

Evaluación de Líneas de Habichuelas (*Phaseolus vulgaris L.*) en un Suelo de Corozal Bajo Condiciones de Acidez y Toxicidad de Aluminio

Por:

Pedro E. Labayen Gandía

Tesis sometida en cumplimiento parcial del requisito para grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

en

CIENCIAS DE SUELOS

UNIVERSIDAD DE PUERTO RICO
RECINTO UNIVERSITARIO DE MAYAGÜEZ
2007

Aprobado por:

James S. Beaver, Ph.D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Félix R. Román, Ph.D.
Miembro, Comité Graduado

Fecha

Miguel A. Muñoz, Ph.D.
Presidente, Comité Graduado

Fecha

Miguel A. Muñoz, Ph.D.
Director del Departamento

Fecha

Juan Ortiz López
Representante de Estudios Graduados

Fecha

Abstract

Soil acidity and aluminum toxicity are major problems in bean production in the tropics. This research studied the effect of pH and exchangeable Al^{3+} on grain and dry matter yield of the variety 'Morales', planted in a Corozal soil (Ultisol). The residual value of seed yield, obtained in the analysis of variance, was used to estimate a size sample for particular LSD. The range of soil exchangeable Al^{3+} studied was between $0.08 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (pH 6.88) to $3.84 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (pH 4.78). Also, sixty eight lines of black beans and seventy two lines of small red beans from Central America were evaluated in plots with a soil exchangeable Al^{3+} content of $1.84 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ and $0.32 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectively. The mean yield of the variety 'Morales' were 890 kg ha^{-1} when soil pH was 4.78 and $1,279 \text{ kg ha}^{-1}$ when soil pH was 5.17. This difference in pH resulted in a decrease in exchangeable Al^{3+} concentration from $3.84 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ to $1.67 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. No significant differences in yield were observed between treatments. The seed yield of 'Morales' decreased when the pH increased above 5.17 but this difference in yield wasn't statistically significant. In another time of the year a second experiment with Morales showed no significant differences in the seed yield between the highest level of exchangeable Al^{3+} ($3.44 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) and the other levels. Foliar analysis indicated that there was less absorption of calcium and higher absorption of aluminum in the plants as soil exchangeable Al^{3+} increased. However no differences were observed in nutrients foliar content. The black bean breeding lines that produced the greatest seed yield were: MEN 2204-39 ($2,900 \text{ kg ha}^{-1}$), MER 2222-48 ($2,650 \text{ kg ha}^{-1}$), and PR 0333-121 ($2,183 \text{ kg ha}^{-1}$). The small red bean breeding lines with the greatest seed yield were: MFP 2241-33 ($2,417 \text{ kg ha}^{-1}$), MR 13425-57-1 ($2,950 \text{ kg ha}^{-1}$), and MFP 2241-59 ($2,333 \text{ kg ha}^{-1}$).

Resumen

La acidez de los suelos y la toxicidad de aluminio son dos principales problemas en la producción de habichuela en los trópicos húmedos. En este experimento se estudió el efecto de varios niveles de pH y Al^{3+} intercambiable en la producción de grano y materia seca de la variedad de habichuela ‘Morales’ sembrada en un suelo de la serie Corozal (Ultisol). Se utilizó el valor del residual en el rendimiento de semilla, obtenido en el análisis de varianza, para estimar un tamaño muestral para un DMS particular. El rango promedio de los niveles de Al^{3+} intercambiable estudiados fue entre $0.08 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (pH 6.88) hasta $3.84 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (pH 4.78). Además, se evaluó un grupo de líneas de habichuelas negras en un suelo Corozal con una concentración de Al^{3+} intercambiable de $1.84 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (pH 5.2). Se evaluó otro grupo de habichuelas rojas con un contenido de Al^{3+} intercambiable de $0.32 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (pH 6.4), provenientes de Centroamérica. El rendimiento de semilla de ‘Morales’ fue de 890 kg ha^{-1} y $1,279 \text{ kg ha}^{-1}$ con un pH de 4.78 y 5.17, respectivamente. Esta diferencia en pH resultó en una disminución del contenido de Al^{3+} intercambiable del suelo de $3.84 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ a $1.67 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. En este ensayo no se observaron diferencias significativas entre tratamientos. El rendimiento de semilla de la variedad ‘Morales’ fue menor al aumentar el pH sobre 5.17 pero esta diferencia no fue estadísticamente significativa. En un segundo ensayo con la variedad Morales en otra época del año no se observaron diferencias significativas en el rendimiento de semilla entre el nivel promedio más alto de Al^{3+} intercambiable ($3.44 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) y los demás niveles. Se analizó además el contenido nutricional y de aluminio en las hojas de ‘Morales’. Este análisis indicó una menor absorción de calcio al aumentar el contenido de Al^{3+} intercambiable en el suelo pero no se observaron diferencias en el contenido

foliar de aluminio. Las líneas negras que produjeron los mayores rendimientos de semilla fueron: MEN 2204-39 (2,900 kg ha⁻¹), MER 2222-48 (2,650 kg ha⁻¹) y PR 0333-121 (2,183 kg ha⁻¹). Las líneas rojas con mayores rendimientos de semilla fueron: MFP 2241-33 (2,417 kg ha⁻¹), MR 13425-57-1 (2,950 kg ha⁻¹) y MFP 2241-59 (2,333 kg ha⁻¹).

DEDICATORIA

Esta investigación está dedicada a:

Mis padres; Pedro S. Labayen y María del C. Gandía, por el apoyo incondicional que me brindaron. A Naydimar Abreu, por darme ánimos para poder completar este trabajo de forma satisfactoria. Gracias a Dios por permitir que estas excelentes personas sean parte de mi vida, para darme la fuerza y el deseo de poder seguir trabajando en este mundo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios,

Mis padres, María del C. Gandía y Pedro S. Labayen

Naydimar Abreu

Dr. Miguel A. Muñoz

Dr. James S. Beaver

Dr. Félix Román

Dr. John Fernández Van Cleave

Dra. Delsie Gandía

Dr. Ricardo Goenaga

M.S. Agenol González

M.S. Ulises Chardón

M.S. Marcos Salicetti

M.S. Miguel Arango

Emmanuel Feliciano

Katherine Quiñones

A todos los colaboradores de la Subestación Experimental Agrícola de la Universidad de

Puerto Rico, en Corozal

TABLA DE CONTENIDO

	Página
Lista de Tablas.....	viii
Lista de Figuras.....	ix
Introducción.....	1
Justificación.....	3
Objetivos.....	7
Revisión de Literatura.....	8
Materiales y Métodos.....	17
Resultados y Discusión.....	22
Conclusión y Recomendaciones.....	40
Referencias.....	43

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1	Análisis de varianza del rendimiento de semilla de la primera evaluación de la variedad 'Morales'	22
2	pH, Al ³⁺ intercambiable del suelo y parámetros de rendimiento de semilla de la primera evaluación de la variedad 'Morales' en el suelo Corozal.....	23
3	Análisis de suelo de la serie Corozal después de la primera siembra.....	26
4	pH, Al ³⁺ intercambiable del suelo y parámetros de rendimiento de semilla de la segunda evaluación de la variedad 'Morales' en el suelo Corozal.....	29
5	Análisis de varianza del rendimiento de semillas de la segunda evaluación de la variedad 'Morales'	30
6	Análisis foliar de la variedad 'Morales'	31
7	Rendimiento de semilla de las líneas negras.....	36
8	Rendimiento de semilla de las líneas rojas.....	38
9	Análisis de varianza del rendimiento de semilla de las líneas negras y rojas.....	39

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Relación entre la concentración de aluminio intercambiable en el rendimiento de semilla de la variedad 'Morales' en un suelo Corozal.....	24
2	Aluminio intercambiable a diferentes valores de pH en el suelo Corozal.....	27
3	Concentración de calcio a diferentes valores de pH en el suelo Corozal.....	28
4	Tamaño de muestra para un DMS de 300.....	32
5	Número de muestras para obtener un nivel DMS específico.....	33

Introducción

La infertilidad y la acidez del suelo son dos de las principales limitaciones en la producción de cultivos en suelos altamente meteorizados de las zonas tropicales y templadas (Sánchez, 1976). La mayoría de los suelos ácidos tienen un pH de 4.0 a 6.0 y un rango amplio en las concentraciones de Al^{3+} intercambiable. La acidez de los suelos ocurre de manera natural y por la contribución del ser humano.

El hombre contribuye significativamente a la acidez del suelo mediante aplicaciones de fertilizantes nitrogenados (Urea, NH_3 anhydro, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y NH_4Cl) utilizados en la agricultura. Estos fertilizantes, al entrar en contacto con el suelo liberan H^+ como resultado del proceso de nitrificación. Además, gases como el SO_2 y NO_x que son liberados por las industrias, reaccionan con el agua para formar la lluvia ácida (Hue, 2003).

El problema principal de los suelos ácidos utilizados en la agricultura es la alta saturación de Al^{3+} intercambiable. La disminución del pH en el suelo a valores menores de 5.5 causa que el aluminio precipitado se vuelva soluble ($\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+ = \text{Al}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$) pudiendo ser absorbido por las plantas. Cuando las plantas entran en contacto con Al^{3+} en solución se inhibe la división y elongación celular. Esto afecta el sistema de raíces y evita que las plantas puedan obtener suficiente agua y nutrimentos del suelo (Rout et al., 2001).

Muchas de las investigaciones realizadas con habichuela en suelos ácidos demuestran que utilizar carbonato calizo para aumentar el pH del suelo aumenta los rendimientos de semilla del cultivo (Buerkert et al., 1990). En los casos en que el

material de encalado no está disponible o es muy costoso, se puede reducir el efecto tóxico del aluminio incorporando materiales orgánicos al suelo. Los ácidos orgánicos de bajo peso molecular y los materiales húmicos, forman compuestos en forma de quelatos con el aluminio evitando que sea tóxico para las plantas (Haynes y Mokolobate 2001).

