

ALTERNATIVAS AL MÉTODO DE EXTRACCIÓN MEHLICH-I PARA ESTIMAR LA NECESIDAD DE P EN SUELOS GUATEMALTECOS¹

ALTERNATIVES TO THE METHOD OF EXTRACTION MEHLICH-I TO CONSIDER THE NECESSITY OF P IN GUATEMALAN GROUNDS¹

Heather M. Hunsaker-Alcántara*, Von D. Jolley*, Bruce L. Webb*, Phil S. Allen*,
R. D. Horrocks*, Eric Gabriel Coronel* y M. L. Bueso C.**

¹ Trabajo financiado por el Instituto Internacional para Nutrición de Plantas (IPNI) y la Facultad de Ciencias de Planta y Vida Silvestre (PWS) de la Universidad de Brigham Young.

* Profesores y Estudiantes Universitarios, respectivamente. Plant and Wildlife Sciences Department, Brigham Young University, Provo, UT 84602 e ** Ingeniero Agrónomo. Centro Universitario de Oriente (CUNORI). Chiquimula. Guatemala. E-mail: heathermaehunsaker@hotmail.com, von_jolley@byu.edu, bruce_webb@byu.edu

RESUMEN

El costo e inaccesibilidad para el análisis de suelo en países desarrollados y en vías de desarrollo reducen la efectividad de fertilizantes, y fondos monetarios inadecuados promueven el uso de métodos de análisis de suelo con validación mínima. De los métodos con potencial para la extracción y análisis de P, sólo cinco se muestran promisorios, pero todos necesitan más investigación. El estudio se realizó en 26 campos de agricultores (en localidades múltiples), así mismo, tres estudios con tratamientos de fertilizantes idénticos (incubación de suelos, invernadero y campo). En las localidades múltiples, los métodos Agua Caliente Presurizada (ACP) y Olsen se unificaron positivamente al rendimiento de maíz ($r=0,60$ y $0,75$, respectivamente), pero se encontraron relaciones negativas para los métodos Mehlich-I y Bray-1 ($r=-0,83$ y $-0,74$, respectivamente). En el invernadero, el rendimiento, la concentración de P en tejidos vegetativos y la absorción total de P fueron efectivamente estimadas en los cinco métodos. En el campo controlado, el rendimiento no mejoró con la aplicación de P, aunque los contenidos de P en tejidos foliares se unieron al P extraíble para todos los métodos excepto el Mehlich-I (R^2 de $0,57-0,70$). El P extraíble se afectó en menor medida con la aplicación de P y Mehlich-I (R^2 de $0,51$ comparado $0,96-0,99$ con otros métodos). En general, ACP y Olsen resultaron similares y efectivos, Bray-1 y Mehlich-III los menos consistentes y Mehlich-I que fue uno de los métodos de extracción estudiados.

Palabras Clave: agua caliente presurizada (ACP); análisis de suelo; Bray-1; fósforo; Mehlich-I; Mehlich-III; Olsen.

SUMMARY

Lack of accessibility and cost of soil analysis in both developed and developing countries reduce the effectiveness of fertilizers, and insufficient funds promote the use of soil analysis procedures with minimal validation. Of the many potential methods for P extraction and analysis, five of them are promising, but is needed further research to improve validation. A survey study was done at 26 farmer-field locations (multiple sites study) and three controlled studies were performed with identical fertilizer treatments (soil incubation, greenhouse, and field). In the multiple sites study, PHW (pressurized hot water) and Olsen extractable P positively related to maize yield ($r=0.60$ and 0.75 , respectively), but relationships of Mehlich-I and Bray-I extractable P to yield were negative ($r=-0.83$ and -0.74 , respectively). In the greenhouse study, yield, vegetative P concentration and the total P absorption were effectively predicted by all five methods. In the controlled field experiment, grain yield did not improve with P application, but leaf P content related to extractable P for all but the Mehlich I extraction method (R^2 from 0.57 to 0.70). Extractable P was least related to P application rate with Mehlich I (R^2 of 0.51 compared to 0.96 to 0.99 with other extraction methods). Overall the studies, the PHW and Olsen methods were similar and most effective, the Bray-1 and Mehlich-III methods were less consistent, and the Mehlich-I method was the least consistent of the five extraction methods tested.

Key Words: pressurized hot water (ACP); analysis of soil; Bray-1; phosphorus; Mehlich-I; Mehlich-III; Olsen.

INTRODUCCIÓN

El uso de fertilizantes en el mundo desarrollado decayó en la última década, mientras que su uso en países en vías de desarrollo aumentó exponencialmente en algunos casos el nivel actual de uso en los países desarrollados (Food and Agriculture Organization, 2006). Debido a la preocupación global por la seguridad alimentaria y considerando el impacto positivo de los fertilizantes en el rendimiento de las cosechas (RC), éstos se hicieron altamente disponibles en los países en vías de desarrollo, lo que contribuye a una compensación de las disminuciones dramáticas de la fertilidad de los suelos a largo plazo (Arnason *et al.*, 1981).

La fertilización en la agricultura tropical tiene el potencial de incrementar dramáticamente la producción a causa de los suelos altamente erosionados y las reservas limitadas de nutrientes (Stewart *et al.*, 2005); sin embargo, los aplicados es raramente manejado por recomendaciones derivadas de los análisis de los suelos (AS), lo que lleva al mal uso y asociados riesgos económicos (Chase *et al.*, 1991) y ambientales (Bundy *et al.*, 2001).

La presión para producir alimento en suelos marginales y la importancia de los fertilizantes en mejorar la producción, hace que el acceso a los AS sea fundamental. De todas maneras, se ejecutaron pocas investigaciones para desarrollar y calibrar regímenes de AS en los diferentes suelos y hábitats de los países en vías de desarrollo (Raun y Barreto, 1995; Ryan *et al.*, 2001).

