

RESPUESTA DE LA PAPA (*Solanum tuberosum* L.) VARIEDAD DIACOL CAPIRO A LA FERTILIZACIÓN EN UN ANDISOL DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO, COLOMBIA

EFFECT OF FERTILIZATION IN POTATO (*Solanum tuberosum* L.) DIACOL CAPIRO VARIETY UNDER ANDISOL FROM EAST ANTIOQUIA, COLOMBIA

Edison David Tabares Patiño¹; Sonia Jaramillo Villegas²; Luis Hernán González Santamaría³ y José Miguel Cotes Torres⁴

Resumen. Con el fin de evaluar la respuesta de la fertilización en papa DIACOL Capiro se evaluaron diferentes niveles de Ca (0, 3, 5 y 9 cmol_c kg⁻¹), Mg (0, 0,7; 1,4 y 3 cmol_c kg⁻¹), B (0, 0,5, 1,0 y 2,0 mg kg⁻¹) y S (0, 10, 20 y 40 mg kg⁻¹), con tres niveles de NPK, (relación 1:2:2) en dosis de 500, 1.500 y 3.000 kg ha⁻¹. Para ello se utilizó un diseño central compuesto modificado sobre 80 parcelas experimentales de 1 m². Para determinar las concentraciones de estos elementos en el suelo, se realizaron incubaciones de suelo y se obtuvieron eficiencias de 0,17; 0,83; 0,79; 0,90; 0,10 y 0,53 para P, K, Ca, Mg, B y S, respectivamente. Hubo una respuesta positiva a las dosis crecientes de NPK, cuyos promedios de producción total fueron 7,54; 9,34 y 11,39 kg m⁻². Sin embargo, la relación costo/beneficio, indica que las dosis adecuadas para la fertilización química de la papa Diacol Capiro en este suelo, están alrededor de 1.500 kg ha⁻¹ y no justifica la aplicación de las dosis más altas de fertilizante, dado que al duplicarlas solo se logra un incremento del 22% en la producción total y no se observaron diferencias significativas en la producción de tubérculos de mayor valor comercial. Las aplicaciones de Ca y Mg no siempre presentaron efectos positivos sobre la producción en los diferentes niveles de fertilización evaluados. Las adiciones de B y S mostraron reducción en la producción con diferencias significativas, por posible desbalance en la solución nutritiva del suelo, dado que la materia orgánica adicionada, suple las deficiencias de microelementos y el S.

Palabras claves: Fertilización química, incubación de suelos, rendimiento.

Abstract. This research was carried out for evaluate the response to fertilization in andic soils of the potato variety DIACOL Capiro. Different levels of Ca (0, 3, 5 y 9 cmol_c kg⁻¹), Mg (0, 0.7, 1.4 and 3 cmol_c kg⁻¹), B (0, 0.5, 1.0 and 2.0 mg kg⁻¹) and S (0, 10, 20 y 40 mg kg⁻¹) with three levels of NPK, (grade 1:2:2) in 500, 1.500 and 3.000 kg ha⁻¹ dose where evaluated. A modified central composite design was used and 80 experimental plots of 1 m² were established. In order to determinate the concentrations of these elements in the soil solution, there were made incubations with different dose of these elements and the application efficiency were P: 0.17, K: 0.83, Ca: 0.79, Mg: 0.90, S: 0.53 and B: 0.10. The yield was partitioned in four categories by size tuber. The levels of NPK showed a positive response for total yield with averages 7.54, 9.34 and 11.39 kg m⁻² for 500, 1.500 and 3.000 kg ha⁻¹ of NPK, respectively. Differences among the tuber size categories, more of 6 cm, 2-4 cm and less of 2 cm, were significant, but in the 4-6 cm category it did not have significant differences. The Ca and Mg applications showed unpredictable effects over the production in the different fertilization levels evaluated. The use of B and S did show significant differences in the production for the studied soil.

Key words: Chemical fertilization, incubation of soil, yield.

En Colombia, el cultivo de la papa se encuentra distribuido a lo largo del territorio en un área de más o menos 160.000 ha por año. Se han producido cerca de 40 variedades de las especies *Solanum tuberosum* sp. Andígena y *Solanum phureja*, de las cuales solo 15 son comerciales como Parda Pastusa, Tuquerreña, DIACOL Capiro, ICA Puracé, ICA Nariño, diferentes materiales de Criolla, e ICA UNICA (Porrás, 2005).

La región papera del altiplano del Oriente Antioqueño en Colombiaposee suelos con un primer horizonte

rico en materia orgánica sobre un subsuelo pardo amarillento, que en general presentan buenas condiciones estructurales y texturales, que permiten un adecuado desarrollo del cultivo. Estos suelos derivados de cenizas volcánicas (Andisoles), son poco fértiles, ya que presentan bajos contenidos de nutrientes y desbalances nutricionales. Estos poseen una alta capacidad buffer debido a la presencia de minerales amorfos alofánicos, que forman complejos muy estables con el humus y por sus altos contenidos de materia orgánica con una baja mineralización (Muñoz, 1998).

¹ Estudiante de Ingeniería Agronómica. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779. Medellín, Colombia. <edtabare@unal.edu.co>

² Profesora Asociada. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779. Medellín, Colombia. <sjaramal@unal.edu.co>

³ Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779. Medellín, Colombia. <lhgonzal@unal.edu.co>

⁴ Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779. Medellín, Colombia. <jmccotes@bt.unal.edu.co>

Recibido: Enero 15 de 2008; Aceptado: Mayo 26 de 2009.

Porras (2005) afirmó que la papa responde favorablemente a la fertilización, rubro que representa cerca del 21% de los costos totales de producción. En el país existe una amplia oferta tecnológica disponible para la nutrición del cultivo de la papa, que permite ampliar la eficiencia de la fertilización, puesto que se pueden encontrar formulaciones con diferentes relaciones entre los nutrientes, además de fuentes simples que permitan realizar mezclas de acuerdo con las necesidades requeridas para cierta localidad, cultivo y variedad (FEDEPAPA, 2005).

Para el cultivo se recomienda el uso de fertilizantes con relaciones de 1-3-1 para la zona de la Cordillera Central (ICA, 1992). Sin embargo, Muñoz (1998) con base en la información recolectada en Antioquia, observó que las dosis más efectivas de N estuvieron entre 75 y 100 kg ha⁻¹, las dosis de P que más incrementaron los rendimientos fueron de 300 a 450 kg ha⁻¹ de P₂O₅, mientras que las dosis de K₂O que mostraron una mayor eficiencia agronómica oscilaron entre 50 y 100 kg ha⁻¹.

Por otro lado, Araque y Vélez (1996) afirmaron que en un Dystropept del Norte de Antioquia, para la variedad DIACOL Capiro, no se observaron diferencias significativas a las aplicaciones de N, P₂O₅ y K₂O entre: 100 y 200 kg ha⁻¹, 300 y 500 kg ha⁻¹ y 150 y 400 kg ha⁻¹ respectivamente, y concluyeron que económicamente para las condiciones del experimento el mejor tratamiento fue 100-300-150 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O.