Otra alternativa es utilizar líneas de habichuela que sean tolerantes a suelos ácidos con toxicidad de aluminio (Rao et al., 2002). La tolerancia a toxicidad de Al^{3+} se asocia a exudación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular como citrato, malato y oxalato a través de la raíz. Esta es una forma práctica y económica de disminuir el problema de toxicidad de aluminio en éste y otros cultivos.

Justificación

La habichuela es una de las más importantes leguminosas comestibles en el mundo y parte importante en la dieta de muchas personas ya que provee proteínas, vitaminas, minerales y fibra (Smith y Goenaga, 2005). Muchos de los suelos disponibles para la producción de habichuela son muy ácidos, con toxicidad de aluminio, dificultando una producción óptima (Goenaga y Smith, 2002).

Los suelos ácidos con alta capacidad de fijar fósforo, son: los Alfisoles, Andosoles, Ultisoles y Oxisoles (Hocking, 2001). Estos suelos tienen un pH \leq de 5.0 y un contenido de Ca^{2+} bajo, que afecta el crecimiento normal de las raíces y agrava el problema de toxicidad de aluminio en las plantas. Estos suelos requieren del uso intensivo de fertilizantes con alto contenido de fósforo y encalado para una óptima producción.

La toxicidad de aluminio y acidez de los suelos ha demostrado ser uno de los principales problemas en la producción de habichuela (Smith y Goenaga 2005). Alrededor de 30% de los suelos del mundo son clasificados como ácidos y representan las regiones más importantes en la producción de alimento en el mundo. El problema principal de los suelos ácidos es la alta saturación de aluminio intercambiable y la solubilidad del mismo causada por la disminución del pH.

En suelos con un pH menor de 5.0 ocurre un aumento en la solubilidad del aluminio causando problemas fisiológicos y físicos que impiden el desarrollo de raíces y la penetración de las mismas en el subsuelo. La habichuela comienza a mostrar síntomas

de toxicidad de aluminio a un pH menor de 6.0 siendo los principales, el pobre desarrollo de la raíz y deficiencias de magnesio, calcio y fósforo.

Los factores principales que causan acidez en los suelos utilizados para la agricultura, son: los fertilizantes nitrogenados, la descomposición de la materia orgánica, el intercambio de iones entre el suelo y las plantas, la lluvia ácida y la lixiviación de bases en el suelo. Las prácticas de encalado muchas veces son costosas para el agricultor. Si estas prácticas no se llevan a cabo correctamente pueden causar problemas al cultivo, como son: las deficiencias de micronutrientes (boro, zinc y manganeso), la disponibilidad del fósforo y la reducción en el rendimiento de semilla (Sánchez, 1976).

El material de encalado, con frecuencia, no puede penetrar en el subsuelo también ácido. Por lo tanto, las raíces de la planta tampoco lo hacen impidiendo la accesibilidad a nutrientes y agua en esta parte del suelo. Una alternativa efectiva para cultivar estos suelos ácidos con toxicidad de aluminio es el uso de variedades tolerantes a estas condiciones.

En investigaciones realizadas con habichuela, maíz (*Zea mays*) y trigo (*Triticum aestivum*), se han identificado variedades que son sensitivas y otras tolerantes a niveles tóxicos de aluminio (Miyasaka et al., 1991; Pellet et al., 1995; y Pellet et al., 1996). Sin embargo, muchas de estas investigaciones son realizadas utilizando métodos de laboratorio con soluciones nutritivas y es poca la investigación que se ha realizado bajo condiciones de campo.

Goenaga y Smith (2002) realizaron estudios con tres variedades de habichuela común (G18252, XAN 201, y BAT 477) y dos variedades de habichuelas tiernas ('Contender' y 'Tendercrop') en cuanto a su tolerancia a toxicidad de aluminio. El

estudio fue realizado en un Ultisol de la serie Corozal en Puerto Rico, con concentraciones de aluminio intercambiable desde 0.6 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (pH 5.18) a 16 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (pH 3.76).

Se observó una disminución en la producción de materia seca en todas las variedades al aumentar el contenido de Al^{3+} intercambiable en el suelo. Las variedades 'G18252' y 'Contender' mostraron ser más tolerantes a aluminio que las demás variedades. En una concentración de Al^{3+} intercambiable de 0.68 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ las variedades tolerantes sobrepasaron en un 10% y 19% el rendimiento de semilla a las variedades susceptibles. En una concentración de Al^{3+} intercambiable en el suelo de 2.5 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, se obtuvo una reducción significativa en el rendimiento de semilla de todas las variedades. En cambio, los rendimientos de semilla de las variedades tolerantes fueron 25% mayor que las variedades susceptibles a toxicidad de aluminio.

Las plantas fueron analizadas para determinar la concentración foliar de nutrimentos. La concentración de nitrógeno aumentó con una mayor concentración de Al^{3+} intercambiable en el suelo, siendo algo inesperado por los científicos. La concentración foliar de Ca^{2+} , Mg^{2+} y P disminuyó significativamente con mayor acidez.

Un mecanismo utilizado por las plantas para tolerar niveles tóxicos de aluminio es la exudación radicular de ácidos orgánicos como el citrato, malato y oxalato (Hocking, 2001). Estos ácidos orgánicos forman quelatos con el aluminio haciéndolo menos tóxico para las plantas, ya sea en la rizósfera o a nivel celular.

El ápice de la raíz es el primer lugar de ataque del aluminio y es ahí donde ocurre la liberación de estos exudados (Pellet et al., 1995). Los ácidos orgánicos son producidos por el ciclo celular de la respiración de las plantas. Sin embargo, es la capacidad de

liberar éstos compuestos a través de canales o proteínas en la membrana plásmica lo que las hace tolerantes a niveles altos de aluminio.

Es necesario realizar investigaciones directamente en el campo, que envuelvan el desarrollo de variedades tolerantes a toxicidad de aluminio. Esto ayudará a mantener prácticas económicas y viables para los productores de habichuela. Los estudios de campo pueden correlacionarse con estudios de laboratorio sobre la producción de ácidos orgánicos y desarrollar líneas de habichuela tolerantes al aluminio. Además, nos permite entender mejor el mecanismo que utilizan las plantas para tolerar condiciones de acidez y toxicidad de aluminio en el suelo. Puerto Rico es un lugar ideal para realizar dichas investigaciones por la presencia de suelos ácidos con toxicidad de aluminio, como son los Ultisoles y Oxisoles.

Objetivos

1. Evaluar el efecto del pH y el Al^{3+} intercambiable en el desarrollo y producción de la variedad de habichuela Morales, sembrada en un suelo Corozal (Ultisol).
2. Identificar líneas prometedoras de habichuela de grano rojo y negro de Centroamérica que mejor se desarrollen bajo las condiciones del suelo en la Subestación de Corozal.
3. Estimar un tamaño de muestra para obtener un nivel de precisión adecuada y poder detectar diferencias entre líneas de habichuela en cuanto a la tolerancia a suelos con bajos niveles de pH.

Revisión de Literatura

En los climas húmedos, la acidez del suelo es un proceso natural que dificulta la producción agrícola. Son muchas las causas de acidez en los suelos como la lluvia ácida, los fertilizantes, la respiración y el crecimiento de las plantas (Harter, 2002). Cada uno de estos componentes aporta iones de hidrógeno, los cuales contribuyen a la acidificación del suelo. Los cationes básicos, como el calcio, magnesio y potasio, que son esenciales para las plantas, son lixiviados a través del perfil del suelo y son reemplazados primero por H^+ y luego por Al^{3+} . Esto incrementa la acidez del suelo (Hue e Ikawa, 1999).

A medida que el suelo se torna más ácido, el aluminio, uno de los elementos más abundantes en el suelo, se hace soluble y tóxico para las plantas (Delhaize y Ryan, 1995). Esto causa que las plantas no puedan obtener los nutrientes esenciales y algunos micronutrientes se vuelven más solubles y tóxicos para las plantas (Harter, 2002). Otro problema causado por la acidez del suelo es la fijación del fósforo. El aluminio y el hierro liberados por la acidificación, reaccionan con el fósforo formando un precipitado insoluble, haciéndolo no disponible para las plantas (Rout, et al., 2001).

La producción de la habichuela es afectada grandemente en países de Latinoamérica y África por el problema de acidez y toxicidad de aluminio en el suelo (Smith y Goenaga, 2005). Por esta razón, muchas investigaciones han sido dirigidas a experimentos con diferentes líneas de habichuelas tolerantes a acidez para mejorar este problema.

En un estudio de campo realizado con habichuela por Abruña et al. (1974) con el propósito de determinar el efecto de la acidez en la variedad 'Bonita', se observó una

disminución significativa en el rendimiento de semilla a un pH de 4.7, con 30% de saturación de aluminio. A un pH de 4.0, con una saturación de aluminio del 80% no sobrevivió el cultivo. El contenido de calcio en el tejido de las hojas de las habichuelas disminuyó con un aumento en la concentración de Al^{3+} intercambiable en el suelo. Esto se atribuyó al pobre desarrollo de raíces o a la interferencia en la absorción de Ca^{2+} , por la toxicidad del aluminio.

Los efectos del pH y toxicidad de aluminio se han observado en otros cultivos de importancia económica como el maíz (*Zea mays*), trigo (*Triticum aestivum*), algodón (*Gossypium herbaceum*) y soya (*Glycine max* L. Merr). Cada uno de estos cultivos tiene un nivel óptimo de pH, al cual se puede desarrollar adecuadamente. La concentración de Al^{3+} intercambiable en la mayoría de los suelos altamente meteorizados con pH menores de 5.5 es suficiente para ocasionar daños severos a los cultivos.

Abruña et al. (1978) realizó estudios con el cultivo de soya en un suelo Ultisol de la serie Corozal (Aquic Tropudults), en Puerto Rico. Se estudió el efecto de los factores de acidez en el rendimiento de semilla y la composición foliar de nutrientes en este cultivo. El contenido de aluminio intercambiable del suelo Corozal variaba desde 0.29 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ a un pH de 5.6, a 8.92 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, a un pH de 4.3.

