



Terra Latinoamericana

E-ISSN: 2395-8030

terra@correo.chapingo.mx

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo,  
A.C.  
México

Aguilar-Acuña, José Luis; López-Morgado, Rosalío; Núñez-Escobar, Roberto; Khalil Gardezi, Abdul  
Encalado y fertilización fosfatada en el cultivo de papa en un Andosol de la Sierra Veracruzana

Terra Latinoamericana, vol. 21, núm. 3, julio-septiembre, 2003, pp. 417-426

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.

Chapingo, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57321313>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# ENCALADO Y FERTILIZACIÓN FOSFATADA EN EL CULTIVO DE PAPA EN UN ANDOSOL DE LA SIERRA VERACRUZANA

## Liming and Phosphate Fertilization on Potato in an Andosol of the Sierra Veracruzana

José Luis Aguilar-Acuña<sup>1</sup>, Rosalío López-Morgado<sup>2</sup>, Roberto Núñez-Escobar<sup>3‡</sup> y Abdul Khalil Gardezi<sup>3</sup>

### RESUMEN

En el Distrito de Desarrollo Rural 004 "Coatepec", enclavado en la sierra veracruzana, 62% de los suelos son Andosoles, con una superficie de 230 759 ha. Estos suelos son ácidos, fijadores de fósforo, con porcentajes de saturación de aluminio de leves a moderados. Por lo anterior, se condujo un experimento durante dos años con el objetivo de estudiar el efecto del encalado, de las dosis y de las fuentes de fertilizante fosfatado, sobre el rendimiento de dos variedades de papa en un Andosol de la sierra veracruzana. Los factores de estudio fueron: 1) variedades de papa (Tollocan y Mexiquense, de cutícula blanca y roja, respectivamente), tolerantes al tizón tardío; 2) dosis de fósforo (0, 200 y 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>); 3) fuentes de fertilizante fosfatado (superfosfato de calcio simple, SS; superfosfato de calcio triple, ST; y roca fosfórica de Baja California, RF); 4) dosis de CaCO<sub>3</sub> (0, 2 y 4 t ha<sup>-1</sup>) y 5) años (1991 y 1992). Los resultados indican que durante el año 1991, el rendimiento promedio, sobre variedades de papa y encalado, respondió hasta 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> con las fuentes SS y ST, con SS el rendimiento fue estadísticamente mayor que con ST, con 13.89 y 10.04 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. En 1992, el rendimiento de tubérculo no respondió a los insumos ensayados, debido a la escasa humedad del suelo. La aplicación de RF no tuvo efecto en el rendimiento de tubérculo durante los dos años de estudio. En promedio sobre años y encalado, la variedad Tollocan rindió más que

la variedad Mexiquense con incrementos consistentes de rendimiento hasta la aplicación de 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como SS. La eficiencia agronómica relativa de las fuentes de fósforo siguió el orden: SS > ST > RF. El rendimiento promedio, sobre años y variedades de papa, respondió a dosis de CaCO<sub>3</sub> y a dosis y fuentes de fósforo. El análisis económico reveló que el máximo ingreso neto se asoció con el tratamiento óptimo económico con capital ilimitado (TOECI) de 4 t ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub> + 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como SS, con un rendimiento máximo económico de 9.42 t ha<sup>-1</sup>, y la mayor tasa de retorno al capital variable (TRCV), de 11.82, se asoció con el tratamiento óptimo económico con capital limitado (TOECL), de 200 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como SS y sin cal.

**Palabras clave:** *Solanum tuberosum*, fósforo, fertilizantes fosfóricos, roca fosfórica, suelos ácidos, suelos volcánicos.

### SUMMARY

In the Rural Development District 004 "Coatepec", located in the Sierra Veracruzana, 62% of the soils are Andosols with a area of 230 759 ha. Andosols are acid, phosphorus fixers, with percentages of aluminum saturation from light to moderate. For this reason, a two-year experiment was carried out with the objective of studying the effect of liming, rates and sources of phosphate fertilizer on the yield of two potato varieties in an Andosol of the Sierra Veracruzana. The factors and levels under study were: 1) potato cultivars (Tollocan and Mexiquense of white and red cuticle) tolerant to late blight; 2) phosphorus rates (0, 200, and 400 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>); 3) phosphate fertilizer sources (simple calcium superphosphate, SS; triple calcium superphosphate, ST; and phosphate rock from Baja California, RF); 4) CaCO<sub>3</sub> rates (0, 2 and 4 t ha<sup>-1</sup>); and 5) years (1991 and 1992). The results indicate that during 1991 the average yield, over potato varieties and liming, had a response of up to 400 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> with both sources SS and ST, but yield with SS was

<sup>1</sup> Campo Experimental Bajío, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apartado Postal 112, 38010 Celaya, Guanajuato, México. (jlaguilar1@starmedia.com)

<sup>2</sup> Campo Experimental Auxiliar Xalapa, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Apartado Postal 540, 91000 Xalapa, Ver.

<sup>3</sup> Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, México. <sup>‡</sup> Autor responsable.

statistically higher, with 13.89 and 10.04 t ha<sup>-1</sup>, respectively. In 1992, the tuber yield did not respond to the assayed inputs, due to severe soil moisture deficiency. The application of RF did not show any effect on the tuber yield during the two years of study. On the average over years and liming, cv. Tollocan yielded more than cv. Mexiquense with consistent yield increments up to 400 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> as SS. The relative agronomic efficiency of the phosphorus sources followed the order: SS > ST > RF. The yield average, over years and potato cultivars, responded to CaCO<sub>3</sub> rates and to phosphorus rates and sources. The economic analysis revealed that the maximum net profit was associated with the optimum economic treatment for unlimited capital, which consisted of 4 t ha<sup>-1</sup> CaCO<sub>3</sub> + 400 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> as SS with maximum economic yield of 9.42 t ha<sup>-1</sup>, and the maximum return rate (11.82) was associated with the optimum economic treatment for limited capital, 200 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> as SS and without lime.