Guerrero (1982), afirmó que para obtener rendimientos cercanos a 40 t ha⁻¹, la cantidad de nutrimentos extraídos en kg ha⁻¹ son de 210 N, 70 P₂O₅, 430 K₂O, 40 Mg, 20 S, dando como resultado una extracción de nutrimentos con una relación 3-1-6 respectivamente. Sin embargo, se destaca la baja absorción de P, frente a las altas aplicaciones del mismo, dada la gran fijación de P en los andisoles.

Barrera (1998), afirmó que la creciente demanda por variedades de alto rendimiento, hace que se ocasione un mayor requerimiento de otros nutrimentos. Elementos como el Ca, Mg, B y S cada vez tienen más importancia en el desarrollo del cultivo, debido a los desbalances que se han generado por las aplicaciones altas y continuas de los elementos N, P y K.

En investigaciones realizadas en la década del sesenta, se utilizaron de 10 a 40 t ha⁻¹ de cal agrícola

(78% de CaCO₃), pero no se determinaron aumentos en los rendimientos, por el contrario, se redujeron en más de 3 t ha⁻¹. Aplicaciones de cantidades superiores a 8 t ha⁻¹ de cal agrícola y cal dolomítica (70% CaCO₃ más 15-25% de MgCO₃) redujeron significativamente la producción de la papa (Muñoz, 1998).

Son pocos los trabajos realizados en Colombia sobre el efecto del Mg en cultivos de papa, a pesar de que existen relaciones amplias de Ca/Mg. Variedades de alto rendimiento y extracción continua de este elemento, han generado una relación Ca:Mg de 8:1, que inducen síntomas de deficiencia de Mg en cultivos de papa en Boyacá. Se considera que una relación Ca:Mg:K en el suelo adecuada para el cultivo de la papa es de 3:1:0,3 (Barrera, 1998).

Según Guerrero (1998), algunos edafólogos calificaron como improbable la deficiencia de S en cultivos de papa en los suelos derivados de cenizas volcánicas, pero investigaciones realizadas por el ICA y Monómeros Colombo Venezolanos S.A. evidenciaron deficiencias de este elemento en el cultivo, por la baja mineralización del mismo en este tipo de suelos.

Barrera (1998) mencionó que las investigaciones realizadas por el ICA entre 1985 y 1986, con la variedad Parda Pastusa en localidades de Cundinamarca y Boyacá, mostraron respuestas significativas a la aplicación de B, tanto al suelo como al follaje. Lora *et al.* (2002), encontraron que la fertilización con B, incrementó la concentración de este elemento en el tejido foliar de las plantas, y además, tuvo un efecto positivo en los rendimientos totales, sin efecto en el tamaño y densidad de los tubérculos.

Los suelos que son destinados a la rotación papapastos van cambiando las relaciones de los elementos; razón por la cual, es conveniente conocer la relación del contenido de nutrientes en el suelo que mejor se comporta para la producción de papa, por lo que este trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de la aplicación edáfica de diferentes concentraciones de los elementos Ca, Mg, B y S en un Andisol del Oriente de Antioquia, con dosis baja, media y alta de un fertilizante compuesto NPK, grado 10-20-20, sobre el rendimiento de papa variedad DIACOL Capiro.

METODOLOGÍA

Ubicación geográfica. La investigación se realizó en el Centro Agropecuario Paysandú de la Universidad

Nacional de Colombia, el cual se encuentra ubicado en el corregimiento de Santa Elena del municipio de Medellín, perteneciente a la zona de vida bosque húmedo Montano Bajo - bhMB (Holdridge, 1996), a una altitud de 2.550 msnm, con un temperatura promedio anual de 14 °C y una precipitación promedio anual de 2.500 mm.

Material edáfico. Se transportaron al Centro Agropecuario Paysandú aproximadamente 20 t de suelo del municipio de La Unión, departamento de Antioquia, seleccionado luego de visitar diferentes lugares al interior del municipio, para establecer mediante calicatas de 25x25x25 cm, que el horizonte A fuera lo más representativo de la zona. Dicho suelo tenía pasto kikuyo (*Penisetum clandestinum*), el cual fue removido teniendo cuidado de minimizar la alteración en sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

Incubación de suelo en cobertizo. Se llevaron tres muestras de suelos de 1 kg cada una al Laboratorio de Suelos de La Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, para determinar los niveles iniciales de N, P, K, Ca, Mg, B y S (Tabla 1). Por otro lado,

se realizaron incubaciones con dosis crecientes de nutrientes y/o enmiendas, para alcanzar los niveles propuestos en el estudio. Se asumió que el contenido inicial del elemento en el suelo era el nivel o dosis cero (0) y las dosis planteadas se determinaron por la relación dosis aplicada y el contenido del elemento en la solución del suelo después de la incubación, que correspondían a las dosis: Ca (2, 3 y 7 cmol_c.kg⁻¹ de suelo); Mg (0,7; 1,4 y 3,0 cmol_c.kg⁻¹ de suelo), B (0,5; 1,0 y 2,0 mg kg⁻¹) y S (10, 20 y 40 mg.kg⁻¹).

Para la incubación se tomaron muestras representativas de los suelos, estas fueron homogenizadas y luego pasadas por una malla de 4 mm. Se utilizó un diseño completamente al azar con tres repeticiones, cuya unidad experimental correspondió a 2 Kg de suelo en bolsas plásticas negras. Los tratamientos fueron: Testigo sin aplicación (T1); 2 cmol_c Ca kg⁻¹, 0,7 cmol_c Mg kg⁻¹, 0,5 mg B kg⁻¹ y 10 mg S kg⁻¹ (T2), 3 cmol_c Ca kg⁻¹, 1,4 cmol_c Mg kg⁻¹, 1,0 mg B kg⁻¹ y 20 mg S kg⁻¹ (T3) y 7 cmol_c Ca kg⁻¹, 1,4 cmol_c Mg kg⁻¹, 2,0 mg B kg⁻¹ y 40 mg S kg⁻¹ (T4). Las fuentes de elementos utilizadas en esta incubación fueron carbonato de calcio (CaCO₃), carbonato de magnesio (MgCO₃), ácido bórico (H₃BO₃), sulfato de amonio ((NH₄)₂SO₄).

Tabla 1. Parámetros químicos de un suelo tipo Andisol de La Unión Antioquia.