El máximo rendimiento de semilla se obtuvo al pH de 5.6. Cuando el pH disminuyó a 5.0 con un contenido de Al^{3+} intercambiable de 1.41 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, se obtuvo 63% del rendimiento de semilla máximo. En un pH de 4.8 con una concentración de Al^{3+} intercambiable de 3.21 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ sólo se obtuvo 28% del rendimiento de semilla máximo. Estos resultados indican que este cultivo es sensible al aluminio. Se observó

además una reducción en el contenido de Ca^{2+} y N en las hojas en las plantas sembradas con una mayor saturación de Al^{3+} intercambiable en el suelo.

El ápice de la raíz es la parte de la planta más afectada por la toxicidad de aluminio, exhibiendo mayor daño celular que otras partes. Los primeros efectos causados por la toxicidad de aluminio, son la inhibición de la división celular y la elongación de la raíz. Esto evita que las raíces puedan penetrar en el subsuelo para absorber nutrimentos y agua (Gunsé et al., 2003).

Se ha observado que la toxicidad de aluminio causa síntomas de deficiencia de calcio en las plantas. Sin embargo, Peter et al., (1994) observó que la inhibición del crecimiento de raíces en variedades sensitivas de trigo, no se debía a deficiencia de calcio, pero sí a desórdenes metabólicos causados por el aluminio. El factor más importante que afecta la disponibilidad de calcio en suelos ácidos es el nivel de aluminio intercambiable o soluble, en relación al calcio.

Para corregir problemas de acidez y toxicidad de aluminio en los suelos se llevan a cabo prácticas, como: encalado, fertilización y el uso de variedades tolerantes. La aplicación de fertilizante y encalado puede no ser una solución económicamente viable en muchos países. El uso de plantas que puedan obtener fósforo fijado y ser tolerantes a la toxicidad de aluminio en el suelo es la mejor opción en estos casos para la producción de habichuela. Esto beneficia, especialmente, a los países de bajos recursos económicos donde la baja fertilidad y acidez de los suelos son el principal problema (Hocking, 2001).

Se ha demostrado en varias investigaciones que existen diferencias genotípicas entre variedades de habichuela en cuanto a tolerancia a la toxicidad de aluminio (Miyasaka et al., 1991; Foy et al., 1972; Goenaga y Smith, 2002). La mayoría de estas

investigaciones han sido realizadas bajo condiciones de invernadero, ya que es una manera rápida, económica y con condiciones más controladas que a nivel del campo (Chardón, 2004). En un estudio realizado por Goenaga y Smith (2002) se estudió la tolerancia de variedades de habichuela a la acidez del suelo. Entre estas variedades unas eran consideradas resistentes y otras sensitivas a toxicidad de Al^{3+} . Se observaron diferencias significativas en el rendimiento de semilla entre las variedades.

Chardón (2004) evaluó la tolerancia a aluminio de las variedades de habichuela 'G18252', 'VAX 1', 'BAT 477', 'Salagnac 90A' y 'Morales'. Las variedades se evaluaron en dos concentraciones de aluminio (0 y 35 ppm Al^{3+}) utilizando una solución Hoagland y arena de sílica como medio de propagación a pH 4.8. Las plantas se cosecharon a los 29 días y se utilizó la raíz y el tallo como criterio para diferenciar entre las variedades. En todas las variedades se redujo significativamente el peso seco del tallo y semilla al aumentar la concentración de Al^{3+} a 35 ppm. En una concentración de 35 ppm de Al^{3+} no se observó diferencias significativas en el peso seco del tallo y peso seco de semilla entre las variedades de habichuela. Sin embargo, la variedad 'Salagnac 90A' mostró el mayor peso del tallo y de raíz con 35 ppm de Al^{3+} . Aunque no se observó diferencia significativa en la absorción de nutrientes, la variedad 'Morales' tuvo la mayor concentración de K^+ en el tallo y de las más altas en el contenido de Ca^{2+} y Mg^{2+} .

Foy et al. (1967) realizaron una investigación en invernadero para determinar el rango de tolerancia a aluminio entre variedades de habichuelas en un suelo de la serie Bladen, con un contenido de Al^{3+} intercambiable de $5.56 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y un pH de 4.4. Se evaluaron dos tratamientos de encalado en el suelo. El primer tratamiento fue uno sin la aplicación de cal al suelo y el otro tratamiento fue añadiendo 3,000 ppm de CaCO_3 (pH

5.5). Se fertilizaron ambos tratamientos para poder observar el efecto directo del aluminio. Se cosecharon las plantas luego de un mes y se observaron diferencias significativas en el crecimiento vegetativo entre las variedades.

Se asumió que el crecimiento vegetativo puede ser una característica que refleja el potencial de rendimiento. Las variedades de habichuelas tiernas ‘Contender’ y ‘Dade’ mostraron la mayor tolerancia y la menor respuesta al encalado. El rendimiento máximo de la variedad ‘Dade’, sin cal, fue de 3.14 g/tiesto; y con cal, de 3.87 g/tiesto. La variedad Contender mostró un rendimiento de 3.19 g/tiesto, sin cal y de 4.03 g/tiesto con cal. Las variedades ‘Tendercrop’ y ‘Romano’ mostraron ser sensitivas al aluminio y respondieron muy bien al encalado. La variedad ‘Tendercrop’ obtuvo un rendimiento de semilla máximo de 2.19 g/tiesto sin cal y de 3.74 g/tiesto con 3,000 ppm de cal. La variedad Romano obtuvo un rendimiento de semilla máximo de 1.72 g/tiesto sin cal y de 4.09 g/tiesto con 3,000 ppm de cal.

Foy et al. (1972) evaluaron dos variedades de habichuela tierna para probar que la tolerancia de ciertas variedades a un suelo ácido (Bladen) coincide con la tolerancia a aluminio evaluadas en soluciones nutritivas. Las variedades utilizadas fueron ‘Dade’, que es considerada como tolerante y ‘Romano’, que se considera como sensitiva a aluminio. Estas variedades fueron evaluadas utilizando una solución Steinberg a un pH de 4.8 con concentraciones de aluminio de 0, 2, 4, 6, 8 ppm añadidas en forma de $\text{Al}(\text{SO}_4)_3$.

En una concentración de 8 ppm los rendimientos de la parte aérea y raíz de la variedad ‘Romano’ fueron solo 53% y 59% de los rendimientos máximos. El rendimiento máximo de la parte aérea obtenido por esta variedad sin aluminio fue de 15.2

g/tiesto. En la variedad 'Dade' fue menor la reducción en el rendimiento de la parte aérea y raíz, mostrando una tendencia a aumentar este rendimiento con una mayor concentración de aluminio. Esta variedad disminuyó el rendimiento de la parte aérea de 14.9 g/tiesto a 14.0 g/tiesto al aumentar la concentración de aluminio de 0 a 8 ppm. En el contenido de calcio de la variedad 'Romano' redujo de 124 meq/100 g peso seco con 0 aluminio a 54.1 meq/100 g peso seco con 8 ppm de aluminio. En cambio, la variedad 'Dade' no mostró una disminución en el contenido de Ca^{2+} con el aumento en la concentración de aluminio. Las diferencias en la tolerancia de estas variedades a un suelo ácido coincidieron con lo estudiado en las soluciones nutritivas bajo condiciones de invernadero.

Smith y Goenaga, (2005) realizaron estudios de tolerancia a aluminio con las variedades de habichuela tierna 'Dade' y 'Tendercrop' bajo condiciones de campo. Esta investigación se realizó en un suelo Ultisol de la serie Corozal, en Puerto Rico. Se evaluaron diferentes niveles de acidez mediante diferentes aplicaciones de CaCO_3 . Los niveles de aluminio estaban entre 0 y $10.67 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Los rendimientos de semilla de las variedades 'Dade' y 'Tendercrop' no fueron significativamente diferente en una primera siembra realizada en 1999 (99.6 g m^{-2} y 93.7 g m^{-2}), pero si lo fueron en una segunda siembra realizada en el año 2000 (47.6 g m^{-2} y 10.5 g m^{-2}).

Los investigadores indicaron que factores externos que no estaban relacionados con el aluminio pudieron afectar el rendimiento en el año 2000. Estos factores pudieron ser el desarrollo de patógenos del suelo y un aumento en la concentración de manganeso. El estudio del 1999 contradice los estudios anteriores que indicaban que la variedad 'Dade' es tolerante al aluminio. En una concentración de Al^{3+} intercambiable de 2.5

$\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ la disminución en rendimiento fue similar en ambas líneas. Los investigadores sugirieron que las investigaciones realizadas con habichuela para determinar la tolerancia a aluminio, se hagan analizando plantas completamente maduras, bajo condiciones de campo.

En un estudio realizado en Colombia con 49 genotipos de habichuela Rao et al., (2002) demostró que las variedades resistentes a toxicidad de aluminio tienen una mayor habilidad para obtener Ca^{2+} y Mg^{2+} , además de poder movilizar nitrógeno de la planta a las semillas en desarrollo. Rao et al., (2002) evaluó dos niveles de fertilidad y se determinaron características agronómicas, como: área foliar, peso del tallo, número de vainas, número de semillas por vaina, rendimiento de semilla y absorción de nutrientes. El primer nivel de fertilidad era uno alto en P (40 kg ha^{-1}). El segundo nivel era bajo con ninguna aplicación de nutrientes, pero con suficiente fósforo. En este nivel el suelo demostró tener niveles tóxicos de aluminio (66% de saturación de Al^{3+}) y baja disponibilidad de Ca ($1.4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) y Mg ($0.51 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$).

Los rendimientos de semilla fluctuaron entre 21 kg ha^{-1} a 399 kg ha^{-1} en el suelo de baja fertilidad y entre 93 kg ha^{-1} a $1,374 \text{ kg ha}^{-1}$ en el de alta fertilidad. De los 49 genotipos Carioca, G 21212, MAR 1 y SEA 5 mostraron los mayores rendimientos de semilla y la mayor concentración de nutrientes en las semillas, en el suelo de baja fertilidad.