En su lugar, métodos de AS desarrollados para agricultura moderna a gran escala son simplemente adoptados para su uso en países en vías de desarrollo (Ryan *et al.*, 2001). Por ejemplo, el método de extracción de P, Mehlich-I doble ácido fue desarrollado en Carolina del Norte (EE.UU) en suelos muy ácidos con baja capacidad de intercambio catiónico y una variedad de texturas de suelo (Mehlich, 1953); el mismo es utilizado para los diferentes tipos de suelos guatemaltecos (Saín and Martínez, 2004).

Algunas características comunes de los suelos guatemaltecos y de otros países de Centroamérica incluyen: material originado de cenizas volcánicas, plantación de terrenos altamente inclinados y susceptibles a la erosión y una continua explotación de cultivos en tierras marginales (Raun and Barreto, 1995). Trabajos de investigación previos a cargo de Crane *et al.* (2006) analizaron en 111 suelos muestreados por todo Guatemala, alcanzó los siguientes rangos: pH 4,76 a 7,43; materia orgánica

2,3 a 10,8%; carbonatos de calcio 0 a 10%; texturas desde arcillosas (A) hasta arcillo-arenosas (Aa).

La amplia diversidad presente en los suelos sugiere que el método Mehlich-I puede no ser el AS ideal para ser usado en Guatemala, aunque otras alternativas no fueron evaluadas. No obstante, Ramírez *et al.* (1989) realizaron estudios con maní, principalmente en suelos ácidos, los cuales aplicaron dosis de P. Se analizaron con los métodos de extracción Bray-1, Mehlich-1, Morgan y Olsen y los resultados se correlacionaron con los rendimientos del maní. Estas se presentaron significativamente entre los rendimientos, el P extraído y los cuatro extractantes (0,70 a 0,74). Se esperaba que Mehlich-I extrajera P efectivamente, ya que sólo tres de las 44 locaciones del estudio no presentaban suelos ácidos.

De todas maneras, el maíz se cultiva en una distribución de suelos mucho mayor, algunos de los cuales podrían ser alcalinos y otros estudios comparando métodos de extracción de P, no se efectuaron con maíz.

La gran mayoría de la agricultura en Guatemala es de subsistencia a pequeña escala, comúnmente cultivada con maíz, *Zea mays* L., de monocultivo o asociado con frijoles, *Phaseolus vulgaris* L., o calabaza, *Cucurbita* spp. (Saín y Martínez, 2004). Los suelos de estos pequeños campos necesitan AS, pero las circunstancias económicas generalmente impiden su uso. Por lo tanto, hay una gran necesidad de métodos de AS, que sean accesibles, se encuentren disponibles, estén calibrados para la aplicación de fertilizantes en una variedad de tipos de suelo y relacionados con los rindes de cultivos tradicionales.

Para el método de extracción de nutrientes, agua caliente presurizada (ACP) se utilizó para B, Cu, Fe, K, Mn, NO_3^- , NH_4^+ , P, S y Zn, el cual se dispuso de una máquina de café expreso para extraer los nutrientes contenidos en el suelo, evaluándose con varios procedimientos de extracción en un amplio rango de los mismos y demostrándose ser una alternativa práctica en suelos guatemaltecos (Crane *et al.*, 2006). El método es económicamente más accesible para los agricultores de pequeña escala en comparación con otros métodos. El costo total del equipo y los químicos necesarios para analizar los contenidos de N, P, K y pH en el suelo es aproximadamente un décimo del costo para establecer un laboratorio que use procedimientos estándar (Crane *et al.*, 2006).

El procedimiento fue exitosamente implementado en pequeños laboratorios en Marruecos y Guatemala

(Crane *et al.*, 2006). Por su parte, Shiffler *et al.* (2005) encontraron que el método ACP es efectivo para estimar contenidos de B en suelos de los EE.UU. fertilizados con B, además de estar relacionado con el contenido de B, la absorción y el rendimiento (R) de alfalfa *Medicago sativa*. De este modo, estudios vinculados con la extracción de P por medio del método ACP y el R de la cosecha, contenido de nutrimentos y absorción de los mismos bajo dosis de fertilizantes monitoreadas, no fueron reportadas. Igualmente, en Guatemala está ausente una comparación del ACP con Bray-1, Mehlich-I, Mehlich-III y Olsen sobre suelos fertilizados con P.

Se indagó si uno de estos cuatro métodos extrae P, éste fue el Mehlich-I que permitió estimar relaciones entre el rendimiento del maíz y las dosis de P.

El objetivo de este estudio fue estimar el rendimiento de maíz, contenido y la absorción de nutrimentos, calibración de valores extraíbles a niveles conocidos de P aplicado considerado en los métodos ACP, Bray-1, Mehlich-I, Mehlich-III y Olsen. Con esta finalidad se completaron los análisis intensivos de suelos y plantas en campos de ensayo (CE) múltiples, la cantidad de fertilizante con P no fue controlada, así como experimentos de incubación, invernadero y de campo, donde el P aplicado fue controlado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación para el muestreo y análisis

Localidades múltiples: para este estudio se seleccionaron al azar 26 campos sembrados (regiones de Cobán y Chiquimula) y en los mismos se delimitó un área de 15 x 15 m; dentro de éstas se tomaron muestras aproximadamente dos semanas después de la siembra.

Las características físicas y químicas de los suelos variaron en gran manera entre y dentro de las dos regiones. En la región de Cobán presentaron un porcentaje de materia orgánica que varió desde 4,9 a 6,2%, un pH de 5,7 a 5,9 y texturas de franco-arenosas (Fa) a A, mientras que en Chiquimula variaron desde 4,0 a 9,9%, pH de 5,6 a 7,1 y texturas de Aa hasta A (Hunsaker-Alcântara *et al.*, 2007). Los rendimientos reflejaron la variación ambiental y edáfica con grano de maíz variables de 2,5 a 7,1 t.ha⁻¹ (Hunsaker-Alcântara *et al.*, 2007). No fue posible controlar los cultivos de maíz y asignar a los agricultores determinadas variedades de semillas en el estudio de campo de localidades múltiples. Así mismo, se encontró una diversidad genética inherente

en los cultivares. Cerca de la mitad de las plantas de maíz eran variedades de polinización libre y la otra mitad fueron híbridos desarrollados en Guatemala. El espacio entre surcos, las poblaciones de plantas y el uso de fertilizante son decisiones determinadas por los agricultores.

