

EVALUACIÓN DEL FOSFITO COMO FUENTE FERTILIZANTE DE FÓSFORO VÍA RADICAL Y FOLIAR

Floria Bertsch^{1/}, Floria Ramírez^{*}, Carlos Henríquez^{*}*

Palabras clave: Fosfitos, fosfatos, nutrición, absorción radical, absorción foliar.

Keywords: Phosphite, phosphate, nutrition, root absorption, foliar absorption.

Recibido: 27/05/09

Aceptado: 07/08/09

RESUMEN

Se estudió la capacidad del fosfito para suplir la necesidad de P en lechuga, tomate y banano. Se comparó la efectividad relativa del fosfito con respecto al fosfato como fuente de P vía raíz, a través del crecimiento y la absorción del elemento por los 3 cultivos, en condiciones de invernadero en soluciones nutritivas sin P, con fosfito, con fosfato y con ambos. En las mismas condiciones, pero con soluciones nutritivas sin P, se comparó el suplemento de P vía foliar a partir de 4 fuentes comerciales y 2 de calidad reactivo, una de fosfito y otra de fosfato. En el ensayo de absorción vía raíz, los resultados demuestran que el P en forma de fosfito, calidad reactivo, a la solución nutritiva, no es utilizable por la planta para llenar sus necesidades de P, y tiende a causar daño. La combinación de fosfito más fosfato vía raíz, tendió a promover una mayor absorción total de P; sin embargo, en este experimento no se pudo identificar la forma química en que se encuentra ese P dentro de la planta. En el segundo ensayo se demuestra que resulta imposible llenar las necesidades de P de un cultivo con suplemento estrictamente foliar. En condiciones de carencia del elemento vía raíz, los productos comerciales no contribuyeron al crecimiento de los cultivos; tampoco atenuaron la expresión de deficiencia del elemento, ni mejoraron la absorción de este nutrimento en el follaje, más bien, intensificaron el deterioro del follaje y la

ABSTRACT

Evaluation of phosphite as a root and foliar fertilizer source of phosphorus. The capability of phosphite to supply P needs in –lettuce, tomato and banana – was studied. The relative effectiveness of phosphite with respect to phosphate as a source of P via roots was compared through the growth and absorption of the element by the 3 crops, growing under greenhouse conditions in nutrient solutions without P, with phosphite, with phosphate and with both of them. Under the same conditions, but on nutrient solutions without P, the foliar supply of P, and its effect on growth and absorption from 4 commercial sources and 2 of reactive-quality (one phosphite, the other phosphate), were compared on the same 3 crops. In the test for root absorption results show that P as phosphite, is non-usable for the plant to fulfill its P needs, and tends to cause injury. The combination of phosphite plus phosphate via roots tended to promote a greater total P absorption by plants; however, this experiment failed to identify the chemical form in which P is present inside the plant. Results from the foliar application of commercial phosphite and reactive-quality phosphate and phosphite show once again that it is impossible to fulfill the P needs of a crop strictly with foliar applications. On the other hand, under conditions of root-supply shortage of this element, phosphite-based commercial products tested as

1. Autor para correspondencia. Correo electrónico: floria.bertsch@ucr.ac.cr

* Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

raíz. El efecto sinérgico de la aplicación vía raíz de fosfatos y fosfitos, así como la respuesta a los fosfitos foliares con un suplemento adecuado de fosfato vía raíz, ya sea aportado por una solución nutritiva en condiciones hidropónicas o por medio del suelo, merecen ser estudiados con mayor profundidad.

foliar P sources failed to contribute significantly to crop growth; nor did they mitigate P-deficiency expression, nor improved the foliar absorption of this nutrient. Rather, they worsened foliage and root deterioration. The synergistic effect of root application of phosphates and phosphites, as well as the response to foliar phosphites under conditions of adequate phosphate supplement via roots—whether supplied through nutrient solution under hydroponic conditions or by soil means—deserve to be addressed in greater depth.

INTRODUCCIÓN

Formas de P absorbidas vía raíz

La forma convencional de absorción de P por las plantas son los fosfatos. Actualmente existen varios productos químicos de uso agrícola, que han sido presentados como fertilizantes para suplemento de P principalmente vía foliar y que utilizan como fuente primaria de este elemento, formas reducidas tales como los fosfitos en forma de fosfonatos de K entre otros. A estos productos se les reconoce su efecto fungicida sobre oomicetes (Ouimette y Coffey 1989, Carswell et al. 1996, Orovic et al. 2008), de los cuales *Phytophthora* es el género más importante, sin embargo, de su efecto fertilizante lo que se ha demostrado es poca o ninguna acción (Förster et al. 1998, Smillie et al. 1989, Lovatt y Mikkelsen 2006, Orbovic et al. 2008).

Algunos estudios han corroborado que las formas reducidas de fosfatos no son aprovechables directamente por las plantas y que más bien requieren de un proceso de oxidación previo para que su absorción y aprovechamiento por la planta, realmente ocurra (Marschner 1995, MacIntire 1950, McDonald et al. 2001).

Mansour (1995) no encontró ninguna respuesta o aumento en rendimiento o en contenido foliar de P en brócoli y cebolla, al aplicar un producto comercial foliar cuya fuente de P eran fosfitos. Resultados similares fueron obtenidos por Förster et al. (1998) y Adamowicks et al. (1996) en los cultivos de tomate y chile. Lovatt (1990) sin embargo logró superar deficiencias de P con fosfitos foliares en aguacate de vivero.

Pese a lo anterior, es importante hacer la aclaración de que esta oxidación y la consecuente transformación de fosfitos a fosfatos, puede ocurrir bajo ciertas circunstancias y en forma lenta (McDonald et al. 2001). Este fenómeno ocurre con mayor probabilidad en el suelo que en condiciones de cultivo hidropónico, en el aire, etc. Alexander (1977) anota que se le ha brindado poca atención a las transformaciones REDOX de P, reacción que es catalizada principalmente a través de mecanismos bioquímicos (Mitchell et al. 2004), o sea mediante actividad microbiana (Adams y Conrad 1953). La habilidad de utilizar el fosfito como fuente de P y oxidarlo, parece ser una característica que poseen solo algunos microorganismos como bacterias heterotróficas, hongos y actinomicetes (Alexander 1977).

Aunque hay reportes de otras latitudes, que señalan la limitada capacidad como suplemento nutricional de los fosfitos (Adamowicks et al. 1996, Wells et al. 2000, Landschoot y Cook 2007), los estudios en soluciones nutritivas son escasos (Förster et al. 1998), y en condiciones locales, no existe ningún experimento que evalúe su comportamiento como fertilizante vía raíz o foliar.

Capacidad de llenar los requerimientos de P vía foliar

El P al igual que otros elementos como el N y K, es considerado como macroelemento, aunque las cantidades absorbidas son comparativamente menores a las de estos nutrimentos y más bien comparables a las de S y Mg. Pese a esto, los $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de P absorbidos por la mayoría de cultivos, constituyen una cantidad respetable en términos de absorción total.

Tradicionalmente, se ha hecho énfasis en la alta cantidad de procesos que ocurren en el suelo, y que dificultan, en muchos casos, la disponibilidad del P para la planta. Lo anterior ha influenciado la idea de promover la incorporación de P vía foliar, en forma poco discriminada. Adicionalmente, se sabe que, en términos fisiológicos, el P es un elemento altamente móvil en la planta y que su translocación ocurre principalmente vía floema (Barel y Black 1979b).