**Index words:** *Solanum tuberosum*, *phosphorus*, *phosphate fertilizers*, *rock phosphate*, *acid soils*, *volcanic soils*.

## INTRODUCCIÓN

En México, los suelos ácidos ocupan una superficie de 13 128 300 ha, de las cuales los Andosoles ocupan 8373 000 ha (Ortiz, 1987), distribuidas a lo largo del Eje Neovolcánico, desde Los Tuxtlas, Veracruz, en el Golfo de México, hasta Colima y Nayarit, en el Pacífico. En el área de influencia del Distrito de Desarrollo Rural (DDR) 004 de Coatepec, estado de Veracruz, 62% de los suelos corresponde a Andosoles, con una superficie de 230 759 ha (FAO/UNESCO/ISRIC, 1988).

Los Andosoles, además de ser ácidos por naturaleza, tienen grandes cantidades de alófono y aluminio, los cuales tienen la propiedad de fijar el fósforo y reducir su disponibilidad para que las raíces de las plantas puedan absorberlo. Okajima (1980) recomendó la aplicación inicial al suelo de altas dosis de fertilizante fosfatado (2000 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato) para sobreponer el alto poder de fijación y permitir un adecuado suministro de fósforo. Por otro lado, la aplicación anual de dosis altas de fósforo permite pensar en la posibilidad de saturar la demanda de fijación de fósforo y esperar efectos residuales que benefician a cultivos posteriores (Espinosa, 1991). Sin embargo, en Andosoles, la fijación del P ocurre en las

superficies activas del alófono, óxidos de Fe y Al, y complejos de Al-humus. Esto explicaría la tendencia de fijar apreciables cantidades de fósforo en Andosoles con alto contenido de materia orgánica.

En general, los suelos ácidos contienen alto porcentaje de saturación con aluminio, lo cual reduce la disponibilidad de fósforo para las plantas (Núñez, 1985). El excesivo contenido de Al intercambiable en el suelo, que provoca fitotoxicidad, puede disminuirse mediante la aplicación de cal agrícola o con cantidades masivas de fertilizante fosfatado, como la roca fosfórica (RF), que actúan como mejoradores de suelos (Okajima, 1980).

En México, la roca fosfórica de Baja California es un producto natural que contiene uno o más minerales de fosfato de calcio, con una concentración de 30.4% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> después de concentrada por flotación, aceptable para su aprovechamiento (Gutiérrez, 1991), su reactividad fluctúa entre 10.8 y 15.9% de solubilidad absoluta en citrato (Adán *et al.*, 1980), y posee una eficiencia agronómica relativa media de 60%, lo cual la hace económicamente competitiva, ya que su precio es de 30 US dólares t<sup>-1</sup> (De Gracia *et al.*, 1996). Estas características permiten que se use como fertilizante en aplicación directa a suelos con pH ≤ 6.0 (Núñez y Gavi, 1991). Por otro lado, el cultivo de papa absorbe una relativa alta proporción de fósforo (Vos y Groenwold, 1986) y, en Andosoles, la variedad de papa Tollocan rindió 16.9 t ha<sup>-1</sup> con 200 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato de calcio triple (ST), sin obtener rendimientos decrecientes (Aguilar *et al.*, 2000). Esto podría ser debido a que el P proveniente del fertilizante hidrosoluble como el ST es rápidamente fijado al suelo y, en este caso, la RF, por ser prácticamente insoluble en agua, libera el P lentamente por la acidez del suelo, abasteciendo al cultivo durante el ciclo (Zapata *et al.*, 1996), lo que podría ser una fuente barata de P para el cultivo de papa en Andosoles.

La aplicación de cal es uno de los tratamientos químicos básicos usados para inactivar el Al intercambiable (Aguilar y López, 1992; Castellanos *et al.*, 2000), debido a que resulta más económico que la aplicación de altas dosis de fertilizante fosfórico; sin embargo, en la práctica ambos se complementan (Okajima, 1980).

En suelos ácidos con pH menores que 5.5, se necesitaría aplicar altas cantidades de fertilizantes para lograr rendimientos satisfactorios. Urquiaga y Boddey (1996) reportaron que papa y maíz respondieron significativamente a la aplicación de

2 t ha<sup>-1</sup> de cal; en este experimento el encalado pudo haber mejorado la disponibilidad de P en el suelo, ya que tuvo una gran respuesta a la aplicación de hasta 70 kg ha<sup>-1</sup> de P. El Centro Internacional de la Papa (1984) reportó un estudio de encalado con CaCO<sub>3</sub> en un Andosol de Colombia, con 80% de saturación con Al, muy rico en materia orgánica, pobre en P, mediano en K (en dicho estudio no indicaron los valores) y con pH de 4.1. Se utilizó el cultivo de papa como planta indicadora. Las dosis de CaCO<sub>3</sub> estudiadas fueron 0, 4 y 8 t ha<sup>-1</sup> con rendimientos de tubérculo de papa de 7.7, 18.4 y 22.4 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Los resultados que obtuvieron Aguilar y López (1992) con maíz en Andosoles, en la región de Naolinco, Ver., indican que el encalado no incrementó el pH, pero sí disminuyó el porcentaje de saturación con Al, además que se incrementó el contenido de Ca en el suelo y el rendimiento del maíz significativamente, en este caso la cal actuó como un suministrador de Ca como nutrimento. La respuesta al encalado no sólo depende del grado de neutralización del Al intercambiable, o de elevar el pH, sino también de la interacción con otros parámetros del suelo, como la disponibilidad y el balance de nutrimentos (Smith y Cravo, 1990). Por esta razón, es usual tener respuesta positiva de algunos cultivos, aun cuando el pH del suelo no siempre se incrementa con el encalado (Aguilar y López, 1992; Urquiaga y Boddey, 1996).