Durante la segunda semana de junio del año 2004, se tomaron 10 muestras a 20 cm de profundidad con una barrena entre las líneas de maíz (con un promedio de 80 cm entre hileras), así como también, muestras adyacentes a las plantas de maíz y la zona donde se aplicó el fertilizante. Uno de estos dos conjuntos se mezclaron separadamente y se submuestrearon dejándolos secar al aire, pasadas por un tamiz (<2 mm) y almacenadas en contenedores hasta el momento de la extracción de P que se describe en la sección titulada "Métodos de extracción".

Campo controlado: en el experimento se establecieron 60 parcelas de 4 x 9 m en un suelo Aa que presentó resultados de P disponible, menor al nivel crítico para maíz de 15 mg.kg⁻¹ (método Olsen) y 10 muestras a 20 cm de profundidad se tomaron al azar dentro de cada parcela el 17 de junio del año 2005, exactamente 30 d después de la fertilización (una lluvia de 40 mm cayó inmediatamente después de la dosis de fertilizante), éstas se mezclaron, submuestrearon y prepararon para su posterior análisis con los suelos del estudio de campos múltiples (excepto la extracción de P por el método Mehlich-III que incluyó también; Mehlich, 1984). Se tomó una segunda muestra de suelo (Ms) a cada parcela al tiempo de la cosecha, dejándose secar al aire, se tamizaron (<2 mm), realizaron la extracción y análisis de P como se describe en la sección titulada "Métodos de extracción".

Incubación e invernadero: en los experimentos se utilizaron dos tipos de suelos, uno de textura A con un pH 5,5 y CIC 22 (montaña) y otro Aa con un pH 7,3 y CIC 31 (valle) según Hunsaker-Alcântara (2007). Éstos se condujeron en el Centro Universitario de Oriente (CUNORI), en Chiquimula, Guatemala. Después de mezclarlos con cinco dosis de P (0, 30, 60, 120 y 240 kg.P.ha⁻¹) y 3 de K (0, 40, y 80 kg.K.ha⁻¹) con un arreglo factorial de 5x3, submuestras de 500 g de cada mezcla con el fertilizante, se colocaron en botellas plásticas tapadas, humedecidas hasta la capacidad de campo e incubadas en un cuarto oscuro a una temperatura ambiente de 27°C ± 3°C (Shiffler *et al.*, 2005). Posteriormente, 14 d después 250 g de suelo se removieron, secados al aire, tamizados y analizados de la misma manera que las Ms de los dos experimentos de campo.

Estos análisis marcaron los niveles de fertilidad al comienzo de los experimentos de invernadero e incubación. Luego de 56 d se tomaron submuestras en el invernadero y en el cuarto de incubación removiendo el suelo restante, en las botellas preparadas se tomó una de cada maceta al tiempo de la cosecha. Éstas se dejaron secar al aire, se tamizaron (< 2 mm) y se realizó la extracción y análisis de P.

Métodos de extracción: la totalidad de los AS se llevaron a cabo en el laboratorio de análisis de suelos y plantas de la Universidad de Brigham Young (Brigham Young University, Provo, Utah) en EE.UU. El P fue extraído por medio de los métodos ACP (Crane *et al.*, 2006), Bray-1 (Bray and Kurtz, 1945), Mehlich-I y II (Mehlich, 1953 y 1984, respectivamente) y Olsen (Olsen *et al.*, 1954). El P fue determinado usando el procedimiento de ácido ascórbico Murphy-Riley (Murphy and Riley, 1962). Todos los suelos fueron analizados con los cinco métodos mencionados anteriormente, exceptuando los de las localidades múltiples. En éstos últimos se utilizó los métodos ACP, Bray-1, Mehlich-III y Olsen.

Diseño experimental y tratamientos

Tratamientos experimentales en el campo, invernadero y botellas de incubación fueron incorporados en diseños de bloques completos al azar, consistentes de cuatro con cinco dosis de P (0, 30, 60, 120 y 240 kg.P.ha⁻¹) y tres dosis de K (0, 40, y 80 kg.K.ha⁻¹) con un arreglo factorial de 5x3 (a causa de la falta de efectos de K con énfasis en P y el hecho de que Bray-1 no se utiliza para extraer K los resultados de K no fueron incluidos). A cada parcela se le aplicó N [urea, CO(NH₂)₂] a una misma dosis de 215 kg.N.ha⁻¹. En el campo se utilizaron como fuentes de N, P, y K, urea de grado comercial, fosfato de diamonio [(NH₄)₂HPO₄] y cloruro de potasio (KCl). Las parcelas de campo fueron fertilizadas manualmente al voleo una semana antes de la siembra. En el invernadero y en los estudios de incubación se usó urea de grado reactivo, fosfato monocálcico [Ca(H₂PO₄)₂H₂O] y KCl como fuentes de nutrimentos.

Los suelos del invernadero y cuarto de incubación fueron fertilizados mezclando cada dosis con 26 kg de suelo (de montaña y valle mezclados separadamente), luego se colocaron cuatro submuestras de 6 kg en macetas y cuatro de 500 g en botellas debidamente tapadas. Los suelos de montaña y de valle recibieron cada uno de los tratamientos asignados al azar dentro de cada bloque. Las unidades experimentales en estos suelos se reasignaron al azar cada dos semanas para minimizar el gradiente de variabilidad ambiental.

Manejo y análisis de plantas

Para el experimento de campo se sembró la semilla del maíz híbrido HB-83 el 27 de mayo 2005, desarrollada para áreas tropicales por el Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA; López, 2002), constituyendo uno de los híbridos más comunes en Guatemala (Fauchère, 2000; Saín y Martínez, 2004). Estas se sembraron en orificios de aproximadamente 2,5 cm de profundidad en hileras de 75 cm de ancho. Las densidades finales consistieron de 52 000 plantas.ha⁻¹ y las macetas del invernadero se plantaron el 19 de julio 2005 con cuatro semillas (el mismo híbrido HB-83) en cada una, otra planta por maceta en el invernadero (la mejor de cada semilla).