Parámetro químico	Promedio ¹	Desviación estándar	Unidades	Metodología	Técnica
pH	5,05	0,05	-	Agua (1:1)	Potenciometría
M.O.	21,07	0,49	%	Walkley and Black	Volumetría
Al	1,62	0,12	cmol _c kg ⁻¹	Acetato de Amonio 1M	Absorción atómica
Ca	5,00	0,22	cmol _c kg ⁻¹	Acetato de Amonio 1M	Absorción atómica
Mg	1,60	0,09	cmol _c kg ⁻¹	Acetato de Amonio 1M	Absorción atómica
K	0,52	0,03	cmol _c kg ⁻¹	Acetato de Amonio 1M	Absorción atómica
CICE	8,77	0,44	cmol _c kg ⁻¹	Acetato de Amonio 1M	Absorción atómica
P	25,83	3,19	mg kg ⁻¹	Bray II	Colorimetría
B	0,28	0,04	mg kg ⁻¹	Agua caliente	Colorimetría
S	7,83	1,17	mg kg ⁻¹	Fosfato monocálcico 0.008F	Turbidimetría
Fe	357,50	124,87	mg kg ⁻¹	Olsen-EDTA	Absorción atómica

¹ Promedio de tres muestras de 1 kg cada una

Por otro lado, para realizar incubaciones de los elementos N, P y K se utilizó un diseño completamente al azar con tres repeticiones. De igual forma la unidad experimental fueron 2 kg de suelo en bolsas plásticas y los tratamientos fueron: Testigo sin aplicación (T1), 500 kg ha⁻¹ de

fertilizante 10-20-20 (T2), 1.500 kg ha⁻¹ de 10-20-20 (T3) 3.000 kg ha⁻¹ de 10-20-20 (T4).

Los suelos de las bolsas se mantuvieron en el cobertizo, con humedad a capacidad de campo y por espacio de quince días, al final de los cuales se tomó

una submuestra homogenizada de aproximadamente 500 g, con el objeto de realizar los análisis químicos de los diferentes elementos.

De acuerdo con los resultados de los análisis químicos de la incubación, se graficaron las dosis aplicadas del elemento contra las concentraciones del elemento en la solución del suelo incubado (con una determinada solución extractora). Se realizó además un análisis de regresión, para verificar la fiabilidad de los resultados utilizando el procedimiento REG de SAS System v9.1.3.

Unidades experimentales en campo. Se niveló el terreno, eliminando el horizonte A en el Centro Agropecuario Paysandú, el cual tenía un espesor de aproximadamente 40 cm, para evitar interferencia de este suelo con el suelo transportado. Con bloques de cemento de 20 cm de alto y 40 cm de largo, se construyeron ocho hileras de diez unidades experimentales cada una y cada unidad con un área de 1 m². Cada unidad experimental se llenó con el suelo traído desde La Unión. Adicionalmente, se instaló un sistema de riego por goteo autocompensado para garantizar el requerimiento hídrico óptimo en todas las unidades experimentales.

Los tratamientos de NPK se aplicaron por unidad de área y los demás (Ca, Mg, B y S) se aplicaron dosis variables de acuerdo con los resultados de los análisis de incubación del suelo hasta obtener las niveles de Ca, Mg, B y S, planteados en el experimento, utilizando como fuentes CaCO₃, MgCO₃, H₃BO₃, (NH₄)₂SO₄. Se colocó la semilla (nueve tubérculos de semilla certificada por parcela) teniendo en cuenta la homogeneidad de los tamaños y la profundidad, por último se taparon procurando que la semilla tuviera buen contacto con el suelo.

Diseño experimental y variables a evaluar. Se evaluaron tres niveles de fertilización NPK, (grado 1:2:2) en dosis de 500, 1.500 y 3.000 kg ha⁻¹, para representar niveles de uso de fertilizantes bajo, moderado y alto, respectivamente. Debido a que evaluar bajo condiciones de campo los niveles de Ca (0, 3, 5 y 9 cmol_c kg⁻¹), Mg (0, 0.7, 1.4, 3 cmol_c kg⁻¹), B (0, 0,5, 1,0 y 2,0 mg kg⁻¹) y S (0, 10, 20 y 40 mg kg⁻¹) bajo una estructura factorial 4x4x4x4, con un total de 256 tratamientos, es poco viable, se recurrió al uso de diseños centrales compuesto desarrollados por (Box y Wilson, 1951) y aplicados en estudios de fertilidad por Cady y Laird (1973) y Gómez (1997), los cuales hacen

parte de la familia de diseños fraccionados. En esta investigación se utilizó el diseño central compuesto para poder evaluar efectos simples e interacciones dobles entre los niveles aplicados según el siguiente modelo estadístico:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \beta_3 x_{3i} + \beta_4 x_{4i} + \beta_5 x_{1i} x_{2i} + \beta_6 x_{1i} x_{3i} + \beta_7 x_{1i} x_{4i} + \beta_8 x_{2i} x_{3i} + \beta_9 x_{2i} x_{4i} + \beta_{10} x_{3i} x_{4i} \quad (1)$$

Donde y_i es la producción de tubérculos, x_{1i} , x_{2i} , x_{3i} y x_{4i} son los diferentes niveles de Ca, Mg, B y S, respectivamente; $\beta_0, \dots, \beta_{10}$ son coeficientes de regresión para el intercepto, los efectos simples de cada elemento y sus interacciones. Para el nivel moderado, se utilizó un diseño central compuesto modificado (Box y Wilson, 1951) con un núcleo de factorial 3x2x3x2, más cuatro puntos adicionales, que permiten un mejor balance del diseño experimental (Box y Wilson, 1951; Box y Hunter, 1957; Cady y Laird, 1973; Martínez, 1996; Gómez, 1997) para un total de 40 unidades experimentales. Para los niveles bajo y alto, donde se necesita una menor precisión experimental, se utilizó un diseño central compuesto tradicional con un núcleo 2x2x2x2 para Ca, Mg, B y S, respectivamente, utilizando las dosis mencionadas anteriormente, más cuatro puntos adicionales, para un total de 20 unidades experimentales por cada nivel. De esta forma fueron necesarias 80 unidades experimentales para evaluar los efectos principales y sus interacciones dobles para los nutrimentos secundarios y B en los tres niveles de fertilización propuestos. Las variables a evaluar fueron, peso y número de tubérculos por categoría o tamaño, (menores de 2 cm, entre 2-4 cm, entre 4-6 cm y mayores 6 cm). Para la selección de los 40 o los 20 tratamientos a evaluar se utilizó el módulo *Experimental Design* del SAS System v. 9.1.3 y para análisis de los datos, se utilizó el procedimiento REG del mismo programa estadístico. Finalmente, se aplicó el método de selección por pasos (*stepwise*, por sus siglas en inglés) para seleccionar los efectos significativos en el modelo, teniendo en cuenta la formulación jerárquica del modelo (1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Incubación de suelos. El contenido inicial de P de este suelo fue de 25,83 mg kg⁻¹ (Bray II), que según Muñoz (1998) se clasifica como bajo (menos de 40 mg kg⁻¹), con las aplicaciones crecientes de 10:20:20, el contenido en el suelo se duplicó (54,7 mg kg⁻¹suelo), con 1.500 kg ha⁻¹ el contenido de este fue 39,3 mg kg⁻¹ y

para aplicaciones de 500 kg ha⁻¹ el contenido de P en el suelo se incrementó ligeramente (30,7 mg kg⁻¹). La ecuación de regresión fue: $Y = 0,170X + 26,31$ ($R^2 = 0,903$). La pendiente de la curva de regresión (0,170) para el P indica la baja eficiencia de la aplicación de P en este tipo de suelos. Los resultados obtenidos por Quintero (1990), quien aplicó diferentes fuentes de P₂O₅ (superfosfato triple y roca fosfórica), en cantidades de 100, 200, 300 y 400 kg ha⁻¹ de P₂O₅ a un oxisol y a un andisol, y encontró que el andisol presenta un contenido muy bajo de P comparado con el oxisol y no presenta modificaciones sustanciales después de los niveles aplicados de fertilizantes. Estos resultados corroboran los pequeños incrementos que se obtuvieron al aplicar las dosis crecientes de P.

