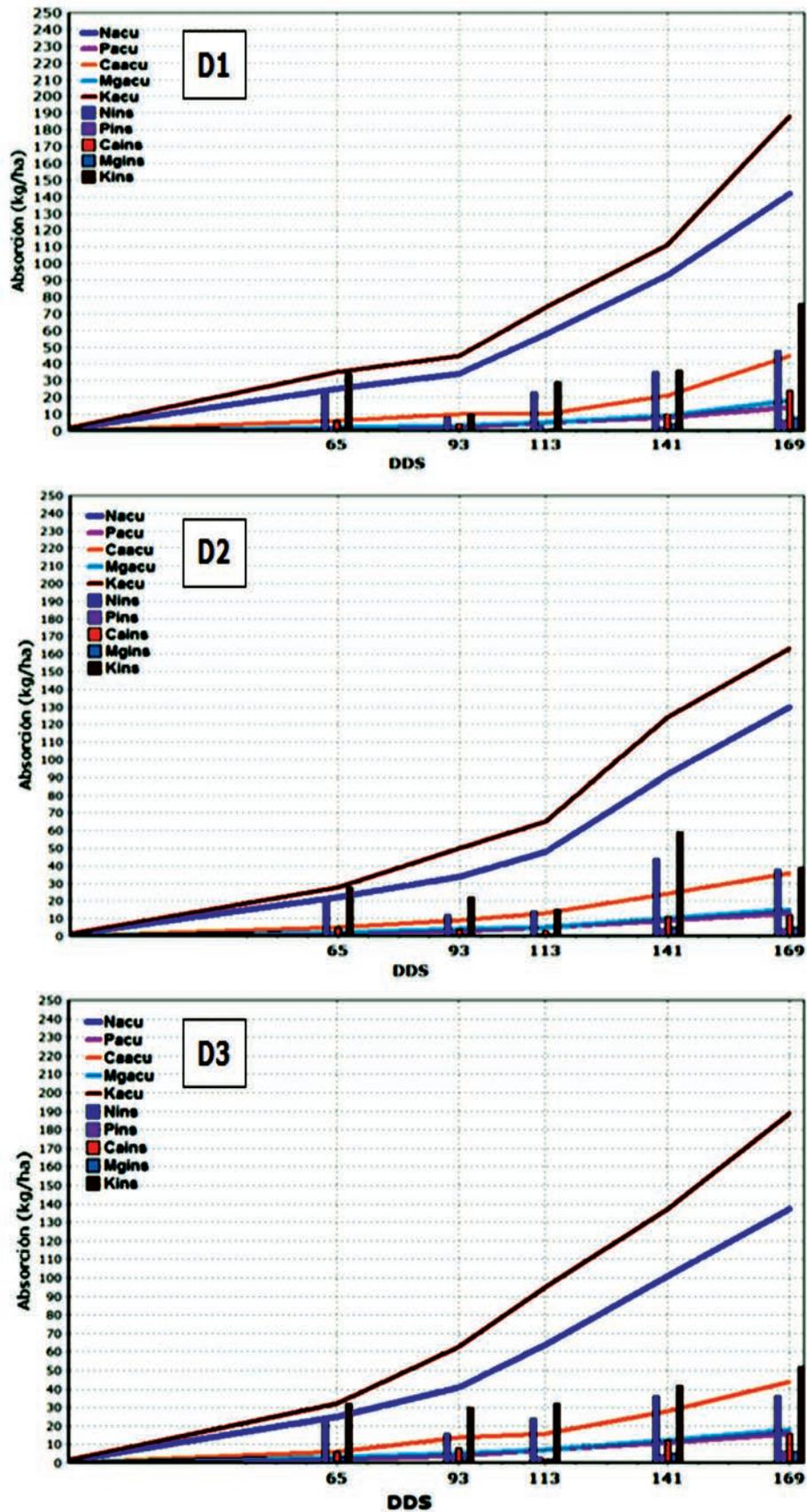


FIGURA 2. Absorción de nutrientes acumulada (acu) y absorción por etapa fenológica (ins) de chile dulce (c.v. Nathalie) en invernadero en la fuente granulada convencional en dosis crecientes (D1>D2>D3).