El mecanismo utilizado por las plantas tolerantes a toxicidad de aluminio es la exudación de ácidos orgánicos por la raíz. Los ácidos orgánicos, como el cítrico, málico y oxálico, forman quelatos con el aluminio haciéndolo menos tóxico para las plantas.

Variedades de trigo tolerantes a toxicidad de aluminio, muestran mayor capacidad para exudar malato que variedades sensitivas (Pellet et al., 1996).

Miyasaka et al. (1991) observaron que las raíces de la variedad de habichuela 'Dade', tolerante a toxicidad de aluminio, liberaron diez veces más ácido cítrico que la variedad sensitiva 'Romano'. Además, esta liberación fue setenta veces mayor en presencia de aluminio por la variedad tolerante.

La protección de estos ácidos orgánicos contra los efectos de toxicidad de aluminio en cultivos tolerantes de maíz y habichuela, puede ser la formación de quelatos con el aluminio en el suelo, o la detoxificación a nivel celular. La liberación de ácidos orgánicos en la rizósfera, fue reportado en variedades tolerantes de habichuela y maíz. Se reportó una mayor liberación de ácido cítrico en variedades tolerantes de habichuela mientras que en variedades tolerantes de maíz la liberación fue de ácido málico (Pellet et al., 1995).

La protección a nivel celular o interna fue evaluada por Ma et al. (1998) en el cultivo de trigo. Los resultados sugirieron que plantas resistentes pueden transportar Al^{3+} directo a la célula y formar complejos (1:3 Al-oxalato) no tóxicos, con ácido oxálico. La efectividad de los ácidos orgánicos en proteger las raíces contra los efectos del aluminio intercambiable está relacionada con la posición de los grupos carboxilos en la cadena del carbono.

Los ácidos orgánicos que forman estructuras de anillo con cinco o seis enlaces con Al^{3+} proveen la mejor protección (Hocking, 2001). La exudación de ácidos orgánicos proviene mayormente del ápice de la raíz, siendo ésta la principal parte de la planta que es afectada por el aluminio (Delhaize y Ryan 1995).

Además, varios investigadores han descrito la presencia de un gen encargado de la resistencia a toxicidad de aluminio en trigo. Este gen está relacionado con la formación de canales de aniones o proteínas que se encuentran en la membrana plásmica encargados de la exudación de los ácidos orgánicos (Pellet et al., 1996). Para mantener electroneutralidad en la célula por la actividad de estos exudados orgánicos de carga negativa, las plantas también movilizan iones, como potasio, fuera o dentro de la membrana (Delhaize y Ryan, 1995).

La tolerancia a toxicidad de aluminio se ha observado y medido en diferentes cultivares de habichuela, maíz y trigo. La exudación de ácidos orgánicos como es el citrato, malato y oxalato de los ápices de la raíz a la rizósfera nos revelan esa tolerancia. Esta exudación de compuestos quelatantes inducida por aluminio puede ser un importante mecanismo de adaptación, para permitir que las plantas puedan sobrevivir en suelos con toxicidad de aluminio.

Materiales y Métodos

El estudio se realizó en un suelo de la serie Corozal (Very fine, parasesquic, isohyperthermic, Typic Hapludult) en la Subestación Experimental Agrícola de la Universidad de Puerto Rico, en Corozal. Este es un suelo arcilloso, altamente meteorizado con altos niveles de Al^{+3} intercambiable y un pH natural bajo 4.7.

La Subestación Experimental de Corozal está localizada en la región montañosa, norte central, en la latitud $18^{\circ} 19' 09''$ y en la longitud $66^{\circ} 22' 15''$. Esta se encuentra a 210 metros sobre el nivel del mar, con una precipitación anual promedio de 1,854 mm y una temperatura anual promedio de $24^{\circ}C$.

La fertilización del área experimental se hizo siguiendo la recomendación del Conjunto Tecnológico para la Producción de Habichuela de la Estación Experimental Agrícola de la Universidad de Puerto Rico. Se utilizó un abono 10-10-10 (N-P-K) a razón de $1,173 \text{ kg ha}^{-1}$ en dos aplicaciones, luego de la siembra y en la florecida. Además, se utilizó control químico para proteger las plantas contra el daño de insectos y malezas.

Experimento 1

En este experimento se evaluó la tolerancia de la variedad 'Morales' a diferentes niveles de aluminio intercambiable en el suelo. Además, se determinó la variabilidad en el rendimiento de semilla de las plantas de Morales en el lugar experimental. Esto nos permite identificar el número mínimo de muestras por tratamiento necesario para poder obtener un nivel de precisión deseado en futuros ensayos con habichuela.

El estudio consistió de parcelas de tamaño 12.19 m × 7.62 m arregladas en un diseño de bloques completos aleatorizados. Se seleccionaron cuatro tratamientos en doce parcelas utilizadas para ser sembradas con la variedad de habichuela 'Morales'. Se aplicaron 4 niveles de encalado para obtener un rango de niveles de Al^{3+} intercambiable y pH:

- 1) 0 ton ha^{-1} de CaCO_3
- 2) 5 ton ha^{-1} de CaCO_3
- 3) 10 ton ha^{-1} de CaCO_3
- 4) 20 ton ha^{-1} de CaCO_3

Estos tratamientos, asignados al azar a cada parcela, se diferencian en el grado de acidez del suelo debido a las diferentes aplicaciones de carbonato calizo. Los valores promedios de pH de las parcelas incluidas en el estudio fueron: 4.78, 5.17, 6.28 y 6.88.

El diseño experimental consistió de dos repeticiones con el tratamiento de 20 ton ha^{-1} de CaCO_3 y una concentración de Al^{3+} intercambiable de 0.08 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ (pH 6.88). Tres repeticiones con el tratamiento de 10 ton ha^{-1} de CaCO_3 y una concentración de Al^{3+} intercambiable de 0.23 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ (pH 6.28). Tres repeticiones con el tratamiento de 5 ton ha^{-1} de CaCO_3 y una concentración de Al^{3+} intercambiable de 1.67 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ (pH 5.17). Cuatro repeticiones con el tratamiento de 0 ton ha^{-1} de CaCO_3 y una concentración de Al^{3+} intercambiable de 3.84 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ (pH 4.78).

En cada unidad experimental se sembraron doce surcos de 12 m y se dejaron dos surcos como borde. La fecha de siembra fue el 8 de febrero de 2006. La distancia entre surcos fue de 0.6 m y la distancia entre plantas fue de 0.1 m. Para comparar los tratamientos se colectaron diez muestras seleccionadas al azar de dos metros lineales de

plantas en su etapa de madurez en cada parcela. En las áreas donde se tomaron las muestras de plantas se analizó el suelo y se determinó la concentración de nutrientes, pH y Al^{3+} intercambiable.

El estudio realizado con la variedad 'Morales' fue repetido en otra época del año utilizando los mismos niveles de encalado y el mismo lugar experimental. La fecha de siembra fue el 25 de septiembre de 2006. Además de obtener las características de peso seco de semilla y parte aérea, se colectaron veinte muestras de hojas fisiológicamente maduras del tope de las plantas en cada tratamiento. Estas muestras se tomaron treinta días después de la siembra y se analizó el contenido de nutrientes (N , P , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) y de aluminio en las hojas utilizando un 'Inductively Coupled Plasma' (ICP)

Los datos fueron analizados utilizando el programa de estadística SAS realizando un análisis "PROCMIX" y una prueba de Tukey de comparación de medias con un $\alpha = 0.05$. Los parámetros que se utilizaron para diferenciar entre los tratamientos fueron: el peso seco de la parte aérea de plantas, el rendimiento de semilla y el índice de cosecha. El índice de cosecha (IC) se calculó como la razón entre el peso seco de semilla (PS) y el peso seco de la parte aérea (PA) multiplicado por cien $[(\text{PS})/(\text{PA}) \times 100]$. Estos parámetros fueron correlacionados con los distintos niveles de pH y concentraciones de Al^{3+} intercambiable del suelo en cada tratamiento. Se realizó un análisis de regresión lineal simple para medir la relación entre los niveles de Al^{3+} intercambiable y pH en el rendimiento de semilla de la variedad de habichuela 'Morales'.

La variabilidad en el rendimiento de semilla en el ensayo con la variedad 'Morales' se determinó tratando cada muestra como una unidad de muestreo independiente. Los resultados de este estudio nos ayudan a determinar el número de

muestras necesario para detectar una diferencia mínima significativa (DMS) en particular. Para esto se utilizó el valor del residual obtenido en el análisis de varianza del rendimiento de semilla de la variedad 'Morales'. Se realizaron varias gráficas de potencia con número de muestras para diferentes valores de DMS utilizando el programa de estadística Infostat. El estimado del tamaño muestral se determinó al obtener la máxima potencia para evitar cometer error de tipo II o decir que no existen diferencias entre los tratamientos cuando sí las hay.

Análisis de Suelo y análisis foliar

Se colectaron muestras de suelo de cada una de las parcelas en la etapa de cosecha a una profundidad de 0-20 cm. Las muestras fueron secadas al aire y pasadas por un cedazo de 2 mm. En las muestras se analizó el pH, las bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+), el fósforo disponible y el Al^{3+} intercambiable.

El Al^{3+} intercambiable se extrajo con una solución 1N de KCl y se determinó utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica. De igual forma se midieron los cationes intercambiables de Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ , pero extraídos con una solución de 0.2M NH_4Cl . El fósforo disponible se extrajo utilizando el método Bray I y se determinó por colorimetría utilizando el método de Murphy y Riley (Sparks, 1996).

Las plantas en ambos experimentos se cosecharon luego de alcanzar su etapa de madurez fisiológica y fueron secadas al horno a 70°C hasta alcanzar un peso constante para la determinación de materia seca.