En ensayos exploratorios sobre la adsorción del P en invernaderos, Espinosa (1998), afirma que la retención de P en suelos ándicos no se reduce con las altas dosis aplicadas y además propone como hipótesis que los contenidos de carbono total, podrían ser un buen indicador de la capacidad de fijación de P en el suelo. En Andisoles de la Sierra del Ecuador, el INIAP (1991), observó que después de tres cosechas consecutivas de papa, no se obtuvo incremento en la producción, cuando se hicieron las adiciones de P que se venían haciendo en las dos cosechas anteriores y que oscilaron entre 300 y 450 kg ha⁻¹ por lo que se sugiere que el efecto residual del P es bajo, posiblemente por inmovilización del mismo.

El contenido inicial de K fue de 0,52 cmol_c kg⁻¹, considerado dentro de un rango medio para la producción de papa, por tanto Muñoz (1998), recomendó aplicar entre 60 y 90 kg ha⁻¹ de K₂O. Al ser incubado con dosis crecientes de fertilizante 10:20:20, la concentración en el suelo fue 0,94, 1,39 y 2,71 cmol_c kg⁻¹ respectivamente, cuyo modelo de regresión $Y = 0,834X + 0,518$ ($R^2 = 0,972$) destaca la eficiencia en las aplicaciones de K a este suelo. Bohn *et al.* (1993), mencionaron que el K adicionado no es retenido en suelos arenosos y que son requeridas grandes cantidades de fertilizante debido a las pérdidas por lixiviación.

En las incubaciones se vieron afectados otros parámetros como el pH. Espinosa (1994) afirmó que los fertilizantes nitrogenados que contienen o forman amonio (NH₄⁺) incrementan la acidez del suelo. Al aplicar cantidades de fertilizante NPK, el pH disminuye de valores de 5,1 a 4,6; este aumento en la acidez lleva a un incremento en la concentración de Al

intercambiable de 1,6 a 2,5 cmol_c kg⁻¹ cuyo efecto es que el incremento en el porcentaje de saturación del Al alcance proporciones mayores al 46%, que según Muñoz (1998), se califica como alto para el cultivo de la papa y se pueden presentar toxicidades. Al realizar los cálculos de saturación de Al se observó que no varía a pesar de la disminución del pH del suelo, debido a las fuertes aplicaciones de K que lograron mantener el porcentaje de saturación del Al entre el 18,31 y 17,60% con y sin adición del fertilizante respectivamente.

Incubaciones con Ca, Mg, B y S. Según Jaramillo (1995), en los suelos del Oriente Antioqueño se pierde el Ca con más facilidad que el Mg, es por esto que se presentan relaciones inversas entre estos dos elementos.

Las dosis crecientes de Ca 3, 5 y 9 cmol_c kg⁻¹, subieron la concentración inicial en el suelo de 5,00 cmol_c kg⁻¹ a 9,23; 9,53 y 12,37 cmol_c kg⁻¹. Estos valores obtenidos después de las incubaciones corresponden a niveles medio 3,1 y alto 6,0; de acuerdo con Jaramillo (1995) y en concordancia con los niveles descritos por Muñoz (1998) para papa. El modelo de regresión fue $y = 0,790x + 5,630$ ($R^2 = 0,863$). La pendiente de 0,790 indica una buena eficiencia a pesar de la baja solubilidad de la fuente (CaCO₃).

El contenido de Mg inicial del suelo, fue de 1,60 cmol_c kg⁻¹, al adicionar cantidades 0,7; 1,4 y 3 cmol_c kg⁻¹, los contenidos de este elemento se incrementaron en promedio a 2,23; 2,77 y 4,27 cmol_c kg⁻¹ respectivamente. La ecuación de regresión fue $Y = 0,902x + 1,548$ ($R^2 = 0,993$), lo que indica que la adición de Mg en este tipo de suelos es muy eficiente, ya que tiene una pendiente del 0,902. Bohn *et al.* (1993), afirmaron que las cantidades excesivas o deficientes no son comunes, aunque han sido encontradas deficiencias de Mg en vegetales que crecen en suelos ácidos y arenosos y en este tipo de suelos en los cuales se cultiva la papa en la zona. Barrera (1995) analizando varios Andisoles en Cundinamarca y Boyacá, expone algunos factores por los cuales se han generado pérdidas de la cantidad disponible de este elemento; como son las relaciones amplias del Ca y el Mg, las aplicaciones altas de K con los fertilizantes compuestos y el uso de cales calcíticas.

Para B la ecuación de regresión fue $y = 0,102x + 0,226$ ($R^2 = 0,353$). Las aplicaciones de B presentaron baja

eficiencia, la pendiente de la regresión indica que por cada mg kg^{-1} solo el 9,1 % queda disponible para el cultivo. Los incrementos a las aplicaciones de B en cantidades de 0,5; 1 y 2 mg kg^{-1} , no incrementaron el contenido en los niveles esperados, pues el contenido inicial fue de 0,28 mg kg^{-1} y luego de las aplicaciones se registraron contenidos en el suelo de 0,2; 0,37 y 0,43 mg kg^{-1} . Sah y Brown (1997) plantearon que el procedimiento del agua caliente para la extracción del B es difícil de estandarizar, presentándose variaciones grandes en los análisis de laboratorio, las cuales pudieron influenciar en los resultados de estas incubaciones.

Para el caso de S la ecuación de la recta, según el análisis de regresión fue: $y=0,527x+7,933$ ($R^2=0,949$). La pendiente de la regresión indica una baja eficiencia en las aplicaciones de este elemento a dicho suelo. Las concentraciones iniciales de S en el suelo fueron de 7,83 mg kg^{-1} , la aplicación de S en cantidades de 10, 20 y 40 mg kg^{-1} , dieron incrementos de 14,33; 17,33 y 29,33 mg kg^{-1} , respectivamente.

Los suelos ándicos de Centro América tienen alto contenido de S por proceder de materiales de origen volcánico, que adsorben cantidades importantes de sulfatos (SO_4^{-2}) y que pueden ser desplazados por fertilizaciones fosfatadas (Bornemisza, 1990). Las adiciones de S son importantes cuando el suelo presenta bajos contenidos de éste, debido a la baja mineralización que presenta la materia orgánica (Guerrero 1998).