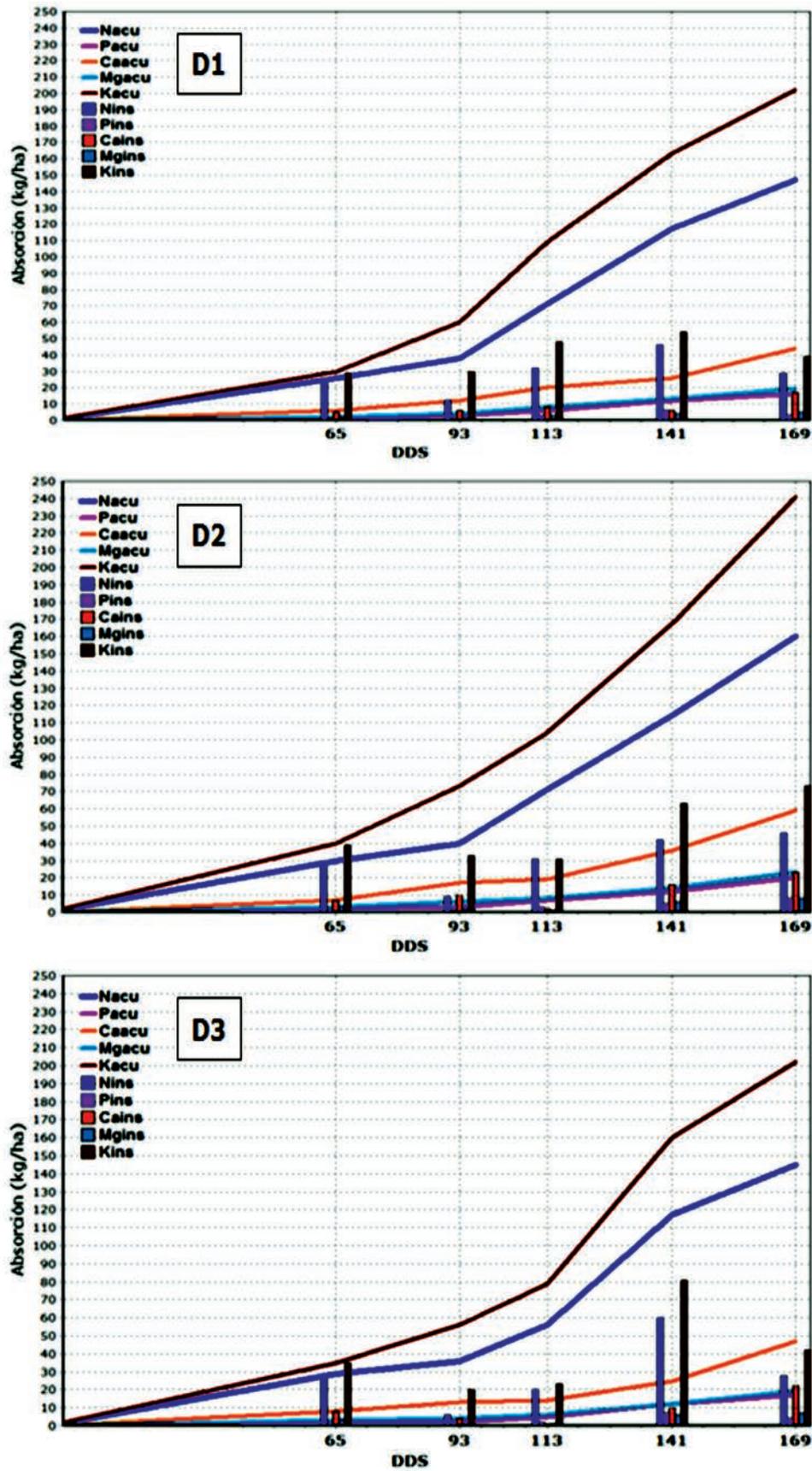


FIGURA 3. Absorción de nutrientes acumulada (acu) y absorción por etapa fenológica (ins) de chile dulce (c.v. Nathalie) en invernadero en la fuente granulada de liberación lenta en dosis crecientes (D1>D2>D3).