Marschner (1995) apunta que desde el punto de vista nutricional y bajo condiciones normales de crecimiento, las tasas de absorción de elementos por las hojas son mucho más bajas que por la raíz. También menciona, al igual que Kannan (1989), que el estado nutricional de la planta incide directamente sobre la tasa de absorción vía foliar. Con lo anterior se puede suponer que es poco probable que los requerimientos de P puedan ser llenados en forma exclusiva por aplicaciones vía foliar. A diferencia de lo apuntado anteriormente, algunos autores han encontrado efectos positivos en rendimiento, debido a aplicaciones de productos sintéticos de P por esta vía (Barel y Black 1979a, 1979b).

El objetivo general de este estudio fue el de evaluar la capacidad que tienen las formas reducidas de P (fosfitos) para suplir las necesidades nutricionales de 3 cultivos bajo las 2 modalidades de absorción: radical y foliar. Para ello se plantearon 2 ensayos con los siguientes objetivos: el primero, consistió en comparar la efectividad relativa del fosfito con respecto al fosfato como fuente de P vía raíz, a través del crecimiento y absorción del elemento por 3 cultivos, en solución nutritiva bajo condiciones de invernadero, y el segundo, comparar el suplemento de P vía foliar proveniente de 4 fuentes comerciales de fosfitos y 2 calidad reactivo (una de fosfitos y la otra de fosfatos) a través del crecimiento y absorción de P por los mismos 3 cultivos en solución nutritiva carente de P, bajo condiciones de invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sistema hidropónico

Se establecieron 2 ensayos en 3 cultivos: lechuga, tomate y banano, creciendo en condiciones de invernadero con fosfatos y fosfitos en solución hidropónica. La homogeneidad de las plantas de almácigo de los 3 cultivos utilizados se puede comprobar en el cuadro 1, en el que se anotan las características iniciales de tamaño, peso, y área foliar de las plantas utilizadas en los 2 ensayos.

Las plántulas fueron colocadas en el sistema hidropónico con una edad aproximada de 20, 49 y 51 días, para lechuga, tomate y banano, respectivamente, considerando que tuvieran un porte adecuado para manejarlas bajo ese sistema.

Se utilizaron baldes plásticos de 5 l con tapa de estereofón y bombeo de aire por medio de compresores individuales (Figura 1a). La concentración y criterios de preparación de la solución nutritiva utilizada se presenta en el cuadro 2, la cual únicamente fue modificada en el caso de los tratamientos sin P, y en el segundo ensayo para Fe, en el que se decidió aplicar el doble.

Cuadro 1. Características iniciales promedio de las plantas de lechuga, tomate y banano utilizadas. La variedad aparece entre comillas.

ENSAYO I	Lechuga "Boston"	Tomate "Hook"	Banano "Gran Enano"
Variables	Prom±IC*	Prom±IC	Prom±IC
Peso fresco foliar (g)	0,843±0,035	3,04±0,152	5,97±0,89
Peso seco foliar (g)	0,042±0,004	0,186±0,024	0,296±0,061
Humedad foliar (%)	95±0,4	94±0,6	95±0,4
Area foliar (cm ²)	23,95±1,64	54,67±3,75	88±10
Razón de área foliar (cm ² /g)	578±29	298±22	303±50
Peso fresco raíz (g)	0,411±0,034	1,038±0,170	1,19±0,26
Peso seco raíz (g)	0,021±0,003	0,046±0,006	0,053±0,016
Humedad de raíz (%)	95±0,5	95±1,2	96±0,4
Raíz/follaje	0,50±0,05	0,248±0,054	0,177±0,034

ENSAYO II	Lechuga I "Americana"	Lechuga II "Americana"	Tomate "Hook"	Banano "Williams"
Variables	Prom±IC	Prom±IC	Prom±IC	Prom±IC
Peso fresco follaje (g)	1,65±0,17	1,010±0,115	1,179±0,083	4,59±0,50
Peso seco follaje (g)	0,076±0,008	0,047±0,006	0,132±0,015	0,198±0,029
Humedad follaje (%)	95±0,2	95±0,4	89±0,7	96±0,2
Peso fresco raíz (g)	0,622±0,058	0,450±0,084	0,586±0,069	1,860±0,352
Peso seco raíz (g)	0,020±0,003	0,021±0,006	0,038±0,005	0,072±0,020
Humedad de raíz (%)	97±0,3	95±0,6	93±0,3	96±0,5
Raíz/follaje	0,26±0,02	0,440±0,078	0,290±0,016	0,356±0,061

*IC=intervalo de confianza, $\alpha=0,05$.

Cuadro 2. Concentración de nutrimentos en la solución nutritiva completa.

mg.l ⁻¹													
N-NH ₄	N-NO ₃	N	P	K	Mg	Ca	S	Mn	Fe	Cu	Zn	B	Mo
11	189	200	60	300	50	100	67	1,14	2,14	0,10	0,23	0,50	0,03

Solución preparada a partir de sales calidad reactivo, con las fuentes comunes utilizadas para trabajar en hidroponía.



Fig. 1. a) Vista general del sistema hidropónico utilizado: baldes plásticos, tapas de estereofón, solución nutritiva, aire suplementario. b) Lechuga en solución nutritiva con fosfato, con fosfito y sin fósforo. c) Síntomas de deficiencia de P presentes en hojas de tomate sin P y con fosfito en la solución nutritiva. d) Brotes de tomate con comportamiento erecto en solución nutritiva con fosfito. e) Apariencia de la raíz de banana “Gran Enano” para los distintos tratamientos de suplemento de P vía raíz.

Tratamientos y diseño experimental

I ENSAYO: Evaluación vía raíz

En este primer ensayo se utilizaron los siguientes tratamientos:

1. Solución nutritiva **sin P (-P)**.
2. Solución nutritiva completa con 60 mg.kg⁻¹ de P suplido como **ácido fosforoso calidad reactivo (fosfitos) (P3)**.
3. Solución nutritiva completa con 60 mg.kg⁻¹, **50% de P suplido como ácido fosfórico y 50% como ácido fosforoso (P3P4)**.
4. Solución nutritiva completa con 60 mg.kg⁻¹ de P suplido como **ácido fosfórico calidad reactivo (fosfatos) (P4)**.

Al utilizar ácido fosfórico (H₃PO₄) y ácido fosforoso (H₃PO₃) para suplir fosfatos y fosfitos, respectivamente, el pH de la solución nutritiva debió ser ajustado con NaOH hasta, aproximadamente, 5,7-5,8, valor que presentó el tratamiento sin P.

Se utilizaron para cada cultivo un total de 8 repeticiones, en donde cada unidad experimental consistió de una maceta con 3 plantas cada una (Figura 1a). Se utilizó un diseño de Bloques Completos al Azar.