Moorehead *et al.* (1998) condujeron dos sitios experimentales. El sitio A tuvo un pH de 6.0 a 6.2 y 171 mg kg<sup>-1</sup> P (Mehlich III). El sitio B con pH de 5.5 a 5.7 y 138 mg kg<sup>-1</sup> P. Los rangos de P fueron de medios a altos. En cada sitio, se aplicaron 0, 73, 269 y 560 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, sin y con encalado (2240 kg ha<sup>-1</sup>) en dos variedades de papa (Russet Burbank, de ciclo largo, y Shepody, de ciclo corto). Todo el fertilizante se aplicó en banda a la siembra. La fuente DAP se aplicó con 73 y 269 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, y se usó una mezcla de DAP y ST para la dosis de 560 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Se aplicaron 168 kg ha<sup>-1</sup> N y 269 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O.

La variedad Russet Burbank respondió más al encalado y a la aplicación de P que la variedad Shepody en ambos sitios. La aplicación de cal aumentó la respuesta a P para Russet Burbank en todas las dosis de P aplicadas. Los tubérculos de Shepody tuvieron valores más altos de P que Russet Burbank, 0.27% vs 0.22%, pero valores más bajos de Ca, 164 mg kg<sup>-1</sup> vs 222 mg kg<sup>-1</sup>. La aplicación de cal no alteró los valores de Ca en el Sitio B con pH más bajo, pero incrementó Ca por 42 mg kg<sup>-1</sup> en el Sitio A

con pH más alto. Se confirmaron los altos requerimientos de P de Russet Burbank. La menor respuesta de Shepody indicó que las necesidades de P dependieron de la variedad de papa.

El objetivo de la presente investigación fue estudiar el efecto del CaCO<sub>3</sub>, así como de las dosis y de las fuentes de fertilizante fosfórico en el rendimiento del tubérculo de papa en un Andosol de la Sierra Veracruzana.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En la región de Naolinco, Veracruz, la cual forma parte del DDR 004 "Coatepec", se estableció un experimento en un Andosol húmico, en el Sistema Terrestre NAO, descrito por Aguilar y Ortiz (1987), en los terrenos de un productor cooperante, en el municipio de Miahuatlán, Veracruz, a una altitud de 1680 m y coordenadas geográficas 96° 50' O y 19° 40' N.

El Cuadro 1 contiene las características físicas y químicas del Andosol al inicio del experimento. Aguilar y López (1992) describieron la caracterización física y química de la cal agrícola. La prueba sobre requerimiento de cal no se realizó en laboratorio, sino que se procedió a hacerla directamente en campo con aplicación de dosis crecientes de cal comercial en el agrosistema en estudio y para el cultivo específico de papa.

### Factores y Niveles de Estudio

Los factores que se ensayaron fueron: 1) variedades de papa (Tollocan y Mexiquense); 2) dosis de fósforo (0, 200 y 400 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, equivalentes a 88 y 176 kg ha<sup>-1</sup> P); 3) fuentes de fósforo (superfosfato de calcio simple, SS; superfosfato de calcio triple, ST; y roca fosfórica de Baja California, RF); 4) dosis de cal (0, 2 y 4 t ha<sup>-1</sup> CaCO<sub>3</sub>) y 5) años, se ensayaron en el mismo sitio dos ciclos del cultivo durante 1991 y 1992. La RF tenía una concentración de 30.4% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, con una solubilidad absoluta en citrato de 10.8 a 15.9%.

### Diseño de Tratamientos y Diseño Experimental

El diseño de tratamientos fue un factorial en un arreglo de parcelas subdivididas; como parcela grande se utilizó al factor años; la subparcela consideró las

**Cuadro 1. Análisis físico y químico realizados en el Andosol al inicio del experimento.**

Determinación y método	Resultado	Interpretación	Fuente
Textura; (Bouyoucos)	63.4% arena y 6.8% arcilla	Migajón arenoso	Castellanos <i>et al.</i> (2000)
pH en agua (1:2); (Potenciómetro)	5.3	Moderadamente ácido	Castellanos <i>et al.</i> (2000)
pH con NaF 1N; (Potenciómetro)	10.88	Cantidades moderadas a apreciables de alofano	Guerrero y Pabón (1984)
M. O. (%); (Walkley y Black)	13.3	Alto	Fassbender y Bornemiza (1987)
N total (%); (Kjeldahl)	0.571	Alto	Vázquez (1996)
P (mg kg <sup>-1</sup> ); (Bray I)	0.62	Muy bajo	Vázquez (1996)
K (mg kg <sup>-1</sup> ); (Acetato de amonio 1N pH 7)	492	Moderadamente alto	Vázquez (1996)
Ca (mg kg <sup>-1</sup> ); (Acetato de amonio 1N pH 7)	150	Muy bajo	Vázquez (1996)
Mg (mg kg <sup>-1</sup> ); (Acetato de amonio 1N pH 7)	12	Muy bajo	Vázquez (1996)
Mn (mg kg <sup>-1</sup> ); (HCl 0.1N)	7.7	Moderadamente bajo	Vázquez (1996)
Al intercambiable (me 100 g <sup>-1</sup> ); (Acetato de amonio 1N pH 4.8)	0.67	Mediano	Landon (1991)
Saturación de aluminio (%)	12.92	Mediano	Landon (1991)

tres dosis de cal agrícola, y la subsubparcela correspondió al factorial 2 x 3 x 3 para los factores variedad, dosis y fuentes de fósforo. Las unidades experimentales se distribuyeron en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. Las unidades experimentales constaron de cuatro surcos de 0.8 m de separación y 8 m de largo. Se consideró como parcela útil los dos surcos centrales de cada unidad experimental.

El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) generó las variedades de papa Mexiquense y Tollocan para las condiciones serranas y de temporal del estado de México. Estas variedades toleran el tizón tardío (*Phytophthora infestans*) y son de ciclo intermedio (120 a 130 días). La variedad Mexiquense tiene la cutícula roja y la variedad Tollocan cutícula blanca. Se evaluó el rendimiento total de tubérculo fresco, expresado en t ha<sup>-1</sup>.