La precipitación fue uniforme y generalmente adecuada al campo, pero entre el 16 al 20 de junio 2005 hubo la necesidad de aplicar riegos posteriores con aspersores para mantener un nivel óptimo de humedad durante el período de sequía. En el invernadero las macetas se nivelaron por peso, capacidad de campo y agua corriente. De allí en adelante se pesaron diariamente las seleccionadas al azar y se les agregó la misma cantidad de agua a todas.

En el campo, las malezas se controlaron con el herbicida preemergente Batalla [N-(fósfonometil) glicina] y los herbicidas posemergentes Hedonal [2,4-ácido biclorofenoxiacético] y Paraquat [bicloruro 1,1-dimetil 4,4-bipiridilio], así como también, se aplicó desmalezamiento manual con regularidad. El insecticida Thiodan [6,7,8,9,10,10-Hexaclaro-1,5,5a,6,9,9a-Hexahidro-6,9-Metano-2,4,3-Benzodioxatiopina-3-Óxido] se utilizó para controlar el gusano de maíz en el campo y Volaton [2-Dietoxifosfinotioiloximino-2-Fenil-acetonitrilo] aplicándose para controlar el gusano barrenador del maíz en el campo e invernadero.

Igualmente, muestras de tejidos foliares provenientes de 10 hojas (una hoja directamente debajo y opuesta a la espiga primaria) tomadas al inicio de la inflorescencia en el campo controlado y el de localidades múltiples. En éstos se tomaron muestras de 8 m de dos surcos centrales, dentro del área de 15 x 15 m de cada siembra con fechas de muestreo que variaron en cada región a causa de los diferentes días de plantación. En el estudio controlado, las muestras se tomaron de dos hileras centrales en las parcelas de 4 x 9 m el 19 de julio de 2005 (53 d después de la siembra).

Todas las muestras de tejido fueron secadas en un horno de aire forzado por un mínimo de 48 horas a 65°C, pesadas, molidas (< 1 mm), digeridas por medio de ácido nítrico-perclórico espolvoreado y humedecido (Johnson

and Ulrich, 1959) y analizadas para detectar P utilizando plasma conectado por inducción ICP (por sus siglas en inglés; IRIS Intrepid II XSP, Thermal Elemental, Franklin, MA). El N fue interpretado utilizando una analizadora total de N (FP2000 LECO Corporation, St. Joseph, MI).

El grano del maíz se cosechó a mano, alcanzándose la madurez fisiológica (después de la formación de la capa oscura). Las plantas de maíz y las espigas se contaron de una parcela experimental de dos surcos centrales de 8 m de largo de cada área de 15 x 15 m en el ensayo de campo de localidades múltiples, y de cada área de 4 x 9 m en el experimento de campo (Rehm and Lamb, 2004). Se registra el peso húmedo total de las mazorcas, se toma una submuestra de 10, las cuales son pesadas y desgranadas. De los granos obtenidos se toma una submuestra, se pesa y se seca en un horno (Pilbeam *et al.*, 2002).

La submuestra de granos se molió (< 1 mm) y fue digerida por medio de ácido nítrico-perclórico en polvo humedecido para su posterior análisis para detectar P utilizando ICP. El N se usa una analizadora total de N. En el estudio de invernadero la planta completa se cosechó al comienzo de la inflorescencia (56 d), cortándola al nivel del suelo (Chien *et al.*, 1987). Se secaron en un horno durante un mínimo de 48 h a 65°C, luego fueron molidas y analizadas para determinar niveles de P, K, y N.

Análisis estadístico

Toda la información obtenida de los AS y plantas estuvo sujeta a varios procedimientos de análisis estadísticos, utilizando el Statistical Analysis Software (SAS, 2001), incluyendo correlación, regresión y análisis de varianza. Este último se realizó con los modelos apropiados, basados en los diseños originales. Los análisis de correlación y regresión fueron completados usando los promedios apropiados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estudio de campo de localidades múltiples

El análisis de la información combinada de todas las localidades reveló pocas relaciones significativas entre la extracción de P y NO_3^- , por medio de varios métodos de extracción, rendimiento (R) y concentración de nutrientes en las hojas. Debido a que hubo una varia-

ción amplia en el R y las características de los suelos, la información se analizó agrupándola en localidades de bajo (< 5,5 t.ha⁻¹) y alto (> 5,5 t.ha⁻¹) R. Estos análisis arrojaron relaciones significativas.

Los R del maíz se relacionaron positivamente con el P extraído por medio de Olsen y agua caliente presurizada (ACP) en localidades de alto R. De hecho, las extracciones de P por medio de Mehlich-I y Bray-1 resultaron relaciones significativas ($P < 0,05$) negativas con respecto al R (Cuadro 1, $r = -0,83$ y $-0,74$, respectivamente). Esto último puede deberse al amplio rango de características que se encontraron en los suelos estudiados, haciendo que estos dos métodos de extracción desarrollados para suelos ácidos sean inefectivos (Enwesor, 1977; Fixen and Grove, 1990).

Otros estudios afirman que el método Olsen es más aplicable para diferentes tipos de suelos que Mehlich-I o Bray-1 (Mallarino y Blackmer, 1992). Crane *et al.*, 2006, observó relaciones similares en Guatemala en una variedad de suelos aún más amplia con el P extraíble, por medio de ACP y Olsen están más correlacionado con Bray-1 y finalmente la relación más pobre fue la extracción por medio de Mehlich-I.

Los R en las áreas de alto R se correlacionaron significativamente al porcentaje de N en las hojas de maíz obtenidas al comienzo de la inflorescencia (Cuadro 1; $r = 0,83$). El N de las hojas en 7 de 10 localidades de alto R estuvo arriba de 2,7% de N, el nivel establecido como suficiente y el N de las hojas en las localidades de menor R estuvo por debajo de 2,7% (Mills y Jones, 1996). Esto confirma la importancia de los nutrientes adecuados con N para evitar la restricción de la respuesta de P en el maíz.