II ENSAYO: Evaluación vía foliar

En el segundo ensayo se utilizaron los siguientes tratamientos:

1. Solución nutritiva completa (**P4**)
2. Solución nutritiva sin P (**-P**)
3. Solución nutritiva sin P más fosfatos (ácido fosfórico) vía foliar (**P4f**)
4. Solución nutritiva sin P más Nutriphite (fosfonato de K) vía foliar (**NPf**)
5. Solución nutritiva sin P más Phyto's-K (fosfonato de K) vía foliar (**PKf**)
6. Solución nutritiva sin P más Aliette (fosetil-Al) vía foliar (**Af**)
7. Solución nutritiva sin P más fosfito (ácido fosforoso) vía foliar (**P3f**)

Todos los productos para la aplicación foliar se prepararon inicialmente a partir de una solución madre con una concentración de 4000 mg.kg⁻¹ de P (4000 mg.l⁻¹ o 0,4%), la cual fue modificada seguidamente a 2000 y finalmente a aproximadamente 1000 mg.kg⁻¹ de P, debido a la quema inicial que se provocó en la lechuga I. El objetivo era aportar vía foliar una cantidad semejante o al menos comparable a la aplicada en la solución nutritiva vía raíz, distribuida en un elevado número de aplicaciones. Con 5 aplicaciones de 4 ml.maceta⁻¹ de un producto foliar a 4000 mg.kg⁻¹ de P se suplirían aproximadamente 80 mg de P. Esta cantidad representaría un tercio del P suplido vía raíz por 4 l de solución nutritiva por maceta en los tratamientos con P de la fase I (240 mg.maceta⁻¹ de P, Cuadro 3). Como se verá más adelante, fue imposible alcanzar con aplicaciones foliares la cantidad propuesta.

Otro criterio que se consideró para estimar el suplemento foliar fue la absorción máxima de P que hicieron los cultivos durante el Ensayo I. El banano fue el cultivo que más P absorbió y este valor correspondió en total, a aproximadamente 60 mg.maceta⁻¹ con 3 plantas.

Para la aplicación foliar, se calibró un atomizador manual de manera que se descargaran aproximadamente 4 ml.maceta⁻¹.aplicación⁻¹. Al asperjar 1 ml de una solución de 1000 mg.kg⁻¹ se aplica 1 mg de P. Sumando los mililitros asperjados se estimó la cantidad aplicada. Durante la aplicación se colocaron barreras entre tratamientos, para evitar la contaminación por deriva. Las aplicaciones foliares fueron iniciadas una semana después del transplante de los almácigos a las macetas hidropónicas.

Para este ensayo se utilizaron para cada cultivo un total de 4 repeticiones, en donde cada unidad experimental consistió de una maceta con 3 plantas cada una. Se utilizó un diseño de Bloques Completos al Azar.

Método de determinación de P

La manera usual de determinar P (Henríquez et al. 1998) tiene un fundamento colorimétrico que actúa sobre la forma PO₄⁻² (ortofosfatos).

Cuadro 3. Características de los productos foliares aplicados en el ensayo II.

a) Información suministrada por la etiqueta de los productos comerciales

Producto Comercial (PC)	Dosis Recomendada			Cultivos Registrados	Frecuencia
	Etiqueta	Por litro			
Nutri-Phite	1-3 l.ha ⁻¹ *	5-15	ml.l ⁻¹	Tomate	Cada 10-15 días
	2-5 l.ha ⁻¹ *	10-25	ml.l ⁻¹	Banano	Mensualmente
Phyto's K	150-250 ml.100 l ⁻¹	2	ml.l ⁻¹	Tomate	Tanto como sea necesario
	200-300 ml.100 l ⁻¹	2,5	ml.l ⁻¹	Banano	
Aliette	2,5 kg.ha ⁻¹ en 300 l	8,3	g.l ⁻¹	Lechuga	4-5 aplic por ciclo
	4-5 kg.ha ⁻¹ en 1000 l	4-5	g.l ⁻¹	Otros	2 aplic por ciclo

*se asumen 200 l de agua.ha⁻¹

b) Características de las soluciones utilizadas para las aplicaciones foliares

Nombre	Fórmula	% P ₂ O ₅ en PC	Dosis de PC	pH Inicial	pH Final	mg.l ⁻¹ P*
Fosfato	H ₃ PO ₄	86 p/v	2,2 ml.l ⁻¹	1,0	4,0**	867
Nutri-Phite	0-28-26	39 p/v ¹	5,8 ml.l ⁻¹	6,1	6,2	1133
Phyto's-K	0-30-20	42 p/v ²	5,5 ml.l ⁻¹	4,9	4,9	1100
Fosetil-Al	Al(C ₂ H ₆ PO ₃) ₃	48 p/p	4,8 g.l ⁻¹	3,4	3,5	1067
Fosfito	H ₃ PO ₃	85 p/p	3,1 g.l ⁻¹	1,4	4,9**	1233

* concentración de P determinada en las soluciones de atomización digeridas según el método descrito.

** pH de la solución ajustado con NaOH. ¹ Densidad 1,39 g.ml⁻¹; ² Densidad 1,4 g.ml⁻¹.

Esta metodología utiliza el ácido sulfomolibdico para formar un complejo con las formas fosfóricas presentes, que luego, al combinarse con cloruro estañoso, como solución reductora, genera una coloración azul (producto del Azul de Mo) cuya intensidad es proporcional a la concentración de fosfatos acomplejados, que puede ser medida en el espectrofotómetro de luz.

Las formas fosforosas de P, al estar reducidas, no pueden ser determinadas por este método de colorimetría tradicional, por lo que en las soluciones que contenían fosfitos se procedió, previo a su determinación, a efectuar una oxidación fuerte de la muestra, a través de la digestión con una mezcla de los ácidos nítrico y perclórico (relación

5:1). Esta metodología permitió que las formas reducidas pasaran a fosfatos, y de esta manera se convirtieran en formas determinables por los métodos de rutina (Henríquez et al. 1998).

Como se puede observar en el cuadro 3, el elemento P analizado mediante la digestión oxidativa con mezcla nitroperclórica se encontraba en concentraciones elementales comparables en todas las soluciones asperjadas.

Variables evaluadas

Además de las variables comunes de peso fresco (PF), peso seco (PS) y área foliar, se calculó el índice de crecimiento relativo (ICR)

que permite relativizar, en función del tamaño inicial, el crecimiento manifestado por las plantas en cada uno de los tratamientos. En el caso de lechuga, también se efectuaron mediciones de área foliar, que se expresaron a través de la razón de área foliar ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) (RAF).

Adicionalmente, se analizó el contenido de nutrimentos en el follaje y en la raíz, por los métodos convencionales (Henríquez et al. 1998); estas variables fueron relacionadas con el peso seco y se cuantificó la cantidad de nutrimentos absorbida con especial énfasis en P.

Manejo complementario de los experimentos

Durante el transcurso del primer experimento se efectuaron algunos complementos a la fertilización básica, con el fin de evitar la interferencia de otros factores nutricionales. A la solución nutritiva se le aplicó doble dosis de Fe, un adicional de $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{pote}^{-1}$ de NH_4NO_3 a los 15 días a todos los cultivos, y un 10% más de la concentración de N, K, Ca, Mg, Mn, Cu y Zn, a los 38 días a los cultivos de tomate y banano. Se realizó también 1 aplicación foliar de Nitrato de K ($10 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$), 2 de Quelato de Fe (7,2% de Fe) ($5 \text{ ml} \cdot \text{l}^{-1}$) y una más de Nitrato de Amonio ($0,25\%$) a todo el experimento.

También, en el primer ensayo, en forma preventiva, se aplicó antibiótico (Cloranfenicol) a la solución nutritiva; sin embargo, en comparación con algunos testigos adicionales instalados colateralmente sin producto, no se presentaron diferencias que justificaran su uso en ensayos posteriores. También, para prevenir *Botrytis*, a la instalación del ensayo, se aplicó iprodione (Rovral, $0,5 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$) 3 veces a la lechuga (1 vez por semana) y 1 vez a todo el experimento. A los 45 días, se aplicó benomyl (Benlate) para combatir un ataque de Mildiú Polvoso (*Erysiphe polygoni*) en las hojas bajas del tomate.