### Análisis Económico y Eficiencia Agronómica Relativa

Para evaluar económicamente las dosis y fuentes de fósforo y dosis de cal, se utilizó el procedimiento discreto para capital ilimitado y limitado, descrito por Volke (1982). El procedimiento para capital ilimitado maximiza la utilidad por unidad de superficie, siempre y cuando se optimice el uso de insumos de la producción y, por lo tanto, puede ser apropiado para la agricultura comercial y empresarial. El procedimiento para capital limitado optimiza el uso de insumos y maximiza la tasa de retorno al capital variable invertido en la producción con la restricción de un

capital limitado determinado para invertir en los insumos, propio para agricultura de subsistencia.

Para el análisis económico, se consideraron los siguientes precios en pesos mexicanos: \$ 0.35 kg<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub>, \$ 0.99 kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como RF, \$4.13 kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como ST, \$5.10 kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como SS y \$4.00 kg<sup>-1</sup> de tubérculo de papa.

La eficiencia agronómica relativa (EAR) de RF y ST con respecto a SS se obtuvo mediante el procedimiento descrito por Engelstad *et al.*, citados por De Gracia *et al.* (1996):

$$EAR_{RF} = [(Rend\ RF - Rend\ T) / (Rend\ SS - Rend\ T)] \times 100$$

$$EAR_{ST} = [(Rend\ ST - Rend\ T) / (Rend\ SS - Rend\ T)] \times 100$$

Donde: Rend RF, Rend ST, Rend SS, y Rend T = rendimiento del tubérculo fresco en tratamientos fertilizados con roca fosfórica, superfosfato de calcio triple, superfosfato de calcio simple y testigo sin fósforo, respectivamente.

### Conducción del Experimento

La cal se aplicó al voleo por única vez, el 5 de diciembre de 1990 y se incorporó al suelo mediante un barbecho y dos pasos de cruz a una profundidad de 15 a 25 cm. Al año siguiente ya no se volvió a aplicar cal al suelo. La preparación del suelo se efectuó con tiro de caballos y arado egipcio de madera con punta metálica. No se hicieron análisis de suelos posteriores a la aplicación de cal.

El 25 de enero de 1991 y el 27 de enero de 1992, se llevó a cabo la siembra de papa en cada ciclo; se

utilizaron 2 t ha<sup>-1</sup> de tubérculo-semilla procedentes de Toluca, estado de México. En 1991, se depositó un tubérculo cada 50 cm entre matas y 80 cm entre surcos. A un lado de cada tubérculo y en el fondo del surco, se aplicó todo el fertilizante según la dosis y fuente de fertilización fosfórica. Al siguiente año y en el mismo mes, se volvió a sembrar y a aplicar las dosis y fuentes de fósforo, en la misma unidad experimental.

Al mes de establecido el cultivo de papa, se le dio la primera labor o limpia, al día siguiente se sembró maíz entre las hileras de papa, y a 60 y 80 días se aterró o aporcó el cultivo de papa.

En la primera semana de mayo, se cortó el follaje y, a fines de mayo en cada año de estudio, se cosechó el tubérculo, quedando sólo el cultivo de maíz, el cual no se evaluó en este trabajo. Las dosis de nitrógeno y potasio aplicadas fueron 80 kg ha<sup>-1</sup> de N y K<sub>2</sub>O,

respectivamente, en forma de urea y cloruro de potasio, según resultados de Aguilar *et al.* (2000).

No se aplicaron fungicidas, ni insecticidas, ya que las variedades de papa toleran el tizón tardío, y no se presentaron plagas en el cultivo.

El 28 de febrero de 1991, se presentó una helada que afectó ligeramente al follaje del cultivo; en cambio, en abril de 1991 y 1992, la papa sufrió por sequía durante el proceso de tuberización (equivalente al llenado del grano en cereales); esto redujo drásticamente el rendimiento, sobre todo en 1992, ya que la sequía se prolongó por 20 días, mientras que en 1991 duró ocho días.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 2, se presenta el análisis de varianza, en el cual se muestran diferencias significativas para

**Cuadro 2. Análisis de varianza del rendimiento de tubérculo de las variedades de papa, Tollocan y Mexiquense en un arreglo de parcelas subdivididas.**

Fuente de variación	gl	SC	CM	Fc	Pr > F
<b>Años (A)</b>	1	1252.65	1252.65	371.00	<b>0.0001</b>
Repeticiones (A) = Error a	4	13.51	3.38		
Cal (C)	2	25.20	12.60	1.20	0.3504
A x C	2	13.47	6.74	0.64	0.5518
Repeticiones (A x C) = Error b	8	84.07	10.51		
Variedad (V)	1	1.37	1.37	0.75	0.3872
<b>Dosis de fósforo (P)</b>	2	754.64	377.32	206.42	<b>0.0001</b>
V x P	2	2.08	1.04	0.57	0.5666
<b>Fuentes de fósforo (F)</b>	2	746.54	373.27	204.20	<b>0.0001</b>
V x F	2	10.30	5.15	2.82	0.0621
<b>P x F</b>	4	332.13	83.03	45.42	<b>0.0001</b>
<b>V x P x F</b>	4	19.15	4.79	2.62	<b>0.0362</b>
<b>A x V</b>	1	34.03	34.03	18.62	<b>0.0001</b>
<b>A x P</b>	2	477.10	238.55	130.50	<b>0.0001</b>
<b>A x V x P</b>	2	12.86	6.43	3.52	<b>0.0315</b>
<b>A x P x F</b>	4	240.92	60.23	32.95	<b>0.0001</b>
A x V x P x F	4	4.08	1.01	0.56	0.6937
C x V	2	9.69	4.84	2.65	0.0731
C x P	4	6.38	1.59	0.87	0.4813
C x V x P	4	16.51	4.13	2.26	0.0642
C x F	4	14.76	3.69	2.02	0.0931
C x V x F	4	12.97	3.24	1.77	0.1356
<b>C x P x F</b>	8	35.61	4.45	2.44	<b>0.0155</b>
C x V x P x F	8	20.27	2.53	1.39	0.2044
A x C x V	2	0.85	0.42	0.23	0.7937
A x C x P	4	8.73	2.18	1.19	0.3143
A x C x V x P	4	10.79	2.70	1.47	0.2111
A x C x F	4	10.97	2.74	1.50	0.2033
A x C x V x F	4	11.32	2.83	1.55	0.1898
A x C x P x F	8	22.23	2.78	1.52	0.1520
A x C x V x P x F	8	12.94	1.62	0.88	0.5301
Error c	204	372.90	1.83		
Total corregido	323	5107.74			

CV = 31.3%.

años (A), dosis de fósforo (P), fuentes de fósforo (F), y para las interacciones: (P x F), (V x P x F), (A x V), (A x P), (A x V x P), (A x P x F), y (C x P x F). A pesar de contar con sólo tres repeticiones, los efectos sobresalientes son tan claros y consistentes, que lograron significancia estadística. Por otra parte, el hecho de trabajar con un factorial aumentó la precisión en la significancia de las interacciones.