En las 16 localidades de bajo R, el P extraíble por medio de ambos métodos Olsen y ACP se relacionaron significativamente ($P < 0,05$) al contenido de P en las hojas del maíz (Cuadro 1), pero la relación no se encontró altamente relevante ($r = 0,48$ y $0,56$, respectivamente). Alrededor de la mitad de las 16 concentraciones de P en las hojas estuvieron al ras o por encima del nivel suficiente de 0,25% de P en la hoja de la mazorca (Mills y Jones, 1996).

La relación entre el R y el NO_3^- extraído por medio de ACP fue significativo en las localidades de bajo R (Cuadro 1; $r = 0,61$) y confirmado con una relación similar con la extracción de CTA con agua ($r = 0,63$, resultados no incluidos).

Los resultados del estudio de campo de localidades múltiples sugieren que los métodos de extracción ACP y Olsen son más prometedores que P, Bray-1 y Mehlich-I, donde existe cierta habilidad para estimar los R del grano de maíz con alto R a pesar del amplio rango de variedades híbridas y nativas que se cultiva en Guatemala. Por lo tanto, se justifica la investigación adicional bajo condiciones de aplicación de P controladas en el campo y en invernadero para comparar las extracciones por medio de ACP y Olsen con otros métodos.

Experimentos de invernadero

Se observaron incrementos significativos para la variable R de biomasa del maíz, concentración y absorción total de P, donde el maíz se cultivó en dos tipos de suelo en el invernadero por 56 d (cerca de la etapa de floración), al tiempo que se incrementó la fertilización de P, siendo las relaciones altamente estimables (R^2 de 0,90, 0,98 y 0,99, respectivamente). Así mismo, aún las vinculaciones más insignificativas entre el R y el índice de P, o el R y el P extraíble por medio de ACP fueron excelentes. La concordancia entre el P extraíble y el R del maíz estuvieron igualmente definidas para los métodos de extracción ACP, Olsen, Bray-1 y Mehlich-III (Cuadro 2). Las relaciones entre el P extraíble y la concentración, como también entre el P extraíble y la absorción total fueron excelentes en todos los métodos (Cuadro 2).

La concentración promedio de P en el maíz a altas dosis de P alcanzaron la concentración comúnmente aceptable

de 0,3%, otra reportada para los tallos y hojas de plantas (raíces no incluidas) a una altura de 30 cm, estuvieron menos maduras las cosechadas en este experimento (Mills y Jones, 1996).

Algunos investigadores proponen que la absorción de nutrimentos o la concentración de los mismos son estimables de medición que el R durante el desarrollo de la metodología de análisis de suelo, información obtenida que respalda esta hipótesis (Mills y Jones, 1996).

Por lo tanto, con base a la información del invernadero, el método Mehlich-I fue el indicador menos confiable del R, aunque produjo relaciones significantes para todos los parámetros y ACP consistentemente confiable, como otros métodos efectivos de extracción de P que se probaron.

Incubación. Las relaciones entre los índices de P aplicado y de P extraíble con varios métodos altamente significativo (R^2 entre 0,98 y 0,99). La comparación de los niveles de P extraíble por medio de ACP al comienzo (14 d) y al final (56 d) de los experimentos del invernadero y de incubación revela un impacto definitivo de la absorción de P por parte del maíz en suelos del invernadero y en cada uno de los 5 niveles de P para P extraíble por medio de ACP (ver Figura). Las disminuciones fueron mayores entre el P extraíble por medio de ACP inicial y final a la vez que el índice de P aumentaba. Existe poca evidencia de la fijación de P, excepto una pequeña fijación a índices de P de 120 y 240 kg.ha⁻¹.

CUADRO 1. Coeficientes de correlación (valores de r) para las relaciones significativas en el experimento de campo de múltiples localidades. La cosecha de maíz se obtuvo al tiempo de madurez fisiológica y contenidos de N y P en tejidos foliares se lograron al comienzo de la inflorescencia.

Localidades	Valores de r asociados con las ecuaciones de regresión que definen las relaciones		
		Rendimiento de maíz	P en hojas de maíz
10 de alto rendimiento	P Extraíble por ACP	+0,60	NS1
	P Extraíble por Olsen	+0,75	NS
	P Extraíble por Mehlich-I	-0,83	NS
	P Extraíble por Bray-1	-0,74	NS
	N en hojas de maíz	+0,83	NS
16 de bajo rendimiento	NO ₃ -N Extraíble por ACP	+0,61	NS
	P Extraíble por ACP	NS	+0,48
	P Extraíble por Olsen	NS	+0,56

CUADRO 2. Las relaciones y valores de R^2 entre el P extraído por los cinco métodos: a. el rendimiento completo de la planta (g.maceta^{-1}); b. concentración de P en el tejido foliar (% materia seca); c. la absorción total de P (contenido de P x rendimiento; g.maceta^{-1}) en el invernadero. Los valores que se usaron para establecer relaciones son el promedio de dos suelos, tres tratamientos de K y cuatro réplicas.

Método de extracción de P	R^2	Ecuación
-----Rendimiento-----		
Agua Caliente Presurizada	0,89	$Y=13,0 + 3,52X - 0,107X^2$
Olsen	0,87	$Y=9,05 + 1,33X - 0,0136X^2$
Mehlich-III	0,84	$Y=10,8 + 1,01X - 0,00814X^2$
Mehlich-I	0,80	$Y=3,55 + 2,71X - 0,0476X^2$
Bray-1	0,91	$Y=7,86 + 1,54X - 0,0176X^2$
-----Concentración de P en plantas-----		
Agua Caliente Presurizada	0,97	$Y=0,161 + 0,0969X - 0,000197X^2$
Olsen	0,98	$Y=0,150 + 0,00352X - 2,34X^2$
Mehlich-III	0,97	$Y=0,152 + 0,00285X - 1,60 e^{-5}X^2$
Mehlich-I	0,98	$Y=0,124 + 0,00835X - 0,000114X^2$
Bray-1	0,97	$Y=0,149 + 0,00392X - 2,85 e^{-5}X^2$
-----Absorción de P-----		
Agua Caliente Presurizada	0,99	$Y= 0,010 + 0,010X - 0,000267X^2$
Olsen	0,98	$Y=-0,000793 + 0,00382X - 3,29 e^{-5}X^2$
Mehlich-III	0,97	$Y= 0,00274 + 0,0030X - 2,09 e^{-5}X^2$
Mehlich-I	0,95	$Y=-0,0218 + 0,00829X - 0,000130X^2$
Bray-1	0,99	$Y= 0,00336 + 0,00437X - 4,19 e^{-5}X^2$