En ambos ensayos el nivel de agua de las macetas se procuró mantener constante, de ahí que, semanalmente, cada maceta se rellenó con agua destilada según las necesidades. En general, los tratamientos sin P y con fosfito fueron los que

consumieron menos agua. Entre los 3 cultivos, el tomate fue el que consumió más agua.

En el segundo ensayo, debido a una reacción inicial negativa de las plantas de lechuga a las aplicaciones foliares durante la primera siembra, el material se cosechó a las 5 semanas y se procedió a sembrar nuevamente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

I ENSAYO: Evaluación de fosfatos y fosfitos para suplir la necesidad de P vía raíz

Síntomas Visuales

A los 5 días de instalado el experimento comenzó a presentarse una clorosis fuerte en los ápices y las hojas jóvenes en tomate y lechuga, la cual se asoció con deficiencia de Fe. Se duplicó la dosis de Fe en la solución nutritiva y se efectuaron un par de aplicaciones de Quelato de Fe foliar y el problema desapareció en menos de 7 días. No se espera que esta aplicación haya influido en el comportamiento del P pues las concentraciones de Fe son proporcionalmente bajas en comparación con las de P.

Lechuga: A los 11 días después de la siembra, era posible distinguir fuertes diferencias visuales entre tratamientos. Sin P y en solución con fosfito, el crecimiento fue mucho menor que en las condiciones con fosfato (Figura 1b). A los 21 días las plantas, creciendo en solución con fosfitos, en todas sus repeticiones, mostraban un severo deterioro, que obligó a cosecharlas prematuramente.

Tomate: Al mes, comenzó a notarse un conspicuo color morado en las venas de las hojas que estaban creciendo en soluciones sin P o con fosfito (Figura 1c), característico de la deficiencia de este elemento (Wilcox 1993). Este desarrollo de síntomas de deficiencia de P en plantas tratadas con fosfitos ha sido reportado previamente por Adamowicz et al. (1996) y Förster et al. (1998).

A los 27 días las plantas de todos los tratamientos presentaron flores abiertas, excepto aquellas que estaban en solución con fosfito (P3). En este último tratamiento, las flores no se llegaron a abrir o lo hicieron muy tardíamente y las hojas del brote presentaron una disposición erecta particular (Figura 1d), visiblemente diferente al convencional brote de tomate que tiende más bien a dejar caer sus hojas hacia abajo. Adamowicz et al. (1996), quienes encontraron este mismo síntoma, sugieren que el fosfito puede estar actuando como un inhibidor de la transpiración, ya que el ángulo de la hoja depende de su turgencia.

Banano: De igual manera, las raíces se vieron afectadas por la ausencia de P o por la presencia de fosfitos, condición en la que se presentaron coloraciones moradas en los ápices radicales (Figura 1e).

Peso seco

En la figura 2 se presenta el peso seco final alcanzado por los 3 cultivos al crecer en soluciones nutritivas sin P (-P), con fosfito (P3), con fosfato (P4) y con ambos (P3P4).

Como se puede observar en la Figura 2a, la tendencia general para los 3 cultivos, en follaje y raíz fue similar. Cuando las plantas crecieron en soluciones nutritivas con fosfato (P4 y P3P4) la acumulación de peso seco resultó significativamente mayor, mientras que las plantas que crecieron en soluciones nutritivas con la forma fosforosa de P (fosfitos, P3) mostraron un comportamiento similar al tratamiento sin P.

Esta reducida expresión de crecimiento en el tratamiento P3 permite inferir que el fosfito representó para las plantas una situación muy similar a la condición de carencia del elemento, a

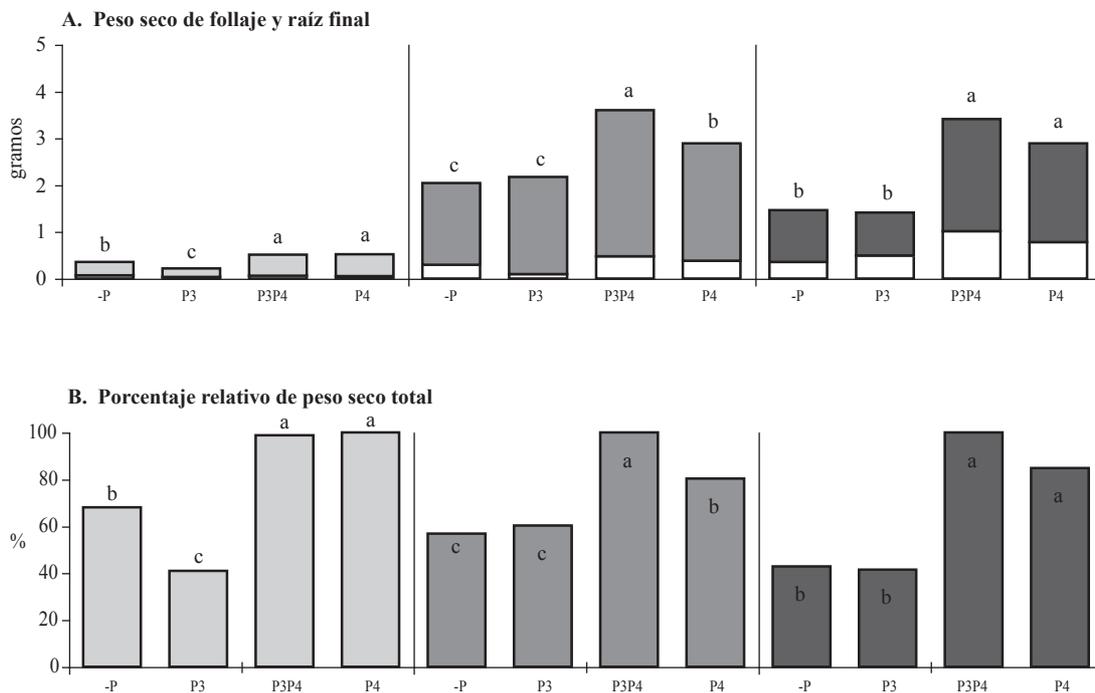


Fig. 2. Peso seco promedio de 3 cultivos en solución nutritiva con distintas fuentes de P. En la sección a) la parte inferior de cada barra corresponde a la raíz y la superior al follaje.

partir de la cual no logró llenar sus necesidades de P adecuadamente.

La baja acumulación de materia seca presentada por la lechuga (comparativamente a la lograda en la segunda fase del ensayo) se debe a que, como se mencionó anteriormente, la cosecha se efectuó prematuramente (a las 3 semanas) dado el severo efecto negativo que comenzó a ejercer la solución de fosfitos sobre este cultivo.

Analizando los resultados en términos porcentuales, en relación al mejor tratamiento para cada cultivo (Figura 2b), se puede visualizar en una forma comparativa y más contundente, el efecto detrimental que el fosfito vía raíz tuvo sobre el peso seco total del tomate, el banano y la lechuga, con respecto a los tratamientos P4 y P3P4. También, se evidencia el efecto sinérgico que produjo la inclusión de ambas formas de P en iguales concentraciones (30 mg.kg⁻¹ de cada una) en la solución nutritiva.

Índice de crecimiento relativo (ICR)

Al expresar el crecimiento de cada tejido en referencia al peso inicial (Figura 3) o ICR, se puede observar, que en el caso de la lechuga, el fosfito vía raíz no sólo no suplió el P que la planta necesitaba, sino que su presencia afectó negativamente tanto a la raíz como al follaje.

En el caso del tomate, el efecto nocivo fue solo sobre la raíz y en el banano sobre el follaje. Esto demuestra que aunque se puede generalizar que el suplemento de P vía raíz con fuentes reducidas podría ser negativo para las plantas, la forma en que ocurre esta repercusión depende de la especie.