Por el alto número de interacciones significativas, se discutirán únicamente las más importantes: (A x V), (A x P x F), (C x P x F) y (V x P x F).

En 1991, el rendimiento máximo obtenido de tubérculos fue 16.87 t ha<sup>-1</sup> cuando se utilizaron 2 t ha<sup>-1</sup> cal, la variedad Tollocan y 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como SS. En 1992, el máximo rendimiento fue 4.92 t ha<sup>-1</sup> cuando se utilizaron 4 t ha<sup>-1</sup> de cal, la variedad Mexiquense, 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como ST (datos no mostrados). La diferencia en el rendimiento entre años se explica por el efecto de la sequía.

En 1991, con ocho días de sequía y 256 mm de precipitación registrada, no hubo diferencia en el rendimiento entre variedades; sin embargo, en 1992, con 127 mm de precipitación y con 20 días de sequía durante la etapa de tuberización, el rendimiento de la variedad Tollocan fue 28% menor con respecto al de la variedad Mexiquense (Cuadro 3).

Se tuvieron rendimientos crecientes del tubérculo de papa con la aplicación de dosis crecientes de fósforo (Cuadro 4). Entre las fuentes de fósforo sobresale la aplicación de SS, sobre ST y RF; estos resultados son similares a los obtenidos por Shanmugasundaram y Nanjan (1992), ya que el fertilizante soluble y finamente molido tiene mayor superficie de contacto para que la baja densidad radical del cultivo de papa (Vos y Groenwold, 1986) tenga mayor acceso al fósforo (Nuñez y Gavi, 1991).

En 1991, año con sequía de leve a moderada, el rendimiento del tubérculo de papa (promedio de las variedades Tollocan y Mexiquense) respondió

**Cuadro 3. Rendimiento del tubérculo de dos variedades de papa en dos años de estudio (promedio de tres dosis y tres fuentes de P).**

Año	Días con sequía	Precipitación pluvial mm	Rendimiento de papa por variedad	
			Mexiquense	Tollocan
			----- t ha <sup>-1</sup> -----	
1991	8	256	6.03 a	6.55 a
1992	20	127	2.75 b	1.97 c

Cifras con la misma letra en hileras o columnas son estadísticamente iguales (P ≤ 0.05).

**Cuadro 4. Rendimiento del tubérculo de papa (promedio de las variedades Tollocan y Mexiquense), en función del año, y dosis y fuentes de fósforo.**

Factores y niveles	Rendimiento de tubérculo t ha <sup>-1</sup>
<b>Año</b>	
1991	6.29 a
1992	2.36 b
<b>Dosis de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, kg ha<sup>-1</sup></b>	
0	2.28 c
200	4.74 b
400	5.95 a
<b>Fuentes de fertilizante fosfórico</b>	
Superfosfato de calcio simple	5.84 a
Superfosfato de calcio triple	4.88 b
Roca fosfórica de Baja California	2.25 c

Cifras con la misma letra son estadísticamente iguales (P ≤ 0.05).

hasta 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> con SS y ST con rendimientos promedio de 13.89 y 11.14 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, diferentes significativamente entre ellos (Cuadro 5). La EAR de la ST y de la RF tuvo un promedio de 86.3% y 2.9% respectivamente, comparada con la del SS (100%). En 1992, año con sequía severa, el rendimiento fue más bajo que el obtenido el año anterior y sin mostrar respuesta a las dosis y fuentes de P (Cuadro 5), debido probablemente a que el fertilizante fosfórico no se solubilizó lo suficiente por la falta de humedad (Barber, 1984) (Cuadro 3). Resultados similares obtuvieron Núñez y Gavi (1991) en el cultivo de maíz. En ambos años, la RF no tuvo ningún efecto sobre el rendimiento de papa, lo que sugiere que la acidez del suelo (pH = 5.3) no fue suficiente para solubilizar el P y, tal vez, convenga acidular la RF con azufre y/o mezclarla con SS o ST en estudios posteriores. También se asume que el alto valor de flúor (4.1%) afecta detrimentalmente la disponibilidad de P de la roca (Ellis *et al.*, citados por Etchevers *et al.*, 1986). Con estos resultados se infiere que la RF cruda y sola de Baja California, sin mezclarse con otra fuente soluble, no se recomienda para el cultivo de papa, debido a que este cultivo posee un pequeño volumen radical (Vos y Groenwold, 1986) que, comparado con el de los cereales, se considera ineficiente para solubilizar el fósforo de la RF cruda.