Se observó en general una tendencia de absorción en el siguiente orden $K > N > Ca > Mg \approx P$, tal como se presentó con las fuentes granulado convencional e hidrosoluble.

Los ámbitos de absorción total que presentaron los elementos nutritivos en la fuente liberación lenta fueron:

- N = 145,17 (D3) a 160,50 (D2);
- P = 16,48 (D1) a 20,85 (D2);
- Ca = 44,42 (D1) a 59,48 (D2);
- Mg = 19,05 (D1) a 23,29 (D2) y
- K = 201,89 (D1) a 240,55 (D2) $kg \cdot ha^{-1}$.

Absorción de nutrimentos en el tratamiento testigo (sin fertilización)

La absorción de nutrimentos en el tratamiento sin fertilización presentó tendencias similares a las halladas con las fuentes fertilizantes, pero las cantidades absorbidas fueron menores (Figura 4).

En general se observó una tendencia de absorción con el siguiente orden $K > N > Ca > Mg \approx P$. La absorción de los nutrimentos evaluados en el tratamiento sin fertilizar fue de 39,7 para N; 5,99 para P; 13,38 para Ca; 4,76 para Mg y 54,0 para K $kg \cdot ha^{-1}$.

Las mayores absorciones de nutrimentos se presentaron de los 0 a los 65 DDS y de los 113 DDS hasta la fecha del último muestreo realizado (169 DDS), tal como ocurrió cuando se fertilizó con las diversas fuentes.

Análisis de producción en base al total de su peso fresco y del número de frutos

Las mayores cosechas, tanto en peso como en número de frutos totales y de primera calidad, se obtuvieron en los tratamientos fertilizados, pero solamente respecto al tratamiento testigo. Desde la perspectiva de rendimiento se observó respuesta a la aplicación de fertilizante en la dosis menor evaluada, independientemente de la fuente (Figuras 5 y 6).

Eficiencia de recuperación del fertilizante

Con respecto a la eficiencia de recuperación del fertilizante (ERFa), los mayores valores se alcanzaron con la menor dosis aplicada en las tres fuentes.

Sin embargo, entre fuentes se obtuvo la mayor ERFa con el fertilizante granulado de liberación lenta; con esta fuente las eficiencias de recuperación en la menor dosis evaluada para los elementos N, K y Mg fueron cercanas a 1 (0,62; 0,92 y 1,20 $kg \cdot kg^{-1}$ respectivamente), no así para los elementos Ca (1,78 $kg \cdot kg^{-1}$) y P (0,11 $kg \cdot kg^{-1}$) (Cuadro 3).

Por otra parte, la menor eficiencia de recuperación se observó para el elemento fósforo, independientemente de la fuente fertilizante, con valores que no superaron el 11% de recuperación. Este hecho probablemente esté asociado a la presencia de arcillas alofánicas, que si bien no son dominantes en el suelo del sitio experimental sí pudieron influir sobre una alta tasa de fijación de ese elemento.