Con este análisis también es posible reforzar, en el caso específico del tomate, el efecto sinérgico que la combinación de ambas formas de P tuvo sobre el crecimiento. Förster et al. (1998) han ligado este tipo de comportamientos

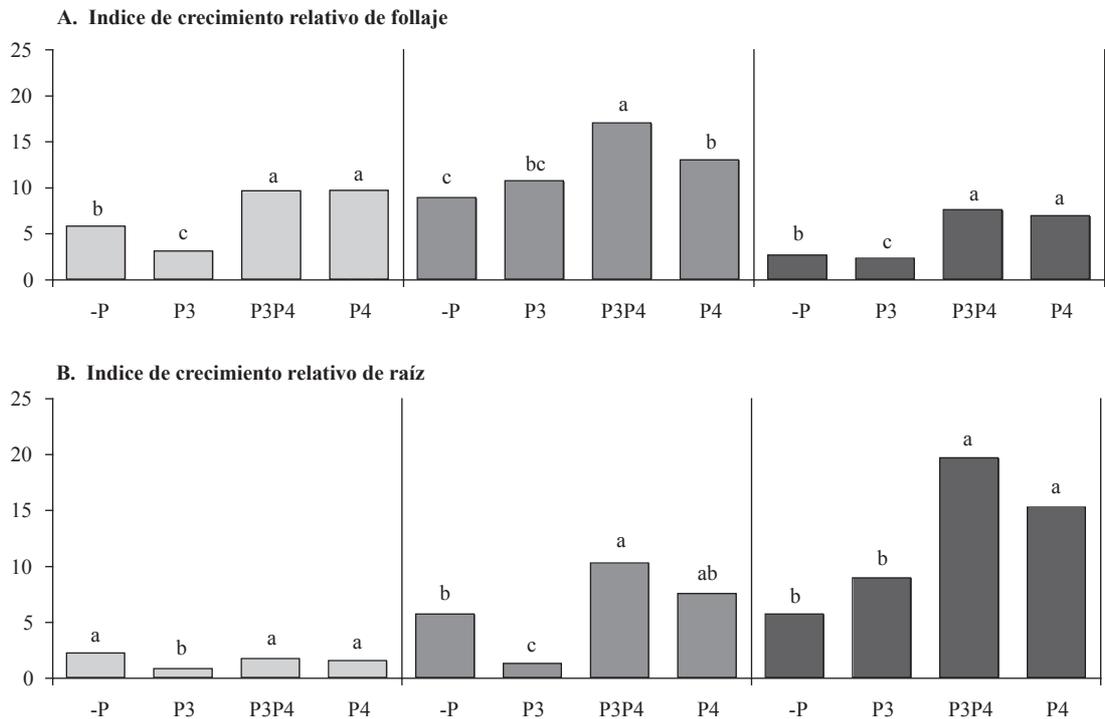


Fig. 3. Índices de crecimiento relativo de 3 cultivos en solución nutritiva con distintas fuentes de P.

al poder fungicida de los fosfitos. El sistema hidropónico no era ascéptico y no se conoce la vida media del antibiótico utilizado, por lo que pudo haber contaminación con patógenos (aunque no se observaron daños evidentes), que pudo haber sido controlada por la forma fosforosa de P, contribuyendo al buen desempeño de este tratamiento mixto.

Área foliar

En términos de área foliar, y con relación a la lechuga, los resultados evidencian un comportamiento similar al presentado por las variables anteriores (Cuadro 4). Vistos como razón de área foliar (RAF) o sea la cantidad de área por cada gramo de peso de los tejidos existentes, las diferencias se establecen aún más claras entre los tratamientos. La RAF con fosfito (P3) en relación con la de fosfato (P4) fue de 58%, sin P correspondió a 74% y con ambos fue de un 86%.

Concentración y absorción de P

En el cuadro 5 se presentan las concentraciones de P en los tejidos y en la figura 4 las cantidades de P que fueron absorbidas por los diferentes órganos de los cultivos durante el ensayo.

Con referencia a la concentración de las plantas iniciales, en los 2 tejidos, el tratamiento sin P mostró valores menores y en cualquiera de los otros tratamientos con fosfito o fosfato, las concentraciones subieron, con excepción del follaje de tomate. También en general, las raíces tendieron a subir más sus concentraciones que el follaje, lo que destaca la gran demanda energética de este órgano. No obstante, el tipo de análisis efectuado no permite diferenciar si el P estaba presente en forma interna o externa a la raíz. Marschner (1995), apunta que bajo condiciones de deficiencia de P, la raíz se convierte en un

Cuadro 4. Comportamiento del área foliar promedio de lechuga evaluadas al cabo de 20 días de permanecer en solución nutritiva con distintas fuentes de P.

Variable	-P		P3		P3P4		P4		Probabilidad
Area foliar (cm ²)	104,24	b	52,93	c	204,30	a	222,02	a	0,0001
Razón de área foliar (cm ² /g)	418,6	c	326,5	d	488,6	b	566,9	a	0,0001

Filas con letras iguales son estadísticamente similares según Duncan 0,05.

Cuadro 5. Concentraciones de P (%) en el follaje y la raíz de lechuga, tomate y banano, al inicio y final del ensayo con diferentes fuentes de P en la solución nutritiva.

Cultivo	Sección	Inicial	-P	P3	P3P4	P4
Lechuga	Follaje	0,56	0,22	0,80	0,73	0,75
	Raíz	0,58	0,25	1,57	1,37	1,16
Tomate	Follaje	1,23	0,25	0,50	0,72	0,63
	Raíz	0,72	0,29	0,68	1,05	0,96
Banano	Follaje	0,56	0,21	0,50	0,61	0,56
	Raíz	0,48	0,16	0,66	0,88	0,46

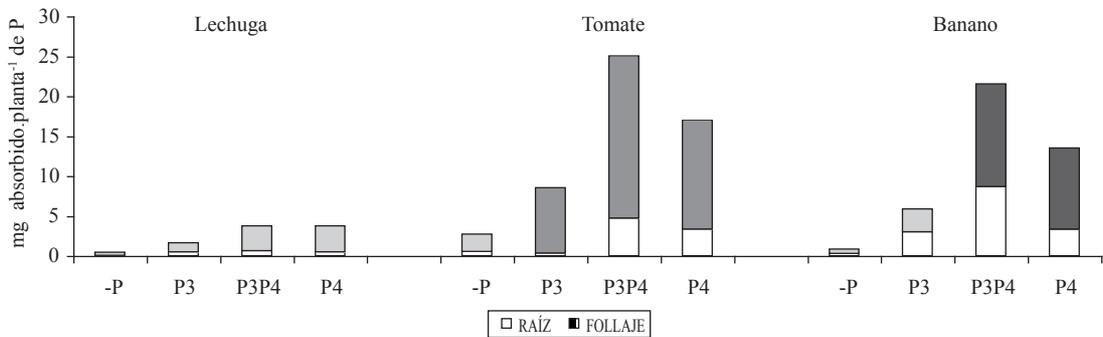


Fig. 4. Absorción de P (mg.planta⁻¹) por el follaje y la raíz durante el período de crecimiento en invernadero en los 3 cultivos.

sumidero de fotosintatos y P de la parte aérea. Un aspecto importante de mencionar es que altos valores de concentración en tejidos de algún elemento, no necesariamente significan una mayor acumulación del elemento en la planta.