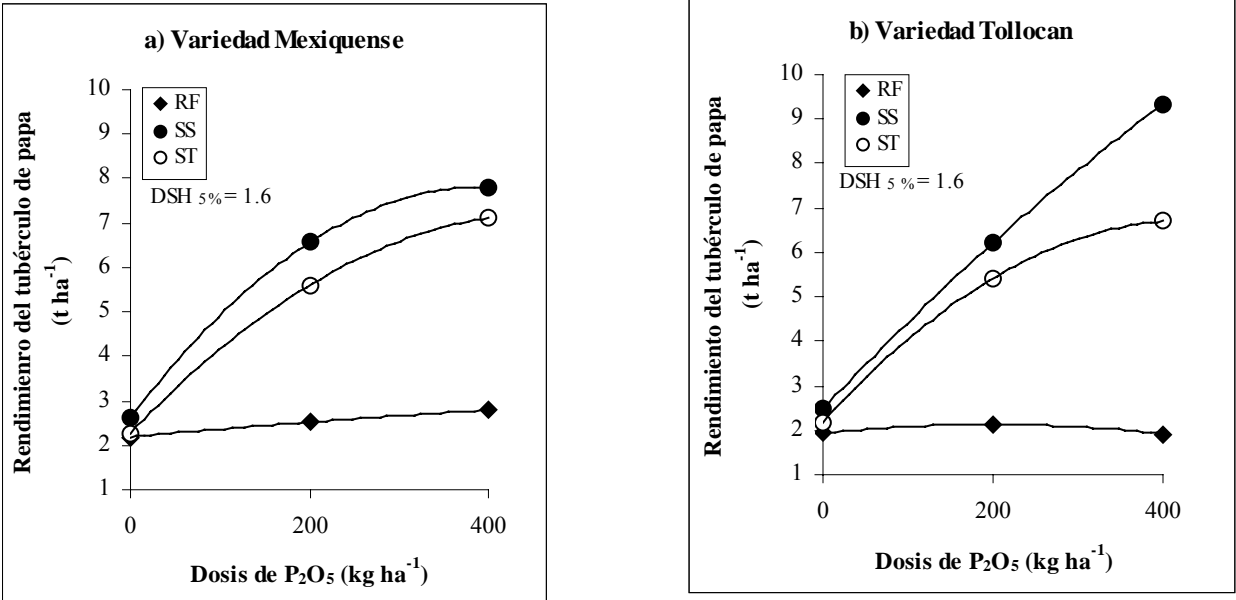
En la Figura 1, se presenta la respuesta de las variedades de papa a la aplicación de dosis crecientes de tres fuentes de fertilización fosfórica. Tanto la variedad Mexiquense, como la variedad Tollocan respondieron hasta 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> con SS.

**Cuadro 5. Rendimiento de tubérculo de papa (promedio de las variedades Tollocan y Mexiquense con tres dosis de cal) y eficiencia agronómica relativa, en función de la fuente de fósforo y las interacciones año x fuente de fósforo y año x dosis x fuente de fósforo.**

Año	Dosis de fósforo P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg ha <sup>-1</sup>	Rendimiento de tubérculo y eficiencia agronómica relativa por fuente de fósforo					
		Roca fosfórica	EAR <sup>†</sup>	Superfosfato triple	EAR	Superfosfato simple	EAR
		t ha <sup>-1</sup>	%	t ha <sup>-1</sup>	%	t ha <sup>-1</sup>	%
1991	0	2.35 p		2.31 p		3.24 p	
	200	2.55 p	2.9	8.41 o	89.7	10.04 n	100.0
	400	2.66 p	2.9	11.14 n	82.9	13.89 m	100.0
	Promedio (A x F)	2.52 i		7.29 h		9.06 g	
1992	0	1.77 p		2.14 p		1.86 p	
	200	2.11 p	39.1	2.61 p	54.0	2.73 p	100.0
	400	2.05 p	20.0	2.68 p	38.6	3.26 p	100.0
	Promedio (A x F)	1.98 i		2.48 i		2.62 i	
Promedio (F)		2.25 c		4.89 b		5.84 a	

Cifras con la misma letra en su grupo son estadísticamente iguales ( $Pr \leq 0.05$ ). a,b,c para significancia de medias de fuentes (F); g,h,i, para significancia de años por fuentes (A x F); m,n,o,p para significancia de años por dosis por fuentes (A x P x F).

<sup>†</sup> Eficiencia agronómica relativa.



**Figura 1. Respuesta en rendimiento de la variedad: a) Mexiquense y b) Tollocan, a dosis y fuentes de fósforo (promedio de dos años y tres dosis de cal).**

Fontes *et al.* (1997) reportaron un rendimiento máximo económico de papa de 16.9 t ha<sup>-1</sup> con 530 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> en un suelo Ultisol en Brasil.

La variedad Tollocan mostró un rendimiento consistentemente creciente, lo que sugiere que esta variedad, con la fuente SS, tiende a responder a dosis mayores que las estudiadas; en cambio, al utilizar ST, el rendimiento tiende a llegar a un máximo, con la mayor dosis de fósforo.

La aplicación de 2 t ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub> aumentó ligeramente el rendimiento promedio del tubérculo de

papa en 0.60 t ha<sup>-1</sup> con respecto al tratamiento sin encalar, aunque no fue significativo, quizá debido a la baja humedad del suelo que limitó la disolución de la cal (Bohn *et al.*, 1993), situación similar a la reportada por Maier *et al.* (1996) y Shanmugasundaram *et al.* (1994) en suelo con pH de 4.6, y a que la varianza fue muy alta en el error “b” (10.51) comparada con la obtenida en el error “c” (1.83) (Cuadro 2). Sin embargo, se presentó una interacción positiva cuando se combinó la cal con dosis y fuentes de fósforo.



**Cuadro 6. Rendimiento del tubérculo de papa (promedio de dos años y dos variedades), en función de la interacción dosis de cal x dosis de fósforo x fuentes de fósforo.**

Dosis de cal CaCO <sub>3</sub> t ha <sup>-1</sup>	Dosis de fósforo P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg ha <sup>-1</sup>	Rendimiento de tubérculo por fuente de fertilizante		
		Roca fosfórica	SS <sup>†</sup>	ST <sup>‡</sup>
0	0	1.72 d	2.49 d	2.18 d
	200	2.69 d	5.40 bc	4.74 c
	400	2.14 d	7.70 a	6.28 b
2	0	1.96 d	2.78 d	2.65 d
	200	1.86 d	7.54 a	5.53 bc
	400	2.40 d	8.59 a	7.48 a
4	0	2.49 d	2.39 d	1.86 d
	200	2.43 d	6.22 b	6.26 b
	400	2.52 d	9.42 a	6.96 b

<sup>†</sup> Superfosfato de calcio simple; <sup>‡</sup> Superfosfato de calcio triple.