Estas relaciones para absorción y fijación arrojaron similitud en los suelos de montaña y de valle, cuyos valores presentados son el promedio de los dos suelos. Este resultado fue relevante porque reportó que los suelos de montaña en esta región exhiben una alta capacidad de fijación de P (Bueso-Campos, M.L., reportes no publicados, 2005; Raun y Barreto, 1995). Las condiciones de temperatura y la humedad se mostraron ideales para promover la fijación durante la incubación ($27\pm 3^\circ\text{C}$ y la capacidad del campo) y los suelos del invernadero por su parte húmedos y cálidos.

Ambos suelos contienen altas cantidades de A, mientras que el de montaña contiene aluminio intercambiable ($0,8 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$) con un pH de 5,5 y el de valle contiene un exceso de CaCO_3 (2,1%) con un pH de 7,3. Cada uno de estos factores mejora la fijación de P (Havlin *et al.*, 2005).

Experimento de campo

No obstante, que los R de campo variaron de 2,2 a $5,2 \text{ t.ha}^{-1}$, no se pudieron establecer relaciones significativas entre el R y los niveles de P extraíble del suelo con ningún método de extracción (resultados no incluidos), lo que resulta sorprendente ya que las mismas dosis de aplicación al mismo suelo en el invernadero respondieron a la aplicación de P.

Es inusual que el fertilizante tenga un impacto sobre el desarrollo vegetativo pero no en el R de grano y al parecer, el rápido crecimiento vegetativo estuvo relacionado con las dosis de P ($R^2=0,61$). El contenido de P en las hojas aumentó con la dosis de P ($R^2=0,61$) y otras concentraciones de nutrimentos en las hojas se encontraron a niveles críticos reportados o por encima de los mismos (Mills and Jones, 1996; Ramírez, 1981).

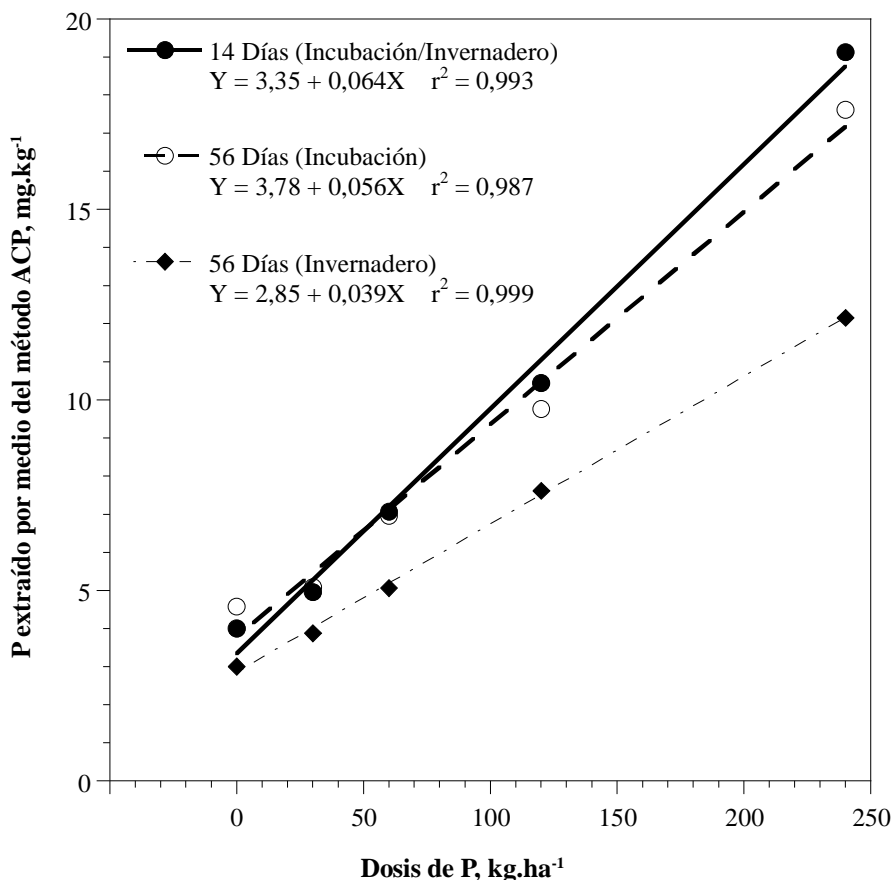


FIGURA. La relación entre las dosis de aplicación de P y el P extraíble por medio del método ACP al inicio de los experimentos de incubación e invernadero (muestreados 14 d después de la fertilización) y muestreado 56 d después de la fertilización (las muestras de incubación fueron tomadas de los contenedores almacenados, y las muestras del invernadero fueron tomadas de las macetas). Los valores utilizados para establecer las relaciones son el promedio de dos tipos de suelos y tres tratamientos de K.

Adicionalmente, hubo control de malezas al comienzo, durante la temporada y fertilización auxiliar con base a N. La distribución consistente de lluvia y la aplicación de riegos durante un solo período de sequía debieron minimizar los impactos del ambiente en el R.

La respuesta de este último pudo ser más común en el invernadero que en el campo, debido al mayor contacto entre las raíces y los nutrientes, porque éstos en el invernadero son capaces de remover una cantidad mayor en comparación con las raíces en el campo, a causa del volumen limitado del suelo en las macetas (Ussiri *et al.*, 1998).