Obviamente, en todos los casos (Figura 4), las absorciones que se produjeron en el tratamiento sin P tanto en follaje como en raíz fueron despreciables pues no hubo suplemento alguno de P ni peso seco acumulado. En el follaje de los 3 cultivos, en el caso del fosfito (P3) vía raíz, se puede observar que hubo un ingreso mayor del elemento que en el tratamiento sin P; sin embargo, este siempre fue mucho menor que en los tratamientos con fosfato, correspondiendo a un 36% de la cantidad absorbida por el tratamiento P4 en lechuga, 60% en tomate y 28% en banano. En el caso del tomate, como ya se evidenció en peso seco, la combinación de ambas fuentes mejoró la asimilación de P en una forma estadísticamente significativa (Adamowicks et al. 1996), y en banano, aunque no fue estadísticamente significativa, se mostró una tendencia similar.

En la raíz la situación fue diferente. En primer lugar debe quedar claro que la cantidad de P consumida por este órgano, en las 3 especies, fue sustancialmente menor que lo consumido por el follaje. En el tratamiento que representa la condición normal, o sea con P4, el consumo por la raíz correspondió a un 13, 20 y 26% del total absorbido, para lechuga, tomate y banano,

respectivamente. Con fosfito vía raíz, el tomate no acumuló nada de P, probablemente por el daño de raíces que ya se mencionó, mientras que las raíces de lechuga y banano creciendo en solución con fosfito, acumularon tanto P total como las que crecieron en fosfato, al punto que en el caso del banano incluso el acúmulo en la raíz fue mayor (55%) que en el follaje. Vale la pena recordar que la determinación de P en tejidos vivos corresponde a una medición total, que no permite establecer la forma química (fosfatos o fosfitos) que está presente dentro de los mismos. Estas observaciones sugieren que podría ser que las formas reducidas de P (fosfitos) ingresen a la planta vía raíz, pero que se acumulen allí sin translocarse, y por lo tanto, no necesariamente cumplan funciones nutricionales. En relación a lo anterior, las condiciones de este ensayo no permiten ir más allá de estas especulaciones.

En síntesis, con los resultados obtenidos en el Ensayo I, se demuestra que, el fosfito aplicado como ácido fosforoso calidad reactivo vía raíz a la solución nutritiva a una concentración de 60 mg.kg⁻¹, resulta una forma no utilizable nutricionalmente por parte de los 3 cultivos evaluados, y que más bien les causa daño, produciendo síntomas visuales de deficiencia del elemento (coloraciones, deformaciones particulares, retrasos fisiológicos, etc) diferencial según la especie. Finalmente la combinación de fosfitos y fosfatos, como suplemento de P vía raíz, parece inducir un

efecto sinérgico ya que promovió una mayor absorción total de este elemento por parte de las plantas, especialmente en tomate.

II ENSAYO: Evaluación de 5 fuentes comerciales y técnicas de fosfatos y fosfitos para suplir la necesidad de P vía foliar

Síntomas visuales

En este ensayo, la lechuga I se tuvo que cosechar mucho antes de lo previsto debido a una progresiva quema de follaje causada por las primeras soluciones aplicadas foliarmente (de todos los productos), que resultaron excesivamente concentradas para las condiciones del experimento (4000 mg.kg^{-1}) bajo invernadero. Vale la pena señalar que solamente el Aliette es recomendado para lechuga bajo condiciones de campo.

Lo anterior sugiere la poca tolerancia que tiene la lechuga en particular, a la carencia de P en la solución nutritiva y a un excesivo plan de

aplicaciones foliares. No obstante, los síntomas de quema producto de las primeras aplicaciones foliares concentradas no sólo afectaron a la lechuga; el tomate y el banano también se vieron afectados, especialmente por el tratamiento de fosfato foliar (Figura 5a). Este efecto de quema por parte de formas ortofosfóricas de P vía foliar ha sido ampliamente documentado por Barel y Black (1979a y 1979b), quienes apuntan que tradicionalmente el P no ha sido aplicado foliarmente por 2 razones principales: su buena absorción radical y la carencia de un compuesto que pueda ser aplicado a las hojas en suficiente cantidad para llenar los requisitos de P sin producir daño secundario debido a su aplicación.

En este ensayo, las concentraciones aplicadas como ácido fosfórico calidad reactivo variaron de 0,1 a 0,4% de P. Barel y Black (1979a) encontraron una tolerancia a concentraciones de 0,5% y 0,4% de P (suministrado como ortofosfato) para maíz y soya, respectivamente. Se considera

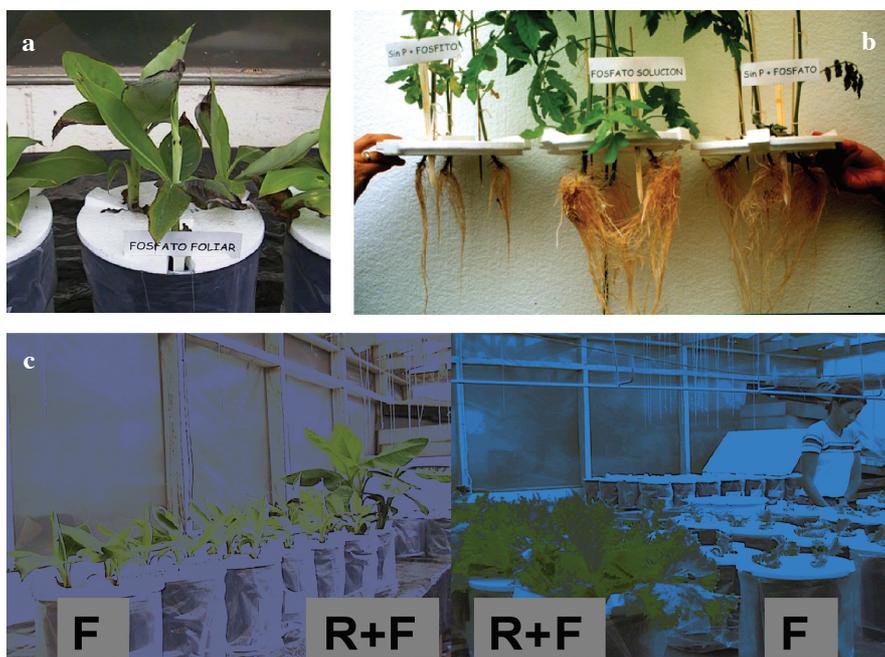


Fig. 5. a) Efecto de quema foliar en banano por la aplicación de ortofosfatos foliar. b) Crecimiento de raíz para los tratamientos con fosfito foliar, fosfato en solución y fosfato. c) Crecimiento comparativo entre la aplicación solo foliar (F) y la aplicación combinada, (radical + foliar) (R+F) de P.

que la quema se debió a que esta solución foliar se preparó a partir de ácido fosfórico calidad reactivo, con pH ajustado con NaOH y no se le agregó ningún tipo de coadyuvante. En el mercado existe una amplia gama de fertilizantes foliares a base de fosfato, debidamente acondicionados que no ocasionan este tipo de problema en aplicaciones de campo.

Las aplicaciones del tratamiento P3 con ácido fosforoso calidad reactivo, también causaron un leve efecto de quema al inicio, cuando se usaron concentraciones elevadas (Lucas et al. 1979).

Los daños mencionados condujeron a la dilución inmediata de las soluciones de aspersión (a 2000 y finalmente a 1000 mg.kg⁻¹) y por ende a la disminución de las cantidades totales a suministrar vía foliar en el experimento. La cantidad de aplicaciones de P realizada, además, se vio limitada por el número de semanas de crecimiento de cada cultivo. Luego de disminuir la concentración y regular el pH las soluciones no mostraron mayores problemas.