Experimento 2

Sesenta y ocho líneas de habichuelas negras y setenta y dos de habichuelas rojas procedentes de los Viveros de Adaptación Centroamericano conocidos como VIDAC, se evaluaron en dos áreas de $12.19 \text{ m} \times 7.62 \text{ m}$ cada una y con un nivel de encalado asignado a cada grupo. La fecha de siembra fue el 8 de febrero de 2006. El propósito de este estudio fue identificar las líneas con los más altos rendimientos de semilla e índices de cosecha, dadas las condiciones de suelo y del lugar experimental.

Las sesenta y ocho líneas negras del VIDAC Negro se sembraron en un diseño en bloques completos aleatorizados con dos repeticiones. El lugar de siembra de estas líneas fue enmendado con una aplicación de 5 ton ha^{-1} de CaCO_3 alcanzando un nivel de pH de 5.20 y un contenido de Al^{3+} intercambiable de $1.84 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. La concentración de fósforo que tenía el suelo antes de la siembra fue de 0.314 mg kg^{-1} . Las setenta y dos líneas rojas del VIDAC Rojo se sembraron en un diseño de bloques completos aleatorizados con dos repeticiones. El área de siembra de estas variedades fue enmendada con una aplicación de 10 ton ha^{-1} de CaCO_3 alcanzando un pH de 6.45 y un contenido de Al^{3+} intercambiable de $0.32 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. La concentración de fósforo que tenía el suelo antes de la siembra fue de 0.824 mg kg^{-1} .

Se sembraron de seis a ocho semillas de cada línea en surcos de 0.5 m, dejando un espacio de 0.6 m entre surco y 0.1 m entre planta. Todas las plantas dentro de cada surco se cosecharon luego de alcanzar la etapa de madurez. Los parámetros que se utilizaron para diferenciar entre las líneas, fueron: el peso seco de la parte aérea, el peso seco de las semillas y el índice de cosecha. Los datos fueron analizados utilizando una tabla de ANOVA y una prueba DMS de comparación de medias con un $\alpha = 0.05$

Resultados y Discusión

Evaluación agronómica de la variedad de habichuela 'Morales'

El análisis de varianza no mostró diferencias significativas en el rendimiento de semilla en las diferentes concentraciones de Al^{3+} intercambiable en el suelo (Tabla 1). El rendimiento de semilla mayor ($1,279 \text{ kg ha}^{-1}$) se observó a un pH de 5.17 (Tabla 2) con un contenido de aluminio intercambiable de $1.67 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

Tabla 1. Análisis de varianza del rendimiento de semilla de la primera evaluación de la variedad Morales.

Parámetros de covarianza	Cuadrados Medios	Gl	Valor de F	Pr>F
Tratamiento		3	2.55	0.1689
Rep.	17,405			
Rep.*trat.	28,335			
Residual	117,107			

Este rendimiento de semilla es comparable con el rendimiento de semilla comercial obtenido con esta variedad en Puerto Rico. A un pH de 4.78 y una concentración de Al^{3+} intercambiable de $3.84 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, se obtuvo un rendimiento de semilla de 890 kg ha^{-1} , el cual representa un 70% del rendimiento máximo obtenido.

El rendimiento de semilla de la variedad 'Morales' fue mayor cuando la concentración de Al^{3+} intercambiable disminuyó de $3.84 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ a $1.67 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Sin embargo, se observó un menor rendimiento de semilla al aumentar el pH sobre 5.17, a pesar de tener menores concentraciones de Al^{3+} intercambiable. Esto puede ser causado por el mayor contenido de calcio en estos tratamientos. Altas concentraciones de calcio pueden afectar la absorción de otros nutrimentos esenciales como es el magnesio y el potasio.

Tabla 2. pH, aluminio intercambiable del suelo y parámetros de rendimiento de semilla de la primera evaluación de la variedad ‘Morales’ en el suelo Corozal.

Tratamientos	pH _{H2O}	Al intercambiable	Rendimiento de semilla	Peso de semilla	Peso de parte aérea	Peso Total Planta	IC
ton CaCO ₃ ha ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹	kg ha ⁻¹	-----g/muestra-----			%
20	6.88	0.08	867 a	104.0	165	269.0	62
10	6.28	0.23	994 a	119.4	191	310.4	61
5	5.17	1.67	1,279 a	153.5	260	413.5	60
0	4.78	3.84	890 a	106.8	184	290.8	57

Promedios seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes al 0.05%.

Los resultados indican una correlación negativa entre el contenido de Al³⁺ intercambiable y el rendimiento de semilla de la variedad ‘Morales’ (Fig. 1). Resultados similares se observaron en investigaciones de Smith y Goenaga (2005) con la variedad ‘Dade’, considerada como tolerante. En una concentración de Al³⁺ intercambiable de 2.5 cmol_c kg⁻¹ la variedad tolerante de habichuela ‘Dade’ mostró una disminución en el rendimiento de semilla.

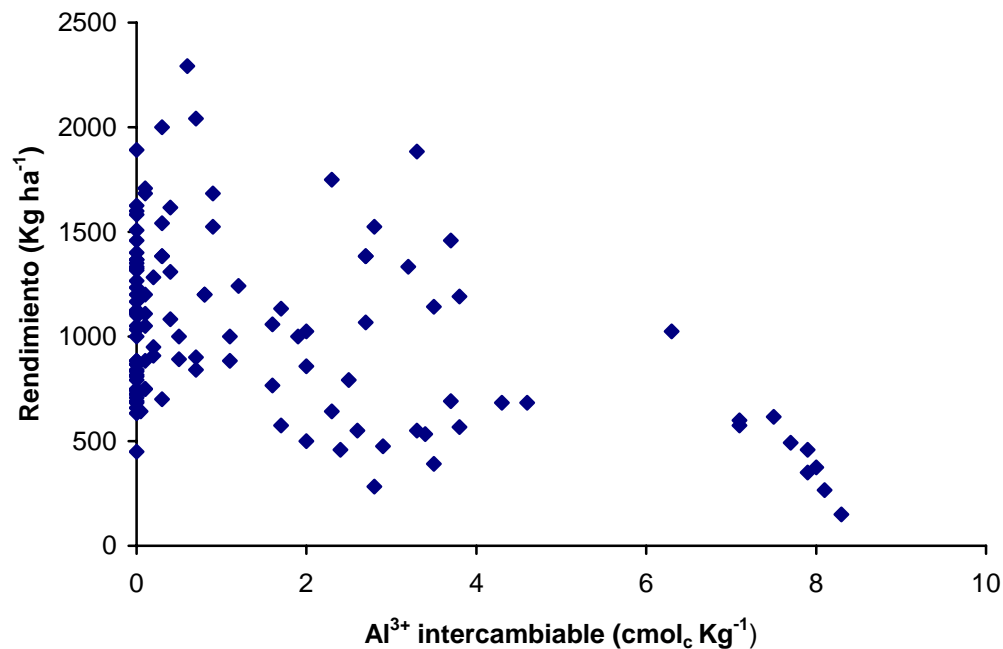


Fig. 1. Relación entre la concentración de aluminio intercambiable en el rendimiento de semilla de la variedad 'Morales' en un suelo Corozal.

Se pudo observar que la reducción en el rendimiento de semilla de la variedad 'Morales' puede comenzar en niveles de Al^{3+} intercambiable mayores de $2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. La Figura 1 muestra una reducción más marcada en el rendimiento de semilla a concentraciones mayores de $6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Esto puede indicar cierto grado de tolerancia al Al^{3+} por esta variedad.

Los resultados de Goenaga y Smith (2002) indicaron que la variedad tolerante de habichuela 'G 18252' redujo el rendimiento de semilla de $2,000 \text{ kg ha}^{-1}$ con 0 aluminio a $1,100 \text{ Kg ha}^{-1}$ con una concentración de Al^{3+} intercambiable de $4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Esta reducción equivale a un 45% del rendimiento de semilla máximo obtenido por esta variedad. Este rendimiento de semilla fue significativamente mayor que el de variedades consideradas como sensitivas al Al^{3+} intercambiable. En nuestro estudio con la variedad 'Morales' observamos un rendimiento de semilla de $1,279 \text{ kg ha}^{-1}$ a una concentración de Al^{3+} intercambiable de $1.67 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. En una

concentración de Al^{3+} intercambiable de $3.84 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ el rendimiento de semilla de ‘Morales’ fue solamente 30% menor y no fue significativamente diferente.

Además del peso de las semillas se analizó el peso seco de la parte aérea de las plantas de ‘Morales’ para determinar el índice de cosecha (IC). En este parámetro no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla 2). En el cultivo de habichuela se ha identificado que un índice de cosecha mayor o igual de sesenta es adecuado. En esta evaluación el índice de cosecha obtenido en los tratamientos con niveles de Al^{3+} intercambiable mayores de $1.67 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ se consideran adecuados.

Análisis de suelo

El análisis del suelo Corozal a diferentes niveles de pH se presenta en la Tabla 3. El contenido de Al^{3+} intercambiable disminuyó de $3.44 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ a $0.86 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ al aumentar el pH de 4.98 a 6.45 mediante encalado. La concentración de calcio aumentó de $4.37 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ a un pH de 4.98, a $11.88 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ a un pH de 6.45. El contenido de magnesio y potasio fue mayor a un pH de 5.55 y el contenido de Al^{3+} intercambiable se redujo a $1.15 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. La concentración de fósforo en el suelo fue baja en todos los niveles de pH. La mayor concentración de fósforo se observó a un pH de 4.98 (5.98 mg kg^{-1}).

Se han identificado valores adecuados de nutrientes para el crecimiento óptimo de cultivos en suelos de Puerto Rico (Muñiz, 1986). El suelo Corozal mostró un bajo contenido de fósforo y magnesio y un alto contenido de potasio en todos los tratamientos. El contenido de calcio fue mediano en el tratamiento con la mayor concentración de Al^{3+} intercambiable y alto en los demás tratamientos. La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del suelo aumentó

gradualmente al aumentar el pH. En este tipo de suelo predominan principalmente arcillas con cargas dependientes del pH.

Tabla 3. Análisis de suelo de la serie Corozal después de la primera siembra.