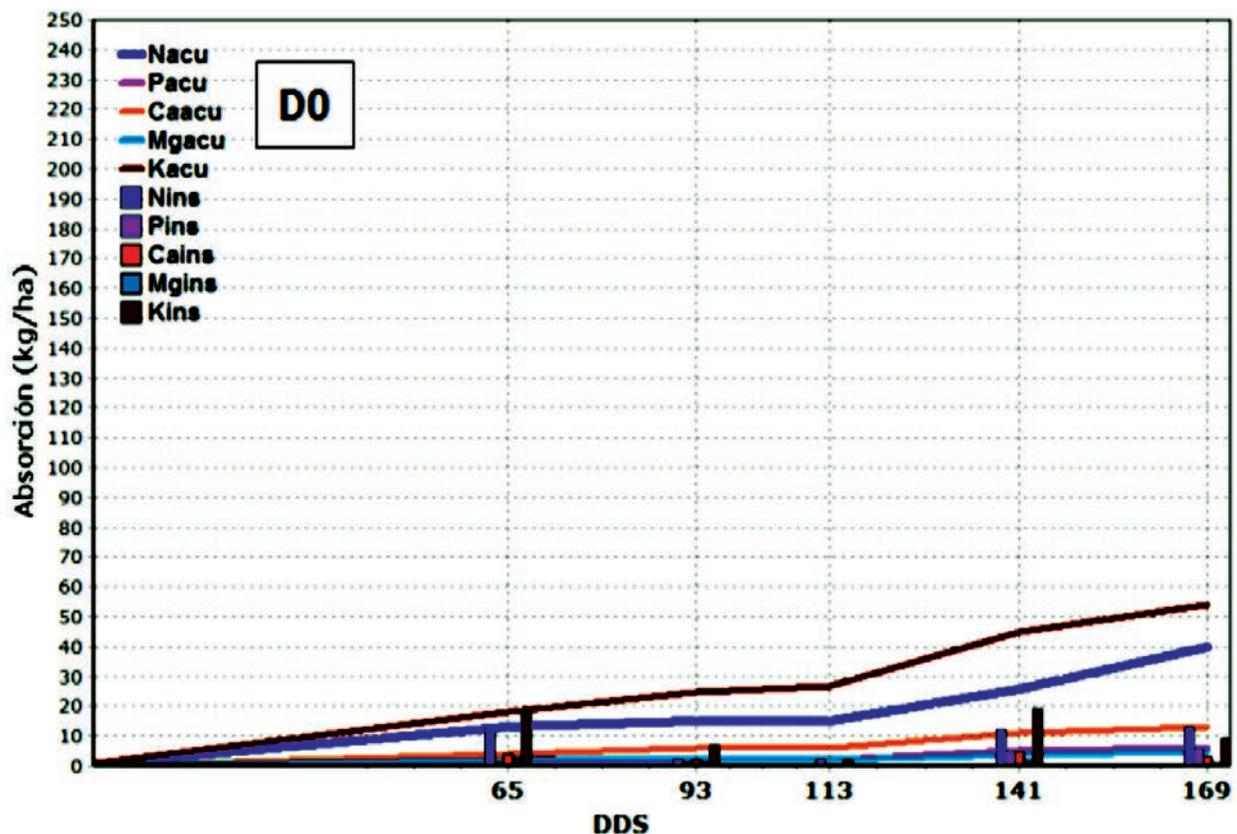


FIGURA 4. Absorción de nutrimentos acumulada (acu) y absorción por etapa fenológica (ins) de chile dulce (c.v. Nathalie) en invernadero sin aplicación de fertilizante (testigo).

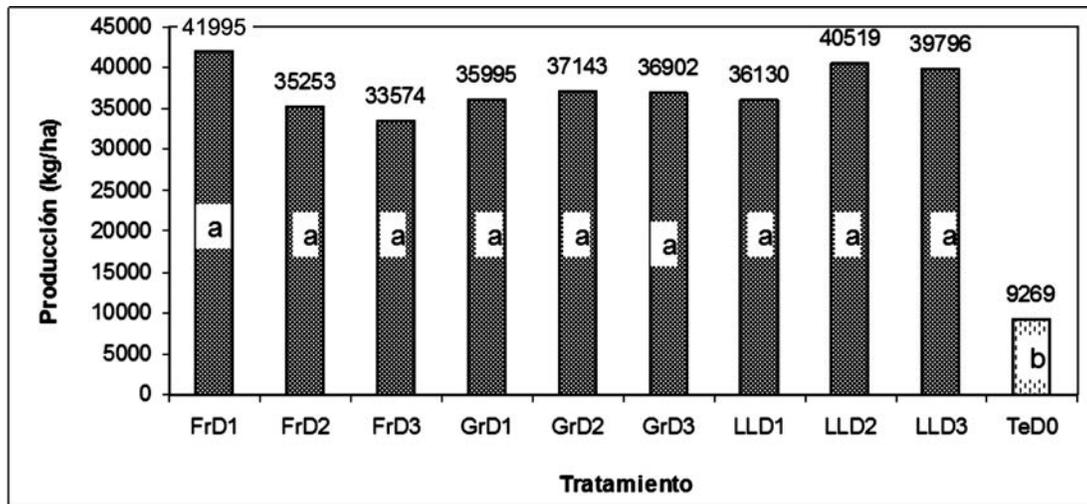


FIGURA 5. Producción en peso fresco de chile dulce (c.v. Natali) 24 semanas después de la siembra de chile dulce de los tratamientos fertilizados con fuentes fertilizantes (Fr: hidrosoluble, Gr: Granulado convencional y LL: liberación lenta) y sus dosis (D1: dosis 1, D2: Dosis 2 y D3: Dosis 3) y el no fertilizados (Te: testigo, D0: dosis 0).