Las cantidades aproximadas, en mg.maceta⁻¹ de P de cada uno de los productos que fueron aplicados vía foliar ascendieron a 36 en la lechuga I (4 aplicaciones), 16 en la lechuga II (4 aplicaciones), 28 en el tomate (5 aplicaciones) y 24 en el banano (6 aplicaciones). En general estas fueron cantidades mayores que las recomendaciones de la etiqueta de cualquiera de los productos comerciales (Cuadro 3).

No obstante esta serie de circunstancias que condujeron a disminuir las aplicaciones, se considera que los tratamientos respondieron al objetivo específico de la investigación que era evaluar las posibilidades que tienen estas fuentes foliares de sustituir el suplemento vía raíz.

Ninguno de los productos comerciales a base de fosfitos aplicados foliarmente causaron quemaduras tan severas como el fosfato (ortofosfato); sin embargo, la aplicación semanal de estos productos en ausencia de suplemento de P vía radical ocasionó un deterioro progresivo del aspecto de la biomasa foliar de los cultivos, especialmente en lechuga (Figura 5c).

Dentro de las evaluaciones visuales no-cuantitativas, también se observó que las plantas tratadas con cualquier tipo de fosfitos vía foliar, mostraron un crecimiento de raíz anómalo y de color oscuro (Figura 5b).

Estas apreciaciones concuerdan con lo reportado por Adamowicz et al. (1996), quienes además del color, encontraron que la raíz afectada por fosfitos presentó un crecimiento en forma de esqueleto de pescado, probablemente debido a la inhibición de la elongación de las raíces laterales y posterior formación de pelos radicales, retardo del crecimiento de la raíz pivotante y necrosis general del tejido radical.

En la figura 6 se presenta el peso seco de los 3 cultivos sometidos a aplicaciones foliares con diferentes fuentes de P. Todos los tratamientos en donde se trató de suplementar el P vía foliar o en el que no se aplicó del todo, mostraron un crecimiento muy bajo, con respecto al aplicado vía raíz. Lo anterior reconfirmó la imposibilidad de parte de la planta, de tomar vía foliar toda la cantidad de P requerido para su desarrollo (Marschner 1995).

Con ninguno de los tratamientos se logró alcanzar el 50% del desarrollo que se obtuvo con el suplemento de fosfato (P4) vía raíz.

En un análisis estadístico que excluyó al tratamiento con fosfato vía raíz (P4), entre los 6 tratamientos restantes, solo hubo diferencias estadísticamente significativas en crecimiento, para los cultivos de tomate y lechuga; sin embargo, fueron diferencias con poco sentido biológico, ya que sólo en muy pocos casos las aplicaciones foliares lograron superar al tratamiento sin P. Ni siquiera la aplicación foliar de la forma ortofosfato (P4f), repercutió significativamente. El crecimiento que se produce en un sistema con carencia total del elemento P responde posiblemente a las reservas que traía la plántula de almácigo. O sea, en este experimento, bajo condiciones de ausencia total de suplemento P vía radical, ninguna de las aplicaciones de P vía foliar a través de las fuentes probadas logró aliviar de manera significativa el efecto limitante de la deficiencia de P sobre el crecimiento.

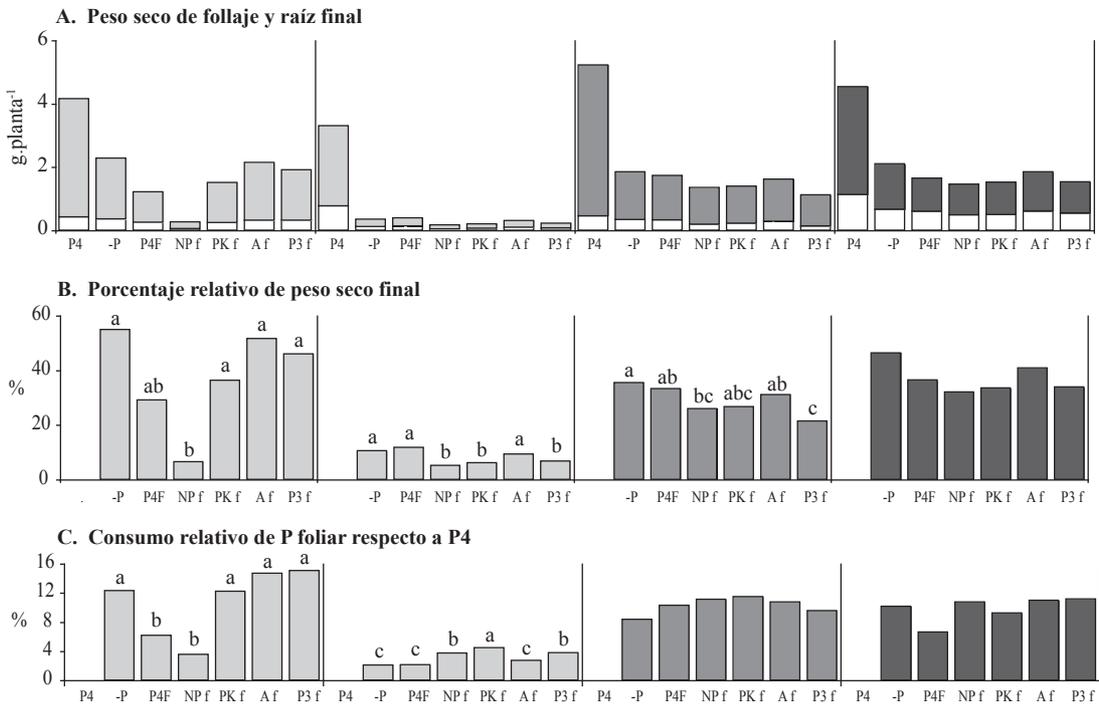


Fig. 6. Peso seco promedio, porcentaje relativo y consumo relativo de P en 3 cultivos en cultivo hidropónico sometidos a aplicaciones foliares de diferentes fuentes de P. En la sección a) La parte interior de cada barra corresponde a la raíz y la superior al follaje. Letras iguales por cultivo son estadísticamente similares según Tukey, en banano no hubo diferencias.

Concentración y absorción de P por el follaje

En el cuadro 6 se presentan las concentraciones de P en el follaje al inicio y al final del crecimiento de los 3 cultivos, después de haber sido sometidos a aplicaciones foliares semanales. Las mayores concentraciones de P se presentaron en las plantas provenientes del almácigo, al inicio del ensayo; luego, conforme comenzó el desarrollo de las plantas y el efecto de los tratamientos, la concentración tendió a disminuir. Esto ocurrió incluso en el tratamiento al que se le aportó fosfato a través de la solución nutritiva (P4), considerado como la condición normal. Todos los otros tratamientos acabaron con la mitad o mucho menos de la concentración de P que presentó esta condición normal (P4). Esta disminución en concentración,

resulta comprensible si se considera el fuerte suplemento de P con que se acostumbra preparar las plántulas de almácigo en su etapa final, previa al transplante, y el efecto normal de dilución que acompaña al crecimiento de las plantas.

Al establecer una comparación con los niveles críticos foliares convencionales, reportados en forma general para estos cultivos (Cuadro 6), se refleja la condición adecuada del tratamiento P4 vía raíz, y la condición deficiente en el resto de los tratamientos con aplicación foliar.