También, el experimento del invernadero fue cosechado cerca del final de la etapa vegetativa en lugar de la etapa reproductiva, en un período en el campo cuando la aplicación de P tuvo un impacto en el crecimiento. Sin

embargo, no se recopilaron datos en el campo durante esa etapa. El R promedio obtenido ($5,7 \text{ t.ha}^{-1}$) en las parcelas de alto R se encuentran en los mismos parámetros que se reportaron en otros lugares para este híbrido (Fauchère, 2000).

De todas formas, aunque ampliamente cultivado, el maíz híbrido HB-83 carece del potencial genético para responder a altos niveles de P para la producción de grano. La constitución genética tiene un rol importante en el desarrollo de la capacidad de un cultivar para responder a las aplicaciones de fertilizantes y es un factor que se debe prestar atención en los países en vías de desarrollo (Havlin *et al.*, 2005). De cualquier forma, no se pueden descartar por completo condiciones externas que pueden afectar la capacidad de respuesta del cultivo a las dosis de fertilizante (Viets *et al.*, 1954).

Hubo mejoras estimables y significativas en el contenido foliar de P con el incremento de las dosis de la aplicación de P ($R^2=0,61$), pero todas las concentraciones estuvieron dentro del rango de suficiencia ($> 0,25\%$) para maíz (Mills y Jones, 1996). El incremento de P foliar a causa del aumento de la dosis de fertilizante con P se vio reflejado en el P extraíble por medio de ACP ($r^2=0,57$) y por tres de los cuatro métodos para extraer P (Cuadro 3).

Únicamente el método Mehlich-I falló en extraer P de los suelos en relación a la concentración de P en plantas. Considerando que el R de maíz generalmente está relacionado con el contenido de P en las hojas o la absorción de P (Viets *et al.*, 1954), esta falta de relación del método Mehlich-I evidencia que no es el más apropiado para la determinación de P en los suelos de Guatemala (Pérez *et al.*, 2003).

La correlación entre el índice de P aplicado en el campo y P extraíble por medio de ACP fue excepcional

($R^2=0,985$) y se observó una fuerte relación con todos los métodos de extracción excepto Mehlich-I (Cuadro 3). Éstas no son tan fuertes como se mostraron en los estudios del invernadero y de incubación (R^2 entre 0,98 y 0,99) donde todos los métodos de extracción, incluyendo Mehlich-I produjeron correlaciones estimables.

Por naturaleza los experimentos de campo son más variables que los hechos en invernadero o incubación, donde se mezclan cuidadosamente cantidades de suelos relativamente pequeñas, mejorando la distribución del fertilizante en el reducido espacio, forzando a las raíces a realizar una mayor extracción de nutrientes y permitiendo un mejor contacto entre ambos. La escasa relación entre el P extraíble por el método Mehlich-I y el índice de P en el campo ($R^2=0,51$) comparada con otros métodos de extracción ($R^2=0,96$ a 0,99) demuestra que Mehlich-I no es el más adecuado para los suelos de Guatemala.

CUADRO 3. Las relaciones entre P extraído por los cinco métodos y a) el contenido de P en las hojas (R^2) y b) la aplicación de dosis de P (R^2). Los valores usados para establecer las relaciones representan el promedio de tres tratamientos de K y cuatro réplicas.

Método de extracción	Parámetro regresado	Ecuación
-----Contenido de P en las hojas-----		
	R²	
Agua caliente presurizada	0,57	$Y=0,289 + 0,00153X + 0,68e^{-5}X^2$
Olsen	0,70	$Y=0,219 + 0,00537X - 6,64e^{-5}X^2$
Mehlich-III	0,63	$Y=0,275 + 0,00367X - 5,71e^{-5}X^2$
Mehlich-I	N.S.	-----
Bray-1	0,59	$Y=0,295 - 0,000319X + 1,90e^{-5}X^2$
-----Índice de aplicación de P-----		
	R²	
Agua caliente presurizada	0,99	$Y=5,73 + 0,0601X$
Olsen	0,96	$Y=16,1 + 0,118X$
Mehlich-III	0,99	$Y=6,18 + 0,0576X$
Mehlich-I	0,51	$Y=14,4 + 0,0275X$
Bray-1	0,99	$Y=24,9 + 0,111X$

CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos en los estudios confirman que el método de extracción de P y ACP, refleja adecuadamente las dosis de P aplicadas a los suelos e ilustran que el método ACP puede ser usado de manera eficaz para estimar el rinde de maíz, concentración de P y absorción en suelos con diferentes niveles de reserva de P.
- El método ACP es igual o mejor que el método Olsen mientras que Bray-1 y Mehlich-III fueron menos consistentes en relacionar la extracción de P en el suelo, con el rinde y los parámetros de nutrimentos medidos en estos experimentos.
- Todos los métodos alternativos de extracción fueron consistentemente mejores que el método Mehlich-I. Los resultados que confirman previa información en un espectro mayor de suelos guatemaltecos que la extracción de P por Mehlich-I ampliamente usada en Guatemala necesita ser reemplazada con otro método de extracción más adaptado a los diversos suelos inherentes a la región.
- Se recomiendan estudios de campo adicionales en un rango mayor de suelos para definir mejor las relaciones entre las extracciones de P, el rendimiento de maíz y desarrollar los fertilizantes, especialmente, para los métodos ACP y Olsen, ya que muestran el mayor potencial para reemplazar la extracción por el método Mehlich-I.
- El método ACP es definitivamente una opción viable para reemplazar el método Mehlich-I, recomendando dosis de P en Guatemala y localidades con suelos similares.

AGRADECIMIENTO

Por la ayuda técnica brindada y la participación incondicional de Angela Rampton, Fredy Coronado, Dany Arbizú, numerosos estudiantes y docentes de Guatemala. También a los comentarios y sugerencias de los revisores.

BIBLIOGRAFÍA

Arnason, T., J. D. H. Lambert, J. Gale, J. Cal and H. Vernon. 1981. Decline of soil fertility due to intensification of land use by shifting agriculturists in Belize, Central America. *Agro-Ecosystems* 8:27-37.