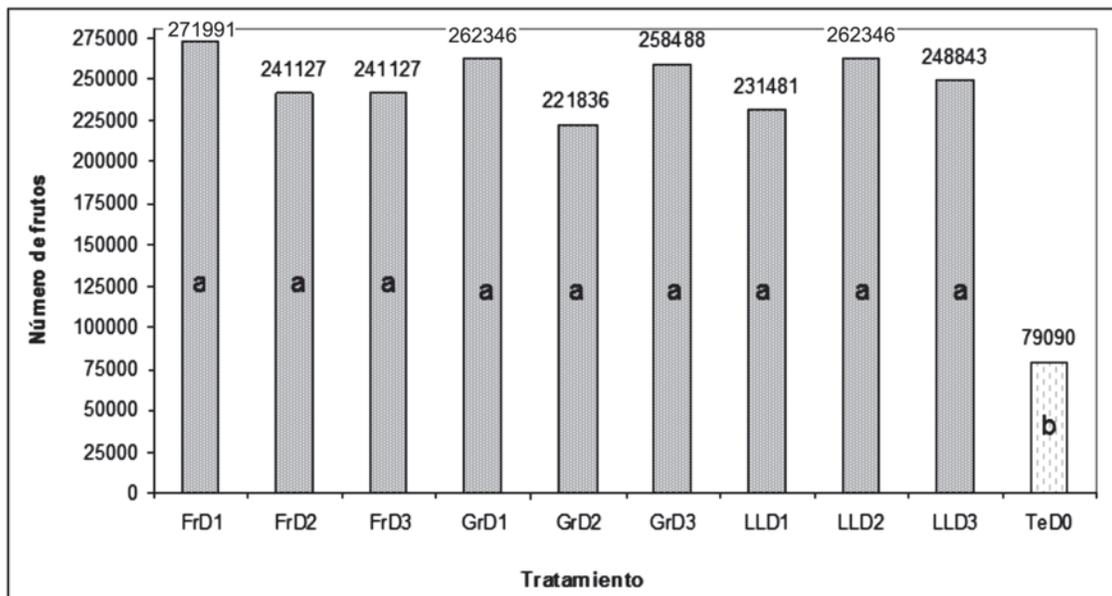


FIGURA 6. Producción del número de fruto fresco de chile dulce (c.v. Natali) 24 semanas después de la siembra de chile dulce de los tratamientos fertilizados con fuentes fertilizantes (Fr: hidrosoluble, Gr: Granulado convencional y LL: liberación lenta) y sus dosis (D1: dosis 1, D2: Dosis 2 y D3: Dosis 3) y el no fertilizados (Te: testigo, D0: dosis 0).

CUADRO 3. Eficiencia de recuperación (elemento adicional absorbido/fertilizante aplicado (kg·ha-1)/ (kg·ha-1) a las 24 semanas después de la siembra en el cultivo de chile (c.v. Natali) de todos los tratamientos fertilizados

Tratamiento	N	P	Ca	Mg	K
Fr D1	0,42	0,08	1,06	0,69	0,61
Fr D2	0,32	0,07	1,04	0,72	0,55
Fr D3	0,50	0,10	1,47	1,10	0,78
Gr D1	0,36	0,06	0,77	0,36	0,48
Gr D2	0,39	0,05	0,70	0,34	0,50
Gr D3	0,57	0,10	1,44	0,69	0,84
LL D1	0,37	0,07	0,82	0,38	0,53
LL D2	0,53	0,11	1,62	0,66	0,85
LL D3	0,62	0,11	1,78	0,80	0,92

De acuerdo con el concepto propuesto por Murrell (2009), de que un valor de eficiencia de recuperación cercano a 1 indica un estado adecuado de reposición de los nutrimentos extraídos, puede interpretarse que para los elementos N, K y Mg la fertilización en la dosis 3 fue adecuada. Para calcio se observó una eficiencia de recuperación mayor a 1, lo que indica que la fertilización hecha fue insuficiente y que el suelo proveyó parte del requerimiento del cultivo. Si bien el contenido de Ca disponible de acuerdo con el análisis químico es adecuado (10,4 cmol (+) L⁻¹), el continuo aporte de éste podría conducir a una condición de agotamiento a mediano plazo. Con el fin de evitar esta situación, la dosis de Ca debe aumentarse.