Cifras con la misma letra son estadísticamente iguales (Pr ≤ 0.05).

Las dosis crecientes de RF y de cal no tuvieron efectos significativos sobre el rendimiento del tubérculo de papa (Cuadro 6), lo que sugiere que la RF requiere un medio ácido para solubilizar su fosfato y la cal hace insoluble a la RF y, por lo tanto, baja la disponibilidad del fósforo, debido a la reacción neutral en el pH y a una alta saturación de calcio en los suelos (Mishra *et al.*, 1981). Sin embargo, con las fuentes SS y ST, el rendimiento se incrementó al elevarse la dosis

de fósforo y de cal, tal vez debido a que el suelo era deficitario de P y Ca, en este caso el encalado suministró Ca como nutrimento (Aguilar y López, 1992). Estadísticamente resulta igual aplicar los tratamientos 2 t ha<sup>-1</sup> de cal + 200 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como SS que 0, 2 o 4 t ha<sup>-1</sup> de cal + 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como SS; o bien 2 t ha<sup>-1</sup> de cal + 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como ST (Cuadro 6).

En el Cuadro 7, se presenta el análisis económico del cultivo de papa como respuesta al encalado y dosis y fuentes de fósforo, promedio de dos años, practicado con el procedimiento discreto para capital ilimitado y para capital limitado (Volke, 1982). Resultó que el máximo ingreso neto + costos fijos (INCF) fue de \$ 34 240 ha<sup>-1</sup> asociado con el tratamiento óptimo económico para capital ilimitado (TOECI) consistente en 4 t ha<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub> + 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como SS con un rendimiento máximo económico de 9.42 t ha<sup>-1</sup>. El TOECI es apropiado para que lo aplique aquel productor empresarial que cuente con suficientes recursos económicos para invertir. Por otro lado, para el productor de subsistencia, con escasos recursos económicos, es mejor que utilice el tratamiento óptimo económico para capital limitado (TOECL) que le garantice la mayor tasa de retorno al capital variable (TRCV), que en el presente caso fue de

**Cuadro 7. Análisis económico del cultivo de papa como respuesta al encalado y dosis y fuentes de fósforo (promedio de dos años).**

Tratamiento			Rendimiento tubérculo t ha <sup>-1</sup>	IBCF <sup>†</sup>	Costo variable \$ ha <sup>-1</sup>	INCF <sup>‡</sup>	ΔINCF <sup>§</sup>	TRCV <sup>¶</sup>
CaCO <sub>3</sub> t ha <sup>-1</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg ha <sup>-1</sup>	Fuentes de fósforo						
0	200	Roca fosfórica	2.69	10760	198	10562	2042	10.31
0	200	Super triple	4.74	18960	826	18134	9614	11.64
0	200	Super simple	5.40	21600	1020	20580	12060	<b>11.82<sup>††</sup></b>
0	400	Roca fosfórica	2.14	8560	396	8164	-	-
0	400	Super triple	6.28	25120	1652	23468	14948	9.05
0	400	Super simple	7.70	30800	2040	28760	20240	9.92
2	200	Roca fosfórica	1.86	7440	898	6542	-	-
2	200	Super triple	5.53	22120	1526	20594	12074	7.91
2	200	Super simple	7.54	30160	1720	28440	19920	11.58
2	400	Roca fosfórica	2.40	9600	1096	8504	-	-
2	400	Super triple	7.48	29920	2352	27568	19048	8.10
2	400	Super simple	8.59	34360	2740	31620	23100	8.43
4	200	Roca fosfórica	2.43	9720	1598	8122	-	-
4	200	Super triple	6.26	25040	2226	22814	14294	6.42
4	200	Super simple	6.22	24880	2420	22460	13940	5.76
4	400	Roca fosfórica	2.52	10080	1796	8284	-	-
4	400	Super triple	6.96	27840	3052	24788	16268	5.33
4	400	Super simple	9.42	37680	3440	<b>34240<sup>#</sup></b>	25720	7.48
0	0		2.13	8520	0	8520		

<sup>†</sup> Ingreso bruto + costos fijos. <sup>‡</sup> Ingreso neto + costos fijos. Los precios considerados fueron: a) \$ 0.35 kg<sup>-1</sup> de CaCO<sub>3</sub>; b) \$ 0.99, \$ 4.13 y \$ 5.10 kg<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> con RF, ST y SS, respectivamente; c) \$ 4.00 kg<sup>-1</sup> de tubérculo de papa. <sup>§</sup> Incremento de ingreso neto + costos fijos sobre el testigo absoluto. <sup>¶</sup> Tasa de retorno al capital variable = ΔINCF/costo variable. <sup>#</sup> Máximo ingreso neto asociado al tratamiento óptimo económico para capital ilimitado (TOECI). <sup>††</sup> Mayor tasa de retorno al capital variable, asociado al tratamiento óptimo económico para capital limitado (TOECL).

11.82, esto quiere decir que por cada peso invertido ganará \$11.82. El TOECL con la mayor TRCV consiste en aplicar 200 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como SS y sin cal.

## CONCLUSIONES

- La cal tuvo un efecto favorable sobre el rendimiento (promedio de las variedades Tollocan y Mexiquense) de tubérculo de papa sólo cuando se aplicó superfosfato de calcio simple o superfosfato de calcio triple. La roca fosfórica no tuvo efecto sobre el rendimiento de papa.

- El mayor ingreso neto más costos fijos fue de \$ 34 240 ha<sup>-1</sup>, asociado con el tratamiento óptimo económico para capital ilimitado de 4 t ha<sup>-1</sup> de cal + 400 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato de calcio simple. Este tratamiento es apropiado para el productor de tipo empresarial y con suficiente capital para invertir en insumos.

- La mayor tasa de retorno al capital variable de 11.82 se asoció con el tratamiento óptimo económico para capital limitado de 200 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato de calcio simple y sin cal. Este tratamiento es apropiado para el productor de subsistencia y con escasos recursos económicos para invertir en insumos.