Relación entre el tamaño y el peso de los tubérculos. El peso promedio de un tubérculo de primera categoría (mayores de 6 cm) fue de 143,56 g, para la segunda categoría (entre 4 y 6 cm) fue de 67,61 g, para la tercera categoría (entre 2 y 4 cm) fue de 31,28 g y para la cuarta categoría (menores de 2 cm) los tubérculos pesaron en promedio 10,33 g.

López (1992), en la evaluación de las densidades de siembra de minitubérculos para la producción de semilla, encontró para tubérculos con diámetros mayores a 6 cm que pesaban en promedio 142,56 g, para tamaños de 4 a 6 cm el peso fue 29,73 g y para tamaños menores de 4 cm los promedios en peso fueron 8,89 g., lo que indica la preponderancia de los tubérculos de mayor tamaño en ambas investigaciones, pero para tubérculos más pequeños, los pesos fueron mayores en este trabajo, que los obtenidos por López (1992).

Efecto de las dosis de N, P y K. El mayor promedio de producción de tubérculos, 11,39 kg m^{-2} , se obtuvo con el nivel alto de NPK (3.000 kg ha^{-1} de fertilizante, grado 10 - 20 - 20). Las aplicaciones de 1.500 kg ha^{-1} de fertilizante tuvieron rendimientos en promedio de 9,34 kg m^{-2} y los rendimientos más bajos se obtuvieron con las aplicaciones de 500 kg ha^{-1} de fertilizante, cuya producción promedio fue 7,53 kg m^{-2} .

El grupo de tubérculos de mayor tamaño (> 6 cm) presentó una diferencia significativa (Figura 1) para los tratamientos que recibieron las dosis más altas, 3.000 kg ha^{-1} de 10-20-20, con un promedio de 4,88 kg m^{-2} . Las dosis intermedia y baja de fertilizantes 1.500 y 500 kg ha^{-1} de 10-20-20 presentaron producciones promedio de 2,91 y 0,82 kg m^{-2} respectivamente, con diferencias significativas entre ellas, pero con una proporción pequeña con base en la producción total.

El mayor porcentaje de producción se presentó en tubérculos de 4 - 6 cm, sin efecto por dosis como se observa en los valores cuyos promedios fueron 5,14; 5,38 y 5,30 kg m^{-2} respectivamente. Este tamaño es deseable para la producción de semilla certificada y papa comercializada en fresco y se logra con dosis bajas de NPK (500 kg ha^{-1}) en las condiciones evaluadas. Si se analiza costo/beneficio, es evidente que para este tipo de suelo es más conveniente trabajar con dosis medias a bajas, lo que representa una gran economía en fertilizantes y menores contaminaciones o impacto ambiental por el uso de fertilizantes de síntesis química.

La producción de tubérculos de 2-4 cm, se vio aumentada por dosis bajas de NPK, cuyos valores promedio fueron 1,37; 0,77 y 0,69 kg m^{-2} , pero que no representaron una cantidad importante de la producción. Las dosis altas de NPK, reducen la fracción de tubérculos de menor tamaño, que conjuntamente con los tubérculos dañados, constituye la fracción de rechazo. Por lo tanto, el análisis costo/beneficio de mayor dosis de fertilización y el ingreso obtenido por el incremento en la producción de tubérculos en las categorías de más valor comercial, será definitivo para determinar las dosis para un programa productivo.

Ñúñez *et al.* (2006) encontraron, que para suelos cultivados con papa con contenidos iniciales de 21,4 y 28,7 ppm, la aplicación de P en cantidades de 100, 200, 300 y 400 kg ha^{-1} , conjuntamente con 150 kg ha^{-1} de N y K_2O , no presentaron diferencias significativas en las producciones totales en estos tratamientos, pero superaban los rendimientos del testigo (sin aplicación de P_2O_5).

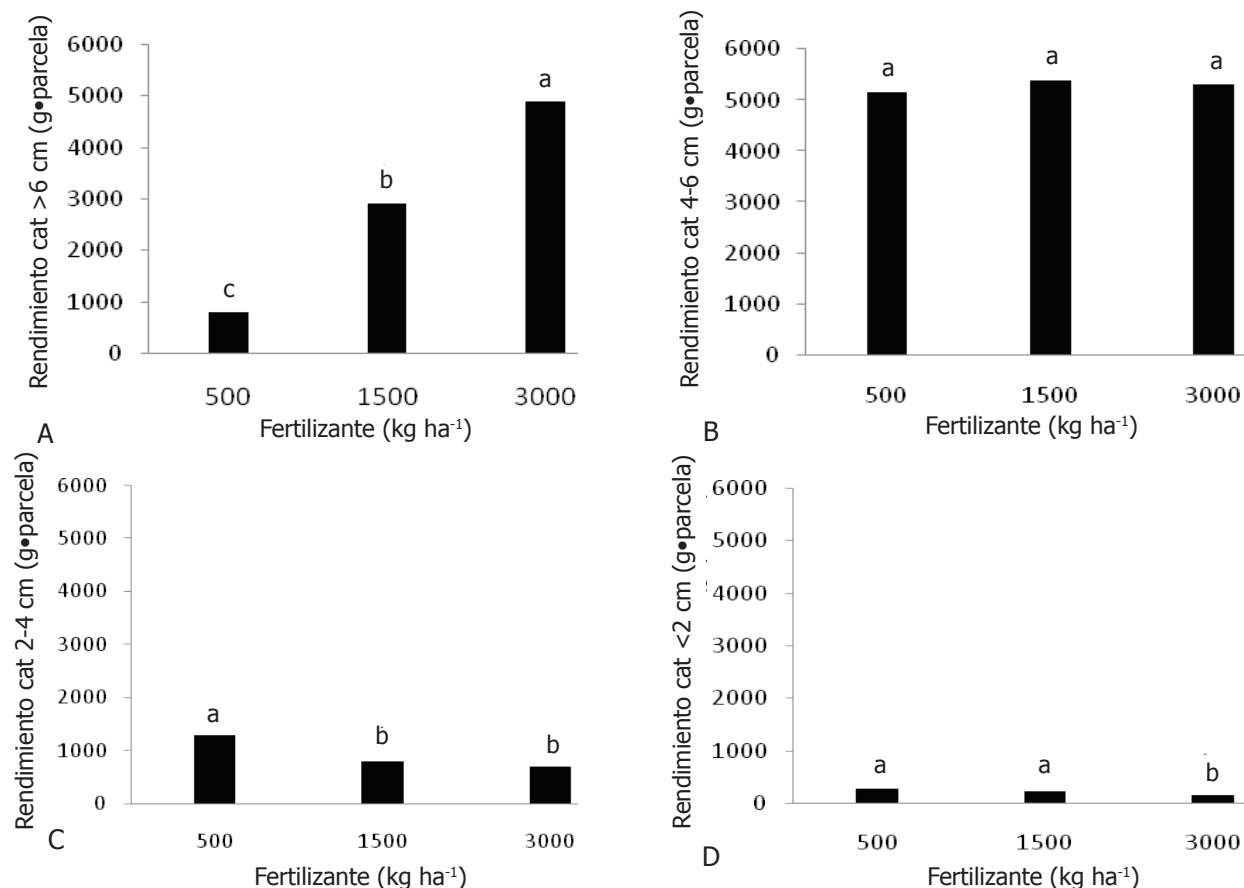


Figura 1. Rendimiento de los tubérculos de papa en las categorías según las aplicaciones de NPK. A) mayores de 6 cm, B) entre 4-6 cm, C) entre 2-4 cm y D) menores de 2 cm. Agrupamientos con las mismas letras son estadísticamente iguales, con significancia Tukey ($\alpha = 0,05$).