Tratamientos ton CaCO ₃ ha ⁻¹	pH _{H2O}	P mg kg ⁻¹	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺ -----cmol _c kg ⁻¹ -----	K ⁺	CIC
20	6.45	3.30	0.86	11.80	0.78	1.04	14.5
10	5.55	5.02	1.15	8.55	0.98	1.41	12.1
5	5.53	3.18	0.75	7.56	0.60	0.96	10.0
0	4.98	5.98	3.44	4.37	0.77	0.97	9.6

La Figura 2 ilustra la relación que existe entre el pH y el Al³⁺ intercambiable en el suelo Corozal (Ultisol). El contenido de Al³⁺ intercambiable en el suelo varió desde 8.3 cmol_c kg⁻¹, a un pH de 4.5 a 0 con un pH de 7.1. A valores mayores de pH 5.5 se observaron concentraciones bien bajas de Al³⁺ intercambiable. Esto indica que a valores de pH mayor o igual a 5.5 la mayor parte del Al³⁺ intercambiable se ha precipitado.

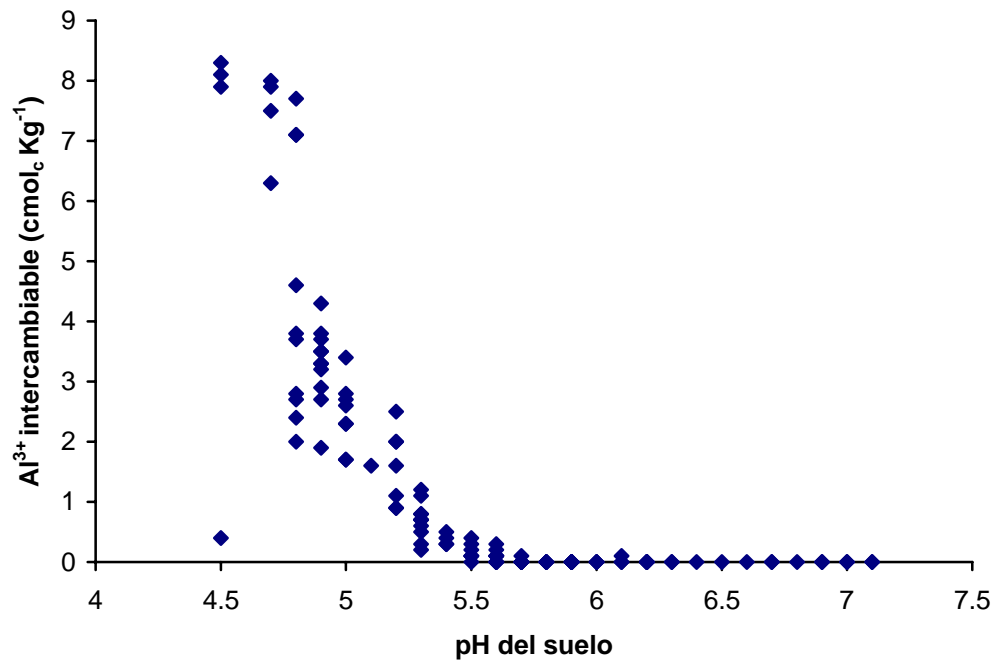


Fig. 2. Aluminio intercambiable a diferentes valores de pH en el suelo Corozal.

La concentración de calcio en el suelo aumentó significativamente con aplicaciones de CaCO_3 (Fig. 3). Esta concentración varió de 0.72 a 15.97 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$. Muñiz (1986) sugiere que una concentración de calcio intercambiable en el suelo entre 3-6 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ es adecuada para la mayoría de las cosechas. El efecto tóxico del aluminio sobre el rendimiento de semilla de las plantas puede incrementar con bajas concentraciones de calcio en el suelo (Abruña, 1974). Según este investigador, la disminución en el rendimiento de semilla en suelos ácidos, es causada por un pobre desarrollo del sistema de raíces e interferencia en la absorción de calcio en el suelo, especialmente por el Al^{3+} intercambiable.

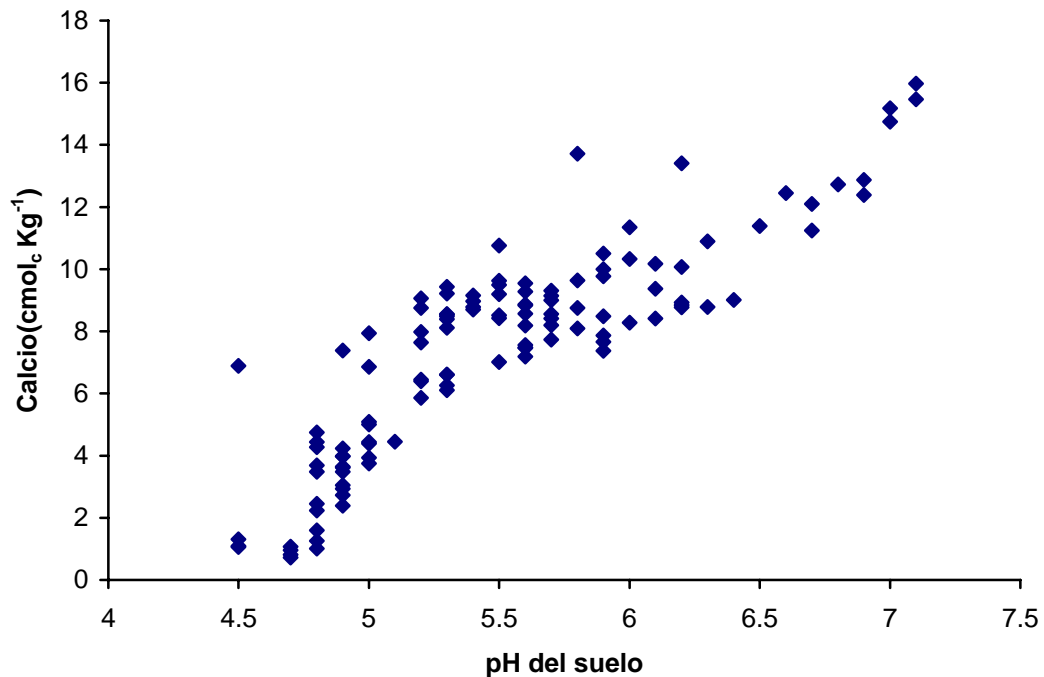


Fig. 3. Concentración de calcio a diferentes valores de pH en el suelo Corozal.

Segundo estudio de la variedad 'Morales'

Los resultados de la segunda evaluación de la variedad de habichuela 'Morales' se presentan en la Tabla 4. Los rendimientos de semilla promedio mayores fueron de 1,028 kg ha⁻¹ y de 1,023 kg ha⁻¹ observados en un pH de 6.45 y 5.53. Estos rendimientos coincidieron también con los valores más bajos de Al³⁺ intercambiable. Los valores de índice de cosecha obtenidos en esta evaluación no coinciden con los de la primera evaluación. En la segunda evaluación el peso seco de la parte aérea de las plantas mostró ser mayor que en la primera evaluación. Esto indica un mayor crecimiento vegetativo por las plantas en esta siembra. Los índices de cosecha de todos los tratamientos en esta segunda evaluación son considerados bajos. Este experimento fue realizado en la época lluviosa. El cultivo de habichuela es sensible al exceso de humedad y es necesario que el suelo tenga un buen drenaje. El suelo Corozal es arcilloso, con un pobre drenaje

y el exceso de humedad puede causar el desarrollo de hongos patógenos afectando el cultivo de habichuela. Se ha observado que en Puerto Rico los rendimientos de semilla más altos en variedades de habichuela se obtienen en los meses más fríos.

Tabla 4. pH, Al³⁺ intercambiable del suelo y parámetros de rendimiento de semilla de la segunda evaluación de la variedad 'Morales' en el suelo Corozal.

Tratamientos	pH _{H2O}	Al intercambiable	Rendimiento de semilla	Peso de semilla	Peso de parte aérea	Peso Total Planta	IC
ton CaCO ₃ ha ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹	kg ha ⁻¹	-----g/muestra-----			%
20	6.45	0.86	1,028a	123.3	259	382.3	47
10	5.55	1.15	785 a	94.3	207	301.3	44
5	5.53	0.75	1,023a	122.8	259	381.8	47
0	4.98	3.44	862 a	103.5	223	326.5	46

Promedios seguidos de la misma letra no son significativamente diferentes al 0.05%.

El análisis de varianza nos indica que no hubo diferencias significativas entre los diferentes tratamientos evaluados con la variedad 'Morales' (Tabla 5). En esta evaluación se observó un rendimiento de semilla promedio menor en un pH de 5.55 al compararse con los tratamientos con pH de 6.45 y 5.53. Sin embargo, esta reducción no es causada por el Al³⁺ intercambiable, ya que en este nivel de pH no hay un efecto tóxico del aluminio en el suelo.

El rendimiento de semilla observado en una concentración de Al³⁺ intercambiable de 3.44 cmol_c kg⁻¹ fue en promedio de 862 kg ha⁻¹ lo que equivale a un 83% del rendimiento de semilla promedio máximo obtenido. Este rendimiento de semilla no fue significativamente diferente al rendimiento de semilla promedio máximo obtenido (1,028 kg ha⁻¹) con una concentración de Al³⁺ intercambiable de 0.86 cmol_c kg⁻¹ y un pH de 6.45.

Tabla 5. Análisis de varianza de rendimiento de semillas de la segunda evaluación de la variedad ‘Morales’.

Parámetros de covarianza	Cuadrados Medios	Gl	Valor de F	Pr>F
Tratamiento		3	2.88	0.1419
Rep.	4,442			
Rep.*trat.	5,363			
Residual	84,164			

En esta evaluación no se observó una relación entre el Al^{3+} intercambiable y el rendimiento de semilla de ‘Morales’ determinado mediante un análisis de regresión lineal. Al igual que en la primera evaluación los resultados indican que esta variedad puede ser tolerante a niveles altos de Al^{3+} intercambiable en el suelo.