- Bray, R. H. and L. T. Kurtz. 1945. Determination of total organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* 59:39-45.
- Bundy, L. G., T. W. Andsraski and J. M. Powell. 2001. Management practice effects on phosphorus losses in runoff in corn production systems. *J. Environ. Qual.* 30:1 822-1 828.
- Chase, C., M. Duffy, J. Webb and R. Voss. 1991. An economic assessment of maintaining high phosphorus and potassium soil test levels. *Am. J. of Alt. Ag.*, 6:83-86.
- Chien, S. H., F. Adams, F. E. Khasawneh and J. Henao. 1987. Effects of combinations of triple superphosphate and a reactive phosphate rock on yield and phosphorus uptake by corn. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 51:1 656-1 658.
- Crane, K. S., B. L. Webb, P. S. Allen and V. D. Jolley. 2006. Simplified soil analysis procedure for use in small-scale agriculture. *Commun. Soil. Sci. and Plant Anal.* 37:993-1 010.
- Enwezor, W. O. 1977. Soil testing for phosphorus in some Nigerian soils: I. Comparison of methods of determining available phosphorus in soils of Southeastern Nigeria. *Soil Sci.* 123:48-53.
- Fauchère, J. M. F. 2000. Technological gap for maize (*Zea mays* L.) cultivation in the Polochic watershed of Guatemala. Unpublished Doctor of Natural Sciences. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- Fixen, P. E. and J. H. Grove. 1990. Testing soils for phosphorus. **In:** R.L. Westerman (ed.) *Soil testing and plant analysis*. SSSA, Madison, WI. p. 141-180. Disponible es: from <http://apps.fao.org>
- Havlin, J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale and W. L. Nelson. 2005. *Soil Fertility and Fertilizers an Introduction to Nutrient Management (Seventh ed.)*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Heckman, J. R., W. Jokela, T. Morris, D. B. Beegle, J. T. Sims, F. J. Coale, S. Herbert, T. Griffin, B. Hoskins, J. Jemison, W. M. Sullivan, D. Bumbla, G. Estes and W. S. Reid. 2006. Soil test calibration for predicting corn response to phosphorus in the Northeast USA. *Agron. J.* 98:280-288.

- Hunsaker-Alcántara, H. M., V. D. Jolley, B. L. Webb, P. S. Allen, R. D. Horrocks and M. L. Bueso Campo. 2007. Predicting maize yield, nutrient concentration and uptake in P and K fertilized soils: Pressurized hot water and other alternatives to Mehlich I extraction in Guatemala soils. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 38:1 815-1 839.
- Johnson, C. M. and A. Ulrich. 1959. II. Analytical Methods for Use in Plant Analysis. *Calif. Agric. Exp. Stn. Bull.* 766:30-33.
- López, M. R. F. 2002. El cultivo del maíz en Guatemala, una guía para su manejo agronómico. *Inst. Cienc. Tecnol. Agric.* 1:45.
- Mallarino, A. P. and A. M. Blackmer. 1992. Comparison of methods for determining critical concentrations of soil test phosphorus for corn. *Agron. J.* 84:850-856.
- Mehlich, A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. (Extractor de prueba de suelo Mehlich 3: Una modificación al extractor Mehlich 2) *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 15:1 409-1 416.
- Mills, H. A. and J. B. Jones Jr. 1996. *Plant Analysis Handbook II. (Manual de Análisis de Plantas II)* Athens, Georgia: MicroMacro Publishing, Inc.
- Murphey, J. and J. P. Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27:31-36.
- Olsen, S. R., C. V. Cole, F. S. Wantanabe and L. A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Department of Agriculture. Cir. 939, U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Pérez, O., M. Melgar and I. Lazcano-Ferrat. 2003. Phosphorus fertilization and phosphorus-extraction method calibration for sugarcane soils. *Better Crops Int.* 17:26-29.
- Pilbeam, C. J., P. J. Gregory, B. P. Tripathi and R. C. Munankarmy. 2002. Fate of nitrogen-15-labelled fertilizer applied to maize-millet cropping systems in the mid-hills of Nepal. *Biol. Fertil. Soils.* 35:27-34.
- Ramírez, R. 1981. Nutrición del maíz en Venezuela. IV. Valores Standard y adecuados de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio para interpretación de análisis foliar en maíz. *Agronomía Trop.* 30:125-133.
- Ramírez, R., J. Tenías, L. C. de Silva, T. Rodríguez y A. Chirinos. 1989. Calibración de cuatro métodos de análisis de suelo con la respuesta del maní a la fertilización con fósforo. *Agronomía Trop.* 39:5-21.
- Raun, W. R. and H. J. Barreto. 1995. Regional maize grain yield response to applied phosphorus in Central America. *Agron. J.* 87:208-213.
- Rehm, G. W. and J.A. Lamb. 2004. Impact of banded potassium on crop yield and soil potassium in ridge-till planning. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:629-636.
- Ryan, J., G. Estefan and A. Rashid. 2001. *Soil and plant analysis laboratory Manual International Center for Agriculture Research in the dry area (2nd ed.)*. Aleppo, Syria.
- Saín, G. and J. Martínez. 2004. Adoption and use of improved maize by small-scale farmers in Southeast Guatemala. México: CYMMYT. Working Paper 99-04:1-25.
- Shiffler, A. K., V. D. Jolley, J. E. Christopherson, B. L. Webb and V. A. Habey. 2005. Pressurized hot water and DTPA-sorbitol as viable alternatives for soil boron extraction. II. Correlation of soil extraction to responses of boron-fertilized alfalfa. *Común. Soil. Sci. Plant Anal.* 36:2 189-2 207.
- Stewart, W. M., D. W. Dibb, A. E. Johnston and T. J. Smith. 2005. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Agron. J.* 97:1-6.
- Ussiri, D. A., P. N. S. Mnkeni, A. F. MacKenzie and J. M. R. Semoka. 1998. Soil test calibration studies for formulation of phosphorus fertilizer recommendations for maize in Morogoro District, Tanzania. II. Estimation of optimum fertilizer rates. *Commun. Soil. Sci. Plant Anal.* 29:2 815-2 828.
- Viets, F. G. Jr., C. E. Nelson and C. L. Crawford. 1954. The relationships among corn yields, leaf composition and fertilizers applied. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 19:297-301.