Suelos con contenidos de K de $0,3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ han mostrado respuestas altamente significativas a las aplicaciones de $50\text{-}100 \text{ kg ha}^{-1}$ de K_2O (Muñoz, 1998). La aplicación creciente y conjunta de NPK en una relación 1:2:2, favoreció el incremento en la producción al aumentar las dosis hasta 300 kg ha^{-1} de K_2O , posiblemente por ser un andisol, que tiene la propiedad de adsorber nutrientes en su superficie, sin incrementar la disponibilidad en las soluciones del suelo, a niveles que pudiesen reflejar una toxicidad. Sin embargo, es costoso y no se justifica desde el punto de vista económico, ni ambiental, lo que indica que los agricultores están sobredosificando sus cultivos con alto incremento en los costos de producción, ya que el fertilizante según Porras (2005) representa el 21% de la inversión en el cultivo.

Efecto de diferentes dosis de Ca. La Tabla 2 muestra el efecto de la cantidad aplicada de Ca sobre

el rendimiento para cada categoría de tubérculos y dosis de NPK. La producción de tubérculos mayores de 6 cm, y con la dosis más baja de NPK (500 kg ha^{-1}) disminuyó por el efecto de la aplicación del Ca, a razón de $129,57 \text{ g m}^{-2}$ por cada $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ Ca aplicado. Pero la aplicación de este elemento con 1.500 kg ha^{-1} de 10-20-20 presenta una disminución de $22,93 \text{ g m}^{-2}$, en categoría intermedia (4-6 cm), lo que indica que posiblemente se presenta un equilibrio en la solución del suelo, dado que este tamaño es el más representativo de la producción total. Con las dosis más altas de NPK (3.000 kg ha^{-1}) las aplicaciones de Ca aumentaron la producción de tubérculos de tamaño (4-6 cm) en $160,43 \text{ g m}^{-2}$, con disminución de la producción de tubérculos de menor tamaño (0-2 cm) en $10,69 \text{ g m}^{-2}$, sin un valor comercial. Cabe mencionar que para los tubérculos de tamaños de 2-4 cm, las aplicaciones de Ca no tuvieron efecto sobre el rendimiento.

Tabla 2. Coeficiente de regresión ajustado de Ca (0, 3, 5 y 9 cmol_c kg⁻¹), Mg (0, 0,7, 1,4, 3 cmol_c kg⁻¹), B (0, 0,5, 1,0 y 2,0 mg kg⁻¹) y S (0, 10, 20 y 40 mg kg⁻¹) bajo tres dosis de fertilización de nitrógeno, fósforo y potasio sobre la producción de tubérculos de papa DIACOL Capiro, agrupadas por categorías según su tamaño.

Dosis ¹	Coeficiente regresión	Tubérculos ²			
		Mayores 6 cm	Entre 4 y 6 cm	Entre 2 y 4 cm	Menores 2 cm
500	Ca	-129,57	-	-	-
	Mg	-	-	-	-
	B	-	-	-	-
	S	-. ³	-	-	-
	Ca*S	-	-	-	-
	Ca*B	-	-	-	-
	Ca*Mg	-	-	-	-
	B*Mg	-	-	-	-
	S*Mg	-	-	-	-
	S*B	-	-	-	-
1.500	Ca	-	-22,93	-	-0,6
	Mg	-33,42	17,60	-	-
	B	-	-204,29	-	0,07
	S	-	-282,42	-	0,47
	Ca*Mg	-	-	-	-
	Ca*B	-	-	-	-
	Ca*S	-	-	-	-
	B*Mg	-	-	-	-
	S*Mg	-	-	-	-
	S*B	-	-	-	-
3.000	Ca	-	160,43	-	-10,69
	Mg	-	-11,74	-	0,87
	B	-	-49,37	-	-
	S	-	-	-	7,39
	Ca*Mg	-	-	-	-
	Ca*B	-	-	-	-
	Ca*S	-	-	-	-
	B*Mg	-	-	-	-
	S*Mg	-	-	-	-
	S*B	-	-	-	-

¹ Dosis de fertilizante compuesto con una relación 1:2:2, en kg ha⁻¹; ² todos los coeficientes incluidos en la tabla son significativamente diferentes de cero con un nivel de significancia del 5% ($\alpha < 0,05$); ³ indica coeficientes de selección no incluidos en el modelo, según la metodología de *stepwise* conservando la adecuada formulación jerárquica del modelo.

Fassbender y Bornemisza (1987), afirmaron que la aplicación de NPK altera la relación (Ca + Mg)/K la cual tiene gran importancia en la disponibilidad de nutrientes de los suelos; razón por la cual, las respuestas a las aplicaciones de calcio son contradictorias, por posibles

diferencias en las condiciones de origen de los suelos, que generan propiedades fisicoquímicas muy variables. En cuanto al efecto que puedan presentar las aplicaciones de Ca, Zumbado (1987), evaluó cantidades diferentes de óxido de calcio (CaO) 0,

1.000, 2.000 y 3.000 kg ha⁻¹, en dos suelos los cuales presentaban contenidos de Ca de 5,5 cmol_c kg⁻¹ y no encontró respuesta en el rendimiento de tubérculos a la aplicación de estas cantidades del fertilizante.

Las respuestas a las aplicaciones de cal en el cultivo de la papa en el país, han generado diferentes resultados los cuales no muestran una tendencia clara, por la diversidad de microecosistemas paperos, afectados por diferentes tipos de suelos. En suelos del departamento de Nariño, se encontró que las aplicaciones de 4 t ha⁻¹ disminuyeron ligeramente los rendimientos de la papa. En suelos de la Sabana de Bogotá, la aplicación de 5 a 10 t ha⁻¹ de cal incrementaron los rendimientos en papa. En suelos también pertenecientes a la Sabana de Bogotá y con una alta capacidad de intercambio de cationes y una baja saturación con Ca y Mg, la papa presenta incrementos significativos en la producción con la aplicación de 2 a 6 t ha⁻¹ de cal dolomita (Muñoz, 1979).