Análisis foliar de la variedad ‘Morales’

El análisis foliar de las plantas de ‘Morales’ se presenta en la Tabla 6. Los niveles de nutrientes en las hojas alcanzaron niveles adecuados a todos los niveles de encalado y Al^{3+} intercambiable. Se realizó un análisis de varianza para cada nutrimento y éste no mostró diferencia significativa en ninguno de los elementos estudiados. Tampoco se observó diferencia significativa en el contenido foliar de aluminio.

Un posible mecanismo de defensa que puede utilizar la planta contra el efecto tóxico del aluminio puede ser evitando la translocación de aluminio de la raíz a la parte aérea. En este estudio solo se analizaron los nutrientes presentes en las hojas y no en la raíz. Sin embargo, es en la raíz donde se puede encontrar la mayor concentración de aluminio en la planta (Rout, 2001).

Tabla 6. Análisis foliar de la variedad 'Morales'.

Tratamientos	Al ³⁺ Intercambiable	Rendimiento de semilla	Análisis Foliar							
			N Total	P	K	Ca	Mg	S	Al	
ton CaCO ₃ ha ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹	kg ha ⁻¹	-----%-----							
										ppm
20	0.86	1,028	4.78	0.37	3.04	2.09	0.28	0.29	0.29	180
10	1.15	785	4.67	0.30	3.23	1.95	0.28	0.26	0.26	355
5	0.75	1,023	5.03	0.38	3.21	2.07	0.28	0.29	0.29	296
0	3.44	862	4.99	0.35	3.33	1.57	0.32	0.28	0.28	396

Aunque no se observaron diferencias significativas en el contenido de calcio en las hojas entre tratamientos, se observa un menor contenido de calcio en el tratamiento con más aluminio en el suelo. En éste también se observó una mayor absorción de aluminio. El suelo en este tratamiento mostró un menor contenido de calcio y un mayor contenido de Al³⁺ intercambiable pudiendo causar una menor absorción del calcio.

Análisis de la variabilidad y estimación de un tamaño muestral

La variabilidad que obtuvimos del lugar experimental (valor del residual) se utilizó para poder determinar un número de muestras necesario si queremos observar una diferencia mínima significativa en particular. Para poder estimar un número de muestras general por tratamiento utilizamos el análisis de varianza que se muestra en la Tabla 1. En este caso, utilizamos el parámetro de covarianza del error en el rendimiento de semilla obtenido del primer ensayo con la variedad Morales, cual fue de 117,107.

En la Figura 4 se puede observar el número de muestras necesario para obtener un DMS de 300. En este caso cuando logramos una potencia máxima (100 %) y evitamos cometer error de tipo II obtenemos un número de muestra cercano a 50.

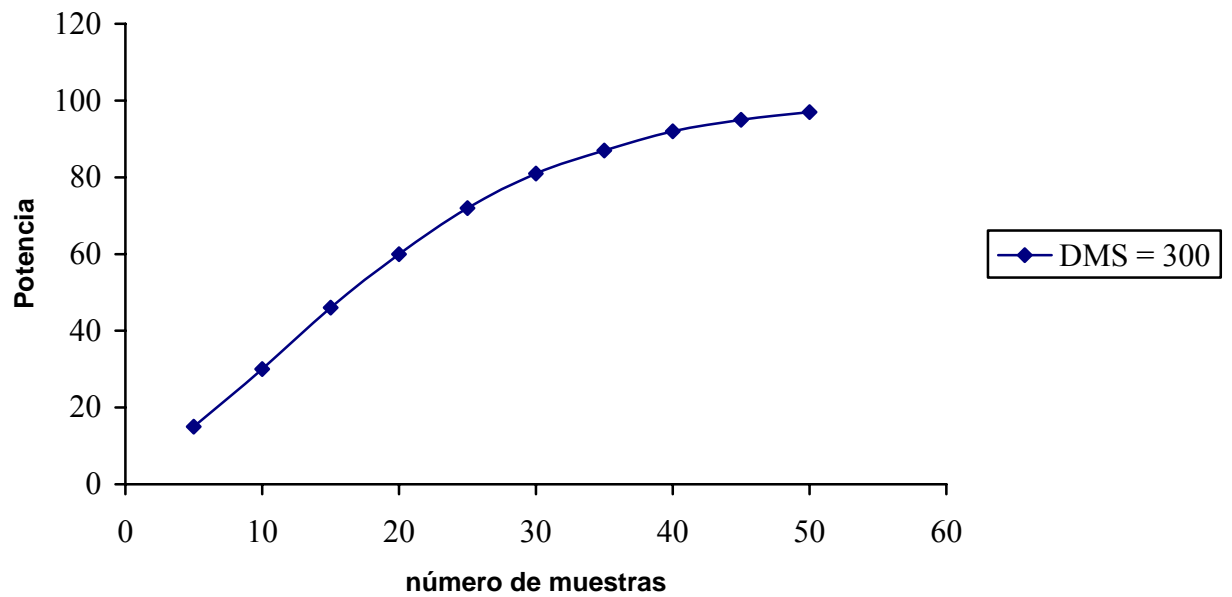


Fig. 4 Tamaño de muestra para un DMS de 300

Realizando varias gráficas de potencia y tamaño muestral para diferentes valores de DMS logramos realizar una gráfica de DMS con número de muestras. Los resultados de este análisis se muestran en la Fig. 5.

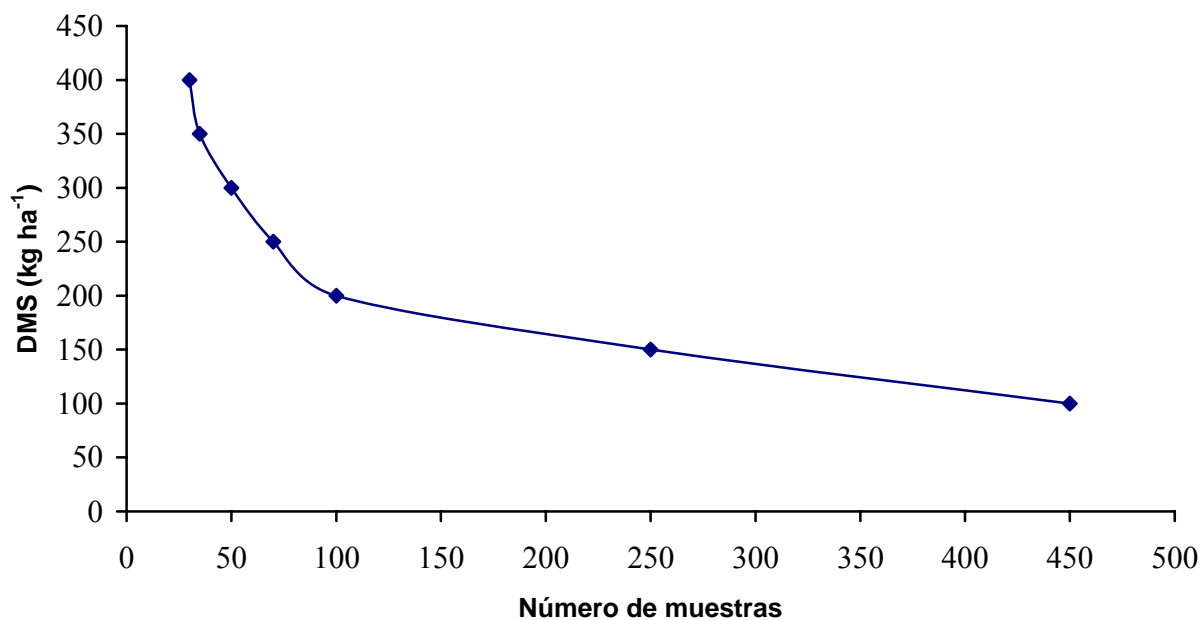


Fig. 5 Número de muestras para obtener un nivel DMS específico.

Se observa en la gráfica que para obtener un DMS de 250 kg ha^{-1} o más se necesita un número de muestras variando de 30 a 70. Para valores de DMS menores a 250 kg ha^{-1} , el tamaño muestral tiene que ser mayor de 50. El tamaño de la muestra depende de lo que el investigador considere que puede ser una diferencia significativa en el rendimiento de semilla entre tratamientos. Este valor de DMS dependerá del rendimiento de semilla esperado.

Evaluación de las líneas del VIDAC

Los rendimientos de semilla obtenidos por las líneas negras y rojas de habichuelas provenientes del VIDAC se presentan en las Tablas 7 y 8. Las líneas negras mostraron diferencias más marcadas en el rendimiento de semilla que las líneas rojas. El análisis de varianza indica que hubo diferencias significativas en el rendimiento de semilla entre las líneas (Tabla 9). Las líneas negras que mostraron los mayores rendimientos de semilla fueron: MEN 2204-39 (2,900 kg ha⁻¹), MER 2222-48 (2,650 kg ha⁻¹) y PR 0333-121 (2,183 kg ha⁻¹). Las líneas rojas con mayor rendimiento de semilla fueron: MFP 2241-33 (2,417 kg ha⁻¹), MR 13425-57-1 (2,950 kg ha⁻¹) y MFP 2241-59 (2,333 kg ha⁻¹).

El suelo donde se sembraron las líneas negras del VIDAC tenía un contenido de Al³⁺ intercambiable de 1.84 cmol_c kg⁻¹ y un pH de 5.2. Este nivel de aluminio es suficiente para afectar de forma significativa las variedades que sean sensitivas al aluminio. El rendimiento de semilla promedio de las líneas negras fue de 1,219 kg ha⁻¹. Este rendimiento de semilla fue similar al obtenido por las líneas rojas del VIDAC que fueron evaluadas en un contenido de aluminio menor. Las líneas negras que mostraron los más altos índices de cosecha fueron: MEN2202-72 (72.7), BCN20-02-82 (60.2) y MR14142-39 (59.1). En este estudio se utilizó la variedad ‘Morales’ como testigo mostrando un rendimiento de semilla promedio de 1,066 kg ha⁻¹ y un índice de cosecha de 34.6. En la evaluación de las líneas negras el rendimiento de semilla e índice de cosecha de la variedad ‘Morales’ fue menor que el encontrado en el estudio de las líneas rojas.

El suelo donde se sembraron las líneas rojas del VIDAC tenía una concentración de Al³⁺ intercambiable de 0.32 cmol_c kg⁻¹ y un pH de 6.4. En este caso, pudimos identificar las líneas que mejor se desarrollaron y se adaptaron a las condiciones del lugar experimental. El

rendimiento de semilla promedio de las habichuelas en este suelo fue de 1,534 kg ha⁻¹. Este rendimiento de semilla fue uno bueno en comparación con otras variedades de habichuelas evaluadas en el trópico (Rao et al., 2002). Las líneas rojas que mostraron los más altos índices de cosecha fueron: MER2226-24 (73), PR0310-19 (59) y MR13425-57-1 (58). En esta evaluación también utilizamos la variedad 'Morales' como testigo. El rendimiento de semilla de 'Morales' en este suelo fue de 1,617 kg ha⁻¹ y el índice de cosecha fue de 48.5. Este rendimiento de semilla es comparable con lo encontrado en esta variedad en suelos fertilizados en Puerto Rico.

Tabla 7. Rendimiento de semilla de las líneas negras.

Línea	Peso de semilla por parcela (g)	Rendimiento de semilla de semilla (kg ha ⁻¹)	Peso de plantas por parcela (g)	IC
MORALES	22.5	750	64.0	34.9
PPB22-40	44.0	1467	96.5	45.4
BCN20-02-30	37.0	1233	64.5	55.6
BCN20-02-49	23.5	783	59.5	39.9
BCN20-02-81	23.5	783	52.0	51.2
BCN20-02-82	40.5	1350	66.0	60.2
BCN20-02-84	29.0	967	62.0	42.4
BCN20-03-42	24.0	800	41.5	56.4
BCN20-03-55	43.0	1433	65.0	25.3
BCN20-03-62	13.5	450	43.0	31.9
MORALES	27.0	900	68.0	28.8
BCN20-03-82	37.0	1233	84.0	44.1
BCN20-05-73	45.0	1500	86.0	52.7
BCN20-07-65	48.0	1600	95.0	45.5
BCN20-20-36	38.0	1267	88.0	43.0
MN14059-7	41.5	1383	80.5	51.6
MH7-19	27.0	900	60.0	44.7
MH9-12	48.5	1617	110.5	44.1
MH59-3	49.0	1633	96.0	51.0
MR14142-39	27.5	917	50.5	59.1
MORALES	5.0	167	27.0	18.5
MR14145-36	30.5	1017	74.0	40.7
MR14212-6	30.5	1017	68.5	45.1
PR0333-8	49.5	1650	113	43.7
PR0333-27	22.5	750	76.0	30.4
PR0333-30	38.0	1267	80.5	47.2
PR0333-45	26.0	867	76.5	34.7
PR0333-90	65.0	2167	117.7	52.4
PR0333-104	46.0	1533	96.0	47.7
PR0333-169	12.5	417	40.5	33.5
MORALES	31.0	1033	82.5	35.0
PR0333-249	26.0	867	59.0	44.3
PR0333-11	52.0	1733	109	47.3
PR0333-59	44.0	1467	95.0	47.3
PR0333-86	61.0	2033	117.5	51.1
PR0333-121	65.5	2183	136	52.9
PR0333-126	56.5	1883	113	49.6
SRS66-1	36.0	1200	109.5	30.0
SRS5-9	45.0	1500	95.0	47.2
MEN2201-1	30.0	1000	67.0	45.2
MORALES	26.5	883	68.5	38.1
MEN2201-64	17.0	567	46.0	34.6
MEN2201-69	28.0	933	63.0	44.3
MEN2202-16	33.0	1100	75.0	37.8
MEN2202-18	28.5	950	85.0	45.9

Tabla 7. cont.

Línea	Peso de semilla por parcela (g)	Rendimiento de semilla de semilla (kg ha ⁻¹)	Peso de plantas por parcela (g)	IC
MEN2202-50	65.0	2167	134	48.5
MEN2202-72	40.0	1333	55.0	72.7
MEN2202-74	34.0	1133	90.5	37.5
MEN2203-38	36.0	1200	100	37.2
MEN2204-39	87.0	2900	156	55.7
MORALES	35.5	1183	80.0	42.9
MEN2204-40	30.5	1017	80.0	29.7
MEN2204-49	25.0	833	65.5	38.2
MEN2207-44	41.5	1383	90.5	46.4
MEN2207-66	7.0	233	39.0	17.9
MER2222-27	27.0	900	61.5	43.0
MER2222-48	79.5	2650	141.5	55.8
MEN2208-18	59.0	1967	112.5	53.2
MEN2208-31	61.0	2033	113.5	53.9
MORALES	46.0	1533	105	43.9
SALAGNAC	43.0	1433	104.5	41.4
A36	16.0	533	55.5	11.6
A774	18.0	600	74.0	19.1
A774	24.5	817	94.5	30.7
AND279	17.0	567	78.5	20.4
CARIOCA	22.5	750	49.0	48.9
BAT477	46.0	1533	82.0	56.1
AFR735	31.5	1050	79.5	41.2
Media	36.6	1219	81.1	42.7
DMS(0.05)	36.4	1249	64.6	26.1
CV(%)	48.6	53.3	38.9	30.3

Tabla 8. Rendimiento de semilla de las líneas rojas.

Línea	Peso de semilla por parcela (g)	Rendimiento de semilla de semilla (kg ha ⁻¹)	Peso de plantas por parcela (g)	IC
PRF9922-15R	45.5	1517	92.0	49.5
SRC2-18-49	67.5	2250	127.5	51.5
SRC2-24-12	36.5	1217	89.5	41.0
MR14148-68	34.5	1150	87.0	39.5
ALS9951-3-R1	22.0	733	58.0	39.5
ALS9951-72-R1	66.5	2217	140.5	46.5
ALS9951-81-R1	30.5	1017	72.0	43.0
ALS9951-101-R1	55.0	1833	104.5	52.5
ALS9951-140-R1	35.0	1167	76.5	46.0
MORALES	48.5	1617	99.5	48.5
ALS9951-14-R2	57.5	1917	121	48.0
ALS9951-92-R2	22.0	733	57.0	39.0
ALS9951-95-R2	29.5	983	64.5	44.5
ALS9951-98-R2	41.5	1383	82.5	49.5
ALS9951-132-R2	27.5	917	58.0	47.0
X0104-52-5-6-2	40.0	1333	94.5	42.5
MR13425-17-6	36.0	1200	77.0	46.0
MR13425-57-1	88.5	2950	152	58.0
MH4-10	44.0	1467	87.5	49.5
MH54-9	44.0	1467	96.0	46.0
MH55-3	38.0	1267	84.5	44.0
MH55-14	63.5	2117	139	46.5
MH56-16	59.5	1983	114	52.0
MR14145-26	50.5	1683	99.0	51.0
PR0310-19	56.5	1883	97.0	59.0
PR0310-85-2	37.0	1233	73.5	49.5
PR0310-140-2	48.0	1600	121.5	37.0
PR0310-222-1	32.5	1083	77.5	36.0
PR0310-222-2	43.5	1450	98.0	44.5
PR0310-235-1	54.0	1800	103	52.5
PR0310-240	53.5	1783	109.5	49.0
PR0310-243-1	32.6	1087	110	20.0
PR0310-244-1	53.0	1767	106.5	49.5
PR0310-244-2	37.0	1233	74.0	49.5
PR0308-29	47.0	1567	105	44.5
PR0308-59	48.5	1617	95.5	51.0
SRS6-6	62.5	2083	112.5	55.5
SRS55-8	56.0	1867	116.5	48.0
MER2212-28	60.0	2000	121	49.5
MER2212-35	56.5	1883	113	49.0
MER2221-20	33.0	1100	73.5	44.5
MER2221-25	38.5	1283	86.0	44.5
MER2221-30	58.5	1950	109	54.0
MER2221-42	38.5	1216	79.0	46.0
MER2224-5	44.5	1483	97.0	46.0

Tabla 8. cont.

Línea	Peso de semilla por parcela (g)	Rendimiento de semilla de semilla (kg ha ⁻¹)	Peso de plantas por parcela (g)	IC
MER2225-67	50.5	1683	108	46.0
SALAGNAC 90A	48.5	1617	92.5	51.0
MER2225-74	50.5	1683	96.5	52.0
MER2226-10	41.5	1383	94.0	44.0
MER2226-12	31.5	1050	105	31.0
MER2226-20	25.5	850	66.0	34.5
MER2226-22	40.5	1350	90.5	45.0
MER2226-23	43.0	1433	95.0	45.5
MER2226-24	49.5	1650	67.0	73.0
MER2226-28	48.5	1617	115	42.0
MER2226-29	33.4	1113	81.4	42.0
MER2226-33	25.5	850	64.5	40.0
MER2226-34	51.0	1700	114	43.5
MER2226-35	41.0	1367	81.5	46.5
MER2226-36	42.0	1400	91.0	46.5
MER2226-39	55.5	1850	123.5	46.0
MER2226-45	37.5	1250	103.5	36.5
MER2227-42	5.3	177	89.4	5.0
MER2228-1	24.0	800	92.0	46.0
MER2228-15	28.0	933	97.0	44.5
MFP2241-26	40.5	1350	88.5	46.0
MFP2241-30	27.0	900	76.0	38.0
MFP2241-33	72.5	2417	127.5	56.5
MFP2241-36	64.5	2150	115	56.0
MFP2241-39	57.0	1900	107	53.0
MFP2241-56	57.0	1900	104.5	54.0
MFP2241-59	70.0	2333	135.5	51.5
Media	46.0	1534	97.0	46.4
DMS(0.05)	31.7	1063.8	62.3	23.1
CV(%)	34.1	35.1	31.9	24.6

Tabla 9. Análisis de