Por las bajas producciones de biomasa, la absorción de nutrientes por el follaje de los 3 cultivos a la cosecha ($\text{mg de P promedio.planta}^{-1}$) fue muy baja. Los tratamientos con fosfato en la solución nutritiva absorbieron en el follaje entre 13 y 26 mg.planta^{-1} de P mientras que de los otros

Cuadro 6. Concentración de P (%) en el follaje de lechuga, tomate y banano, al inicio y final del Ensayo II.

Cultivo	Nivel*	Inicial	Final						
			P4	-P	P4f	NPf	PKf	Af	P3f
Lechuga I	0,4-0,5	0,83	0,71 a	0,18 d	0,15 d	0,44 b	0,28 c	0,22 cd	0,25 c
Lechuga II	0,4-0,5	0,75	0,52	0,12	0,11	0,39	0,41	0,17	0,33
Tomate	0,25	0,99	0,44 a	0,12 c	0,15 bc	0,20 b	0,20 b	0,17 bc	0,20 b
Banano	0,20	0,65	0,53 a	0,12 c	0,11 c	0,20 b	0,16 bc	0,16 bc	0,20 b

* Nivel crítico foliar según Jones B.J. (1991). Plant analysis handbook. Micro-Macro Pub.

Filas con letras iguales son estadísticamente similares según Duncan 0,05.

tratamientos el que más logró absorber llegó a 4 mg.planta⁻¹ de P siendo lo dominante valores entre 0,5 y 2 mg.planta⁻¹ de P.

Si se considera que las plantas venían del almácigo con aproximadamente 1 mg.planta⁻¹ de P en la parte aérea (0,6-0,4 mg las lechugas y 1,3 mg el tomate y el banano, Cuadro 1), prácticamente se puede concluir que en los tratamientos sin P en la solución nutritiva, no hubo absorción significativa de este elemento.

Resultaría de gran interés y una buena continuación de esta investigación, el evaluar el comportamiento de las aplicaciones foliares de este tipo como complementos nutricionales en plantas bien suplidas de P vía raíz.

No obstante, los resultados obtenidos en este experimento, existen experiencias en las que deficiencias de P en viveros de aguacate sembrados en suelo, se han logrado recuperar con aplicaciones semanales al suelo o foliares de fosfitos (Lovatt 1990).

Observaciones como la anterior, que incluyen el suelo (donde probablemente existe al menos un mínimo de fosfato disponible o las condiciones apropiadas para oxidar los fosfitos), unidas a los efectos sinérgicos encontrados en la primera parte de este estudio (tratamiento P3P4 del Ensayo I), y a lo inapropiado que resultó pretender suplir todo el P vía foliar, permiten sugerir que para poder para valorar las potencialidades nutricionales reales que puedan tener las fuentes reducidas de P (fosfitos) tanto aplicadas al suelo,

soluciones hidropónicas o por vía foliar, es indispensable que la investigación futura contemple el efecto combinado de ambas formas de P.

AGRADECIMIENTO

A los Ing. Oscar Arias Madriz y Roberto González en representación de la casa comercial que brindó apoyo para la realización de este trabajo y a la Ing. Helga Blanco Thiele por su colaboración en la ejecución del mismo.

LITERATURA CITADA

- ADAMOWICZ S., FABRE J., HOSTALERY J., ROBIN P. 1996. Study of the activity of phosphorous acid as a phosphorus plant fertilizer. Final Report. Institut National de la Recherche Agronomique. Unité de Recherche en Ecophysiologie et horticulture, France. 9 p.
- ADAMS F., CONRAD J.P. 1953. Transition of phosphite to phosphate in soils. Soil Science 75:361-371.
- ALEXANDER M. 1977. Introduction to soil microbiology. New York, Wiley. p. 347-348.
- BAREL D., BLACK C.A. 1979a. Foliar application of P. I. Screening of various inorganic and organic P compounds. Agron. J. 71:15-24.
- BAREL D., BLACK C.A. 1979b. Foliar application of P. II. Yield responses of corn and soybeans sprayed with various condensed phosphates and P-N compounds in greenhouse and field experiments. Agron. J. 71:21.

- CARSWELL C., GRANT B., THEODOROU M., HARRIS J., NIERE J., PLAXTON W. 1996. The fungicide phosphonate disrupts the phosphate starvation response in *Brassica nigra* seedlings. *Plant Physiol.* 110:105-110.
- FÖRSTER H., ADASKAVEG K., HIM H., STANGHELLINI E. 1998. Effect of phosphite on tomato and pepper plants and on susceptibility of pepper to *Phytophthora* root and crown in hydroponic culture. *Plant Disease* 82(10):1165-1170.
- HENRÍQUEZ C., BERTSCH F., SALAS R. 1998. Fertilidad de suelos: Manual de laboratorio-. San José, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 2ª reimpresión. 64 p.
- KANNAN S. 1989. Foliar absorption and transport of inorganic nutrients. *Critical Reviews Sciences* (4):341-375.
- LANDSCHOOT P., COOK J. 2007. Understanding the phosphonate products. Department of Crop and Soil Sciences, Cooperative Extension. Penn. State University.
- LOVATT C.J. 1990. A definitive test to determine whether phosphite fertilization can replace phosphate fertilization to supply P in the metabolism of "Hass" on "Duke 7". *Calif. Avocado Soc. Yearbook* 74:61-64.
- LOVATT C.J., MIKKELSEN RL. 2006. Phosphite fertilizers: What are they? Can you use them? What can they do? *Better Crops* 90(4):11-13.
- LUCAS R.E., WARNCKE D.D., THORPE V.A. 1979. Phosphite injury to corn. *Agronomy Journal* 71:1063-1065.
- MACINTIRE W.H., WINTERBERG S.H., HARDIN L.J., STERGES A.J., CLEMENTS L.B. 1950. Fertilizer evaluation of certain phosphorus and phosphoric materials by means of pot cultures. *Jour. Amer. Soci. Agron.* 42:543-549.
- MANSOUR N.S. 1995. Effect of Nutri-phite P foliar fertilizer on onion and broccoli. *Vegetable Research at NWRC.* <http://osu.orst.edu>.
- MARSCHNER H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2 ed. Academic. 889 p.
- MCDONALD A.E., GRANT B.R., PLAXTON W.C. 2001. Phosphite: Its relevance in agriculture and influence on the plant phosphate starvation response. *Recent Research Developments in Plant Physiology* 2:49-56.
- MITCHELL C., ADAMS J., DUFFIELD R., HARRIS G. 2004. Phosphites as fertilizer. *Agronomy Series Timely Information S-04-04.* Dept of Agronomy & Soils, Auburn University, Alabama.
- OROVIC V., SYVERTSEN J.P., BRIGHT D., VAN CLIEF D.L., GRAHAM J.H. 2008. Citrus seedling growth and susceptibility to root rot as affected by phosphate and phosphite. *Journal of Plant Nutrition* 31(4):774-787.
- OUIMETTE D., COFFEY M. 1989. Phosphonate levels in avocado (*Persea americana*) seedlings and soils following treatment with Fosethyl Al or potassium phosphonate. *Plant Disease* (73):212-215.
- SMILLIE R., GRANT B.R., GUEST D. 1989. The mode of action of phosphite: evidence for both direct and indirect modes of action on three *Phytophthora* spp. in plants. *Phytopathology* 79(9):921-926.
- WELLS K.L., DOLLARHIDE J.E., MUNDELL R.E. 2000. Effect of phosphite phosphorus on alfalfa growth. *Comm. Soil Science and Plant Nutrition* 31(15-16):2707-2715.