Efecto de diferentes dosis de Mg. El Mg, en el nivel de fertilización de NPK más alto (3.000 kg ha⁻¹), presentó un efecto negativo de 11,74 g m⁻², en la producción de tubérculos de (4-6 cm), que es el tamaño de mayor interés para el mercado de consumo en fresco. Con fertilización de 1.500 kg ha⁻¹ NPK, su efecto en las categorías mayores de 6 cm y entre 4-6 cm fue -33,42 y 17,60 g m⁻² respectivamente. Además, se observa que la producción de tubérculos de 2-4 cm, no fue afectada con las aplicaciones de Mg. En dosis de 500 kg ha⁻¹ de NPK, la aplicación de Mg, no afectó ninguna de las categorías de los tubérculos (Tabla 2).

En Boyacá, con suelos que contenían una relación 8:1 entre Ca y Mg, los cultivos presentaban síntomas de deficiencia de Mg, las cuales al ser corregidas con aplicaciones foliares de sulfato de magnesio (MgSO₄•7H₂O), incrementaron en 6 t ha⁻¹ la producción de tubérculos. Es recomendable tener relaciones 3:1 entre el Ca y el Mg (Barrera 1998). Esta relación es la que presentó el suelo analizado originalmente, aunque algunos tratamientos tuvieron relaciones más amplias, no se observaron deficiencias de Mg.

Efecto de diferentes dosis de B. Para la categoría de tubérculos 4-6 cm, la aplicación de 1 ppm de B disminuyó los rendimientos en 204,28 g m⁻² con 1.500 kg ha⁻¹ de NPK, y para el nivel de 3.000 kg ha⁻¹ los

rendimientos disminuyeron a una tasa de 49,37 g m⁻² por cada ppm de B adicional. Sin embargo, no hubo efecto en la producción de tubérculos de mayor tamaño y en la categoría 2-4 cm en ninguno de los niveles de fertilización (Tabla 2). En *Solanum phureja* y en suelos con contenidos de 0,1 ppm de B, Lora *et al.* (2002), encontraron que al adicionar cantidades de 0,5 kg ha⁻¹ los rendimientos promedio fueron 19,94 t ha⁻¹, mientras que con aplicaciones de 0; 1,0; 1,5 y 2,0 kg ha⁻¹ de B presentaron rendimientos promedio de 18,38, 17,33, 17,66 y 15,66 t ha⁻¹ respectivamente, y pueden corroborar lo afirmado por Goldberg (1997), quien encontró que para el B su rango de deficiencia y de toxicidad es muy estrecho.

El suelo en estudio presenta concentraciones de B que están entre 0,2 y 0,3 ppm, los cuales permiten que el cultivo se desarrolle en forma normal, según los niveles establecidos por Barrera (1998). Es posible que con las aplicaciones de B 0,5, 1,0 y 2,0 ppm realizadas se hayan alcanzado los niveles de toxicidad de este elemento para la papa y por tanto por cada ppm de B que se adicione, se reduce la producción de tubérculos de las categoría 4-6 cm a razón de 204,28 g m⁻², con 1.500 kg ha⁻¹ y 49,37 g m⁻², cuando se aplican 3.000 kg ha⁻¹, lo que demuestra la importancia de establecer de manera experimental las relaciones de los nutrientes en las soluciones para cada tipo de suelos.

Efecto de diferentes dosis de S. La aplicación de dosis crecientes de S presentó un efecto negativo en la producción de tubérculos de 4-6cm, ya que por cada mg de S por Kg de suelo que se aplicó, se redujo la producción en 282,41 g m⁻², con las aplicaciones de 3.000 kg ha⁻¹ de fertilizante 10-20-20. Con el incremento de este elemento hubo ligero aumento de las producciones de los tamaños no comerciales (0-2 cm) en 0,43 y 7,38 g m⁻² para fertilizaciones de 1.500 y 3.000 kg ha⁻¹ de NPK respectivamente. Este nutriente no afectó a la categoría 2-4 cm de tubérculos con cualquier nivel de fertilización NPK.

Guerrero (1998), encontró respuestas cuadráticas a la aplicación de diferentes niveles de S, donde la máxima respuesta se logró con 40 kg ha⁻¹. Lo contrario sucedió en esta investigación, puesto que la aplicación de este elemento redujo la producción de tubérculos con mayor valor comercial (4-6 cm) (Tabla 2) y a su vez favoreció la cantidad de tubérculos sin valor comercial (0-2 cm), siendo perjudicial para la economía del agricultor. Es posible que las cantidades

originales del suelo y la adición de la materia orgánica a la siembra, incorporaran el S adecuado para los requerimientos del cultivo y por lo tanto para este tipo de suelos, no es necesario adicionar fertilizantes químicos azufrados.

López (1992), asegura que los suelos de Antioquia en su gran mayoría muestran contenidos muy bajos ($< 5 \text{ mg kg}^{-1}$) y bajos ($5\text{-}10 \text{ mg kg}^{-1}$) de S, rango en el cual se ubica el suelo en estudio, pero al aplicar adicionalmente 16, 32 y 64 kg ha^{-1} , se observó reducción en la producción de tubérculos de tamaño más comercial, especialmente para las dosis mayores de NPK, lo que indica un posible desbalance en la solución del suelo, cuando se hacen aplicaciones de fuentes químicas de S, dado que se hizo una fertilización con abonaza que proporciona S orgánico, el cual puede suplir las demandas de dicho elemento.

Efecto de las interacciones de elementos menores en la producción de papa. Los modelos seleccionados por el método *stepwise* no mostraron significancia para las interacciones entre Ca, Mg, B, S y la relación entre cada uno de estos elementos, bajo las dosis evaluadas. Sin embargo, resultados diferentes fueron mencionados por Muñoz (1998) quien encontró sinergismo entre el N y el P en experimentos realizados en toda la región papera de Antioquia. Barrera (1998) halló un antagonismo entre el Ca y el Mg cuando se presentan altas concentraciones de Ca y bajas de Mg en suelos del departamento de Boyacá. Chacón y Rosero (1989) realizaron un experimento de campo sobre la fertilización azufrada en un suelo inceptisol de Nariño y observaron que una relación entre el N y S inadecuada puede ser perjudicial para el suministro de N a la planta, lo cual lleva a una reducción de los rendimientos, aspecto que también fue registrado en este experimento.

Al realizar aplicaciones de 1.500 y 3.000 kg ha^{-1} de fertilizante 10-20-20 se producen mayores cantidades de tubérculos de primera y segunda categoría (mayor valor comercial) que al aplicar 500 kg ha^{-1} . Sin embargo, aplicando 3.000 kg ha^{-1} el rendimiento solo se incrementa en un 22%, comparado con la utilización de 1.500 kg ha^{-1} , esto no justifica la inversión del doble de los gastos de fertilizantes para obtener menos del doble en la producción y por tanto, se presenta un desperdicio de fertilizantes por parte de muchos agricultores.