- La eficiencia agronómica relativa de las fuentes de fósforo tuvo el siguiente orden decreciente: superfosfato de calcio simple > superfosfato de calcio triple > roca fosfórica.

## LITERATURA CITADA

- Adán G., J.H., L.J. Cajuste y R. Núñez E. 1980. Caracterización química, mineralógica y evaluación agronómica de roca fosfórica de diferentes depósitos. *Agrociencia* 41: 95-112.
- Aguilar A., J.L. y R. López M. 1992. Efecto del encalado sobre el pH, saturación con aluminio y el rendimiento de maíz en Andosoles de Naolinco, Ver. *Terra* 10: 75-83.
- Aguilar A., J.L. y C.A. Ortiz S. 1987. Uso del levantamiento fisiográfico para generar tecnología de producción en el cultivo asociado maíz-frijol de guía. *Suelos Ecuatoriales* 17: 269-274.
- Aguilar A., J.L., R. López M., V. Volke H. y A. Khalil G. 2000. Fertilización en papa y su efecto residual en maíz, en dos agrosistemas de la sierra veracruzana. *Terra* 18: 71-81.
- Barber, S.A. 1984. Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach. John Wiley. New York.
- Bohn, H.L., B.L. McNeal y G.A. O'Connor. 1993. Química del suelo. Trad. al español por M. Sánchez O. y R. Guajardo V. LIMUSA. México, D.F.
- Castellanos, J.Z., J.X. Uvalle-Bueno y A. Aguilar-Santelises. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. 2da edición. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. Celaya, Guanajuato, México.
- Centro Internacional de la Papa. 1984. Informe Anual del Centro Internacional de la Papa, 1983. Lima, Perú.
- De Gracia de L., R.G., R. Núñez E., J.D. Etchevers B. y M. Bell. 1996. Respuesta de *Lolium perenne* a dos rocas fosfóricas con tres tamaños de partícula adicionadas de azufre o zeolita en un Andosol. *Agrociencia* 30: 459-467.
- Espinosa, J. 1991. Efecto residual de fósforo en Andisoles. *Rev. Fac. Agron. de la Universidad Central de Maracay Venezuela* 17: 39-47.
- Etchevers, J.D., R. Núñez E., I. Montes G. y A. Trinidad S. 1986. Investigación agronómica con roca fosfórica en México. Serie Cuadernos de Edafología 3. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- FAO/UNESCO/ISRIC. 1988. FAO/UNESCO soil map of the world, revised legend, world soil resources. Report 60. Rome, Italy.
- Fassbender, W.H. y E. Bornemiza. 1987. Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. San José, Costa Rica.
- Fontes P., C.R., F.A.T. Rocha y H.E.P. Martínez. 1997. Maximum economic potato yield as a function of phosphorus fertilizer application. *Horticultura Brasileira* 15(2): 104-107.
- Guerrero, R.R. y S.H. Pabón. 1984. La determinación rápida de material amorfo y su aplicación en el diagnóstico de suelos volcánicos en Colombia. pp. 150-163. *In: Congreso Internacional de Suelos Volcánicos*. Secretariado de Publicaciones, Universidad de La Laguna. Serie Informes 13. Islas Canarias, España.
- Gutiérrez J., L.C. 1991. ROFOMEX: A un paso de la calidad internacional. *Rev. Fac. Agron. de la Universidad Central de Maracay Venezuela* 17: 13-18.
- Landon, J.R. (ed). 1991. Booker tropical soil manual: A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics. John Wiley. New York.
- Maier, N.A., M.J. McLaughlin, M. Heap, M. Butt, M.K. Smart y C.M.J. Williams. 1996. Effect of current season application of calcitic lime on soil pH, yield and cadmium concentration in potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 47: 29-40.
- Mishra, B., R.D. Dharma y N.P. Mishra. 1981. Response of potato to rock phosphate applied in conjunction with pyrites or superphosphate. *Potato Res.* 24: 183-186.
- Moorehead, S., R. Coffin y B. Douglas. 1998. Phosphorus needs of processing potato varieties. *Better Crops with Plant Food* 82(4): 6-7.
- Núñez E., R. 1985. Efectos de la acidez del suelo sobre la producción de cultivos y su corrección mediante el encalado. Serie Cuadernos de Edafología 2. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Núñez E., R. y F. Gavi R. 1991. Avances de las investigaciones sobre aplicación directa de roca fosfórica en México. *Rev. Fac. Agron. de la Universidad Central de Maracay Venezuela* 17: 197-216.
- Okajima, H. 1980. Habilitación y mejoramiento de suelos derivados de cenizas volcánicas. pp. 68-88. *In: Ishizuka, Y. y C.A. Black (eds.). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Japón*. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. México, D.F..
- Ortiz S., C.A. 1987. Evaluación de las tierras de México para la producción de maíz, frijol y sorgo en condiciones de

- temporal. Cuaderno de Edafología 8. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Shanmugasundaram, R. y K. Nanjan. 1992. Influence of carriers on growth and yield of potato in acid soils of Nilgiris. *J. Indian Potato Assoc.* 19(1-2): 84-86.
- Shanmugasundaram, R., P. Savithri y K. Nanjan. 1994. Influence of acid soil amendments on potato tuber yield and phosphorus uptake. *Madras Agric. J.* 81: 574-575.
- Smith, J. y S. Cravo. 1990. Phosphorus management for continuous corn-cowpea production in a Brazilian Amazon Oxisol. *Agron. J.* 82: 305-309.
- Urquiaga, S. y R.M. Boddey. 1996. Crop production in deleterious soils with special emphasis on acid soils. *Terra* 14: 101-123.
- Vázquez-Alarcón, A. 1996. Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo. Segunda edición. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Volke H., V. 1982. Optimización de insumos de la producción en la agricultura. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Vos, J. y J. Groenwold. 1986. Root growth of potato crops on a marine-clay soil. *Plant Soil* 94: 17-33.
- Zapata, F., E. Casanova, A.M. Salas e I. Pino. 1996. Dynamics of phosphorus in soils and phosphate fertilizer management in different cropping systems through the use of isotopic techniques. *Terra* 14: 59-75.