Eficiencia agronómica de las fuentes fertilizantes

Eficiencia agronómica (EAFa) para todos los elementos evaluados, se obtuvieron con la fuente granulado de liberación lenta (agrocote) en la menor dosis aplicada. Al respecto López (1998) informa de una mayor EAFa para los elementos N, P y K de la fuente de liberación lenta formulada a partir de osmocote, respecto a otras fuentes granulares convencionales en banano en la vertiente atlántica costarricense. Según este autor (López 1998), el resultado fue debido a una mayor asimilación de nutrimentos de la fuente de liberación lenta (Cuadro 4).

CUADRO 4. Eficiencia agronómica (producción adicional fresca/elemento aplicado (kg ha⁻¹) / (kg·ha⁻¹) a las 24 semanas después de la siembra en el cultivo de chile (c.v. Natali) de todos los tratamientos fertilizados

Tratamiento	N	P	Ca	Mg	K
Fr D1	126,07	241,27	931,21	1595,93	129,87
Fr D2	129,37	228,03	1013,21	1736,48	134,35
Fr D3	155,35	241,52	1355,13	2322,46	163,58
Gr D1	106,48	202,99	725,50	788,67	109,82
Gr D2	126,47	222,09	913,88	993,45	131,49
Gr D3	174,02	269,64	1401,14	1523,14	183,44
LL D1	99,29	190,01	751,64	768,73	102,60
LL D2	151,91	267,74	1219,37	1247,09	158,23
LL D3	185,08	287,71	1654,69	1692,31	195,41

Eficiencia económica de las fuentes fertilizantes

Eficiencia económica de la fertilización (EEFa) se obtuvo con la menor dosis evaluada en las tres fuentes y entre éstas el mayor valor se alcanzó con el fertilizante granulado de liberación lenta. El factor que mayormente influyó sobre este resultado fue la disminución del costo de mano de obra destinado a la aplicación de fertilizante. La aplicación de la fuente de liberación lenta se realizó en dos eventos, en tanto que la de granular convencional requirió de 10 eventos (aplicación cada dos semanas a partir de la cuarta semana después de la siembra) y la fuente hidrosoluble de 19 eventos (aplicación cada semana a partir de la cuarta semana después de la siembra) (Cuadro 5).

CUADRO 5. Eficiencia económica (retorno económico adicional/costo de la fertilización) a las 24 semanas después de la siembra de chile dulce (c.v. Natali) de todos los tratamientos fertilizados

Tratamiento	Eficiencia \$/\$)
Fr D1	16,22
Fr D2	19,96
Fr D3	27,94
Gr D1	14,16
Gr D2	17,85
Gr D3	23,95
LL D1	11,41
LL D2	21,81
LL D3	33,3

Respecto a la elaboración de las curvas de absorción de nutrimentos se determinó que las mayores asimilaciones de los elementos estudiados independientemente de la fuente empleada, se produjeron a partir de la semana 13, que correspondió a la etapa de mayor formación de frutos.

Las mayores cantidades de elemento absorbido se obtuvieron con la fuente liberación lenta, particularmente en los nutrimentos K y N que fueron aquellos mayormente absorbidos. Además, la mayor velocidad de absorción promedio (kg·ha⁻¹·día⁻¹) se presentó en esta fuente.

En cuanto a las curvas de crecimiento estas presentaron tendencias similares entre fuentes y dosis, aunque la fuente liberación lenta produjo en promedio mayor biomasa seca total.

Por otra parte a través del ciclo de cultivo se hallaron diferencias estadísticas en la producción de biomasa seca de los distintos órganos de la planta entre los tratamientos fertilizados y el tratamiento que no recibió fertilización, independientemente de la fuente aplicada.

Lo anterior permite deducir que el nutrimento que limitó mayormente el crecimiento fue el nitrógeno.

Complementariamente, el peso de cosecha total así como el peso de frutos de primera calidad mostraron diferencias estadísticas entre los tratamientos fertilizados y el tratamiento en el cual no se aplicó fertilizante. Pero, no se determinaron diferencias de cosecha entre dosis para ninguna fuente.

Cuando se relacionaron las cantidades del fertilizante absorbido y el peso de los frutos producidos se determinó que la mayor eficiencia por unidad de fertilizante aplicado se alcanzó con la fuente de liberación lenta. En adición a lo anterior la mayor eficiencia económica se obtuvo con dicha fuente.

Del análisis anterior se concluyó que la fuente de liberación lenta en la menor dosis evaluada optimizó la fertilización bajo las condiciones del sistema de producción estudiado.

CONCLUSIONES

- Las dosis de fertilizantes aplicadas no difirieron entre sí respecto de la cantidad y distribución de las clases comerciales de la cosecha, ni en la cantidad de biomasa producida. Pero la aplicación de fertilizante en cada una de las fuentes sí produjo diferencias significativas en las variables antes citadas respecto del tratamiento en que no se aplicó.

- La deficiencia de N fue el factor nutricional limitante de mayor peso. Lo anterior se manifestó en una menor absorción nutricional, menor crecimiento y menor producción en el tratamiento en que este elemento no se aplicó, a pesar de la suficiencia de los otros elementos nutritivos en el suelo del sitio experimental.
- Los periodos de mayor absorción de los nutrimentos N, P, K, Ca y Mg fueron de los 0 a los 65 DDS que correspondió a la fase de establecimiento y de crecimiento exponencial y de los 113 DDS hasta finalizar el ciclo evaluado (169 DDS), que comprendió las fases de formación intensa de frutos y segunda fase de crecimiento vegetativo. Este comportamiento se observó en las tres fuentes fertilizantes evaluadas.
- Las eficiencias agronómicas de los nutrimentos N, P, Ca, Mg y K para las fuentes hidrosoluble, granulado convencional y liberación lenta fueron mayores en las dosis menores respecto a las dosis mayores; a excepción del P en la fuente hidrosoluble donde las dosis mayor y menor fueron similares.
- La fuente de liberación lenta produjo la mayor absorción de todos los elementos nutritivos evaluados.
- La técnica de confección de curvas de absorción fue adecuada para la determinación de las eficiencias de las fuentes fertilizantes.
- La dosis menor de la fuente de liberación lenta evaluada mostró ser óptima para el sistema de producción evaluado. Debe hacerse la salvedad para el elemento calcio, para el cual con el fin de asegurar una sostenibilidad del aporte de este nutrimento en el tiempo se recomienda aumentar la aplicación de CaO a 55 kg·ha⁻¹.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA: *Agrocadena regional cultivo chile dulce*, pp. 76, Agricultura, Alajuela, COSTA RICA, 2007.
- BERTSCH, F.: *Absorción de nutrimentos por los cultivos*, Ed. ACCS, San José, Costa Rica, 2003.
- BRUULSEMA, T. W.; C. WITT; S. GARCIA; C. H. LI F y S. IVANOVA: "Marco global de las mejores prácticas de manejo (MPM) de los fertilizantes", *Informaciones Agronómicas*, 70: 1-4 2008.
- BURESH, R. J. y W. C.: *Fertilizer Best Management Practices: Site-specific nutrient management*, 267pp., En: (IFA), I. f. i. a. (ed.). Bruselas, Belgica, 2007.
- CIAMPITTI, I. A. y F. O. GARCIA: "Balance y eficiencia de uso de los nutrimentos en sistemas agrícolas", *Revista Horizonte*, 18: 22-28, 2008.
- CLIF, S. Memorias de Simposio Uso eficiente de nutrimentos, En: **XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, 2009**, pp. 11-19, San José, Costa Rica. 2009.
- DIBB, D.: *Eficiencia de uso de los nutrimentos: verdades y mitos*, pp. 1-7, (Informaciones Agronómicas), Ecuador, 2000.
- DOBERMANN, A.: *Fertilizer Best Management Practices: Nutrient use efficiency—measurement and management*, 267pp., International fertilizer industry association, Bruselas, Belgica, 2007.
- DOBERMANN, A. y T. FAIRHURST: *Arroz: Desordenes nutricionales y manejo de nutrimentos*. International Rice Research Institute - Instituto de la potasa y fósforo, 174 - 180pp. 2007.
- ESPINOSA, J. y J. GARCIA. Memorias de Simposio Uso eficiente de nutrimentos, En: **XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, 2009**, pp. 49-56, San José, Costa Rica. 2009.
- ESPINOSA, J. y F. MITE. *Busqueda de eficiencia en el uso de nutrimentos en banano [en línea] Disponible en: [http://www.seap.ipni.net/ppiweb/ltamn.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/2f236d6faa93bb6f05257508005fc67b/\\$FILE/B%C3%BAsqueda%20de%20Eficiencia%20en%20el%20Uso%20de%20Nutrimentos%20en%20Banano.pdf](http://www.seap.ipni.net/ppiweb/ltamn.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/2f236d6faa93bb6f05257508005fc67b/$FILE/B%C3%BAsqueda%20de%20Eficiencia%20en%20el%20Uso%20de%20Nutrimentos%20en%20Banano.pdf) [Consulta: 1 de julio del 2010]*.
- HÄRDTER, R. y T. FAIRHURST: Nutrient use efficiency in upland cropping systems of Asia, En: **Memorias de IFA Regional conference for Asia and the Pacific, 2003**, pp. 1-20, Seoul, Republic of Korea. 2003.
- LÓPEZ, A.: "Nutrición del cultivo del banano (Musa A A A) con el fertilizante de liberación lenta Osmocote", Costa Rica, *Corporación Bananera Nacional*, 23(50): 125-136, 1998.
- LORA, R.: "En Factores que afectan la disponibilidad de los nutrimentos para las plantas", *Fertilidad de suelos, diagnóstico y control*, pp 418 Bogotá, Colombia: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 1984.
- MUNRRELL, S. T. En: Simposio Uso eficiente de nutrimentos, En: **XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, 2009**, pp. 20-25, San José, Costa Rica. 2009.
- PROCHNOW, L.; V. CASARIN; N. FAGERIA y M. MORAES. Memorias de Simposio Uso eficiente de nutrimentos, En: **XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, 2009**, pp. 26-36, San José, Costa Rica. 2009.
- ROBERTS, T. L.: *Fertilizer Best Management Practices: Right product, right rate, right time and right place*, 267pp., The foundation of best management practices for fertilizer, International Fertilizer Industry Association, Bruselas, Belgica, 2007.
- SAHRAWAT, K. L.; M. P. JONES; S. DIATTA y M. SIKI: "Long-term phosphorus fertilizer effects on phosphorus uptake, efficiency, and recovery by upland rice on an Ultisol", *Communications in soil science and plant analysis*, 7: 999-1011, 2003.
- SCHOLBEWRG, J. M.; R. ZOTARELLI; R. S. TUBBS; M. D. DUKES y C. R. M.: "Nitrogen uptake efficiency and growth of bell pepper in relation to time of exposure to fertilizer solution", *Communications in soil science and plant analysis*, 40: 2111-2131, 2009.
- SNYDER, C. S.: "Eficiencia de uso del nitrógeno: Desafíos mundiales, tendencias futuras", *Informaciones Agronómicas*, 75: 1-5, 2009.
- VILLALOBOS, M.; C. ZÚÑIGA; L. MONGE y R. FALLAS: *Evaluación de la producción de tres híbridos de chile con dos dosis de fertilización, en dos tipos de invernaderos*, 38pp., (Informe de Investigación), Vicerrectoría de Investigación y Extensión. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2005.
- ZHAO, S. P.; X. Q. ZHAO; M. LI S y W. M. SHI: "N-efficiency character of high-yield rice is not affected by soil nitrogen supply level", *Acta agriculturae scandinavica section B-soil and plant science*, 57: 97-104, 2007.

Recibido: 28 de octubre de 2011 / **Aprobado:** 22 de diciembre de 2012

Adrián Enrique Chavarría Vidal, Profesor de la Escuela Ingeniería Agrícola, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Correo electrónico: adchavarría@itcr.ac.cr