CONCLUSIONES

En el suelo andisol de La Unión Antioquia (Colombia), es adecuado fertilizar la papa, variedad Diacol apiro, con dosis iguales o menores a 1.500 kg/ha de un fertilizante grado 1:2:2.

El suelo objeto de estudio, presentó dosis adecuadas de Ca y Mg y por tanto no es necesario hacer aplicaciones, con la dosis de NPK arriba señaladas.

La aplicación de S como sulfato, presentó reducción en la producción de papa tipo comercial. La materia orgánica que se adicionó suplió la demanda de S requerida para el adecuado desarrollo del cultivo.

Al adicionar B, se afectó el rendimiento de las categorías con mayor valor comercial. Si el contenido en el suelo es de $0,28 \text{ mg kg}^{-1}$, no se recomienda realizar ninguna aplicación de este elemento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, a la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, al Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) y a la Asociación Hortifrutícola de Colombia (ASOHOFrucol.) por financiar la contrapartida de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

Araque, E.C. y M.E. Vélez. 1996. Efectos de la fertilización con NPK, en el rendimiento y la calidad industrial de la papa *Solanum tuberosum* en un Dystropept del Norte de Antioquia. Tesis de grado en Ingeniería Agronómica. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 84 p.

Barrera, L. 1995. Suelos y fertilización del cultivo de la papa. pp. 31-55. En: Memorias. Seminario Fertilización de Cultivos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Medellín.

Barrera, L. 1998. Fertilización del cultivo de la papa en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. pp. 63-82. En: Guerrero, R. (ed.). Fertilización de cultivos en clima frío. Sáenz y Cia. Ltda., Santafé de Bogotá.

- Bohn, H., B. McNeal y G. O'Connor. 1993. Química del suelo. Editorial Limusa, México D.F. 320 p.
- Bornemisza, E. 1990. Sulphur in soils of Central America. *Sulphur in Agriculture* 14: 13-15.
- Box, G.E.P. and J.S. Hunter. 1957. Multifactor experimental design for exploring response surfaces. *Annals of Mathematical Statistics* 28: 195-241.
- Box, G.E.P. and K.B. Wilson, 1951. On the experimental attainment of optimum conditions. *Journal of Royal Statistical Society Series B* 13(1):1-45.
- Cady, F.B. and R.J. Laird. 1973. Treatment design for fertilizer use experimentation. *CIMMYT Research Bulletin* 26: 29-30
- Chacón, U.V. y M.J. Rosero. 1989. Respuesta de la papa (*Solanum tuberosum*, L.) a la aplicación de diferentes fuentes y niveles de azufre en un suelo del municipio de Pupiales (Nariño). Tesis Ingeniería Agronómica Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad de Nariño. Pasto. 69 p.
- Espinosa, J. 1998. Fijación de fósforo en suelos derivados de ceniza volcánica y fertilización fosfórica del cultivo de la papa. pp. 103-110. En: Guerrero, R. (ed.). Fertilización de cultivos en clima frío. Sáenz y Cia. Ltda., Santafé de Bogotá.
- Espinosa, J. 1994. Acidez y encalado de los suelos, pp. 113-127. En: Silva, F. (ed.). Fertilidad de suelos-diagnóstico y control. Guadalupe Ltda., Bogotá.
- Fassbender, H. y E. Bornemisza. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica. 420 p.
- Federación Colombiana de Productores de Papa (FEDEPAPA). 1997. Vademecun del cultivo de la papa. Grafemas, Bogotá. 172 p.
- Federación Colombiana de Productores de Papa (FEDEPAPA). 2005. Guía para el cultivo de la papa. PENSÁ Diseño, Bogotá. 229 p.
- Goldberg, S. 1997. Reactions of boron with soils. *Plant and Soil* 193(1-2): 35-48.
- Gómez, H. 1997. Algunos métodos estadísticos para el estudio de la fertilidad de suelos. En: Osorio, W. (ed.). Diagnóstico químico de la fertilidad del suelo. Ecográficas, Medellín.
- Guerrero, R. 1982. Fertilización del cultivo de la papa. En: Monómeros Colombo Venezolanos. Colección Punto Verde No. 2. Bogotá.
- Guerrero, R. 1998. La fertilización con azufre para el cultivo de la papa en Colombia. pp. 87-99. En: Guerrero, R. (ed.). Fertilización de cultivos en clima frío. Sáenz y Cia. Ltda., Santafé de Bogotá.
- Holdridge, L. 1996. Ecología basada en zonas de vida. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica. 216 p.
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). 1992. Fertilización en diferentes cultivos. ICA, Tibaitatá, Colombia. 64 p.
- Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). 1991. Informe técnico 1990. Quito, Ecuador.
- Jaramillo, D.F. 1995. Andisoles del Oriente Antioqueño: caracterización química y fertilidad. Instituto Ciencias Naturales y Ecología-ICNE. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 35 p.
- López, J. 1992. Efecto del tamaño de minitubérculos y la densidad de siembra en la producción de tubérculos de semilla de papa. Trabajo de grado en Ingeniería Agronómica. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 69 p.
- Lora, R., O. Ávila y D. Rodríguez. 2002. Respuesta de la papa criolla variedad Yema de Huevo a la aplicación de fuentes y dosis de boro en un suelo de Cundinamarca. *Suelos Ecuatoriales* 32 (4): 23-28.
- Martínez, A. 1996. Diseños experimentales. Métodos y elementos de teoría. Editorial Trillas, México. 756 p.
- Muñoz, R. 1979. Respuesta de los cultivos al calcio, magnesio y azufre en suelos de clima frío en Colombia. *Suelos Ecuatoriales* 10(2): 156-185.
- Muñoz, R. 1998. Fertilización del cultivo de la papa en Antioquia. pp. 43-59. En: Guerrero, R. (ed.). Fertilización de cultivos en clima frío. Sáenz y Cia. Ltda., Santafé de Bogotá.

Ñústez, C., M. Santos, S. Navia y J.M. Cotes. 2006. Evaluación de la fertilización fosfórica foliar y edáfica sobre el rendimiento de la variedad de papa "Diacol Capiro" (*Solanum tuberosum* L). *Agronomía Colombiana* 24(1): 111-121.

Porras, P.D. 2005. Problemática general del sistema productivo de papa con énfasis en fisiología y manejo de suelos. pp. 1-4. En: Memorias. I Taller Nacional sobre suelos, fisiología y nutrición vegetal en el cultivo de la papa. Centro Virtual de Investigación de la Cadena Agroalimentaria de la Papa (CEVIPAPA). Bogotá, Colombia.

Quintero, J. 1990. Comportamiento del fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* 17(66): 467-476.

Sah, R.N. and P.H. Brown. 1997. Techniques for boron determination and their application to the analysis of plant and soil samples. *Plant and Soil* 193(1-2): 15-33.

Zumbado, A. 1987. Efecto de la aplicación de calcio en la producción de papa. *Investigación Agrícola* 1(2): 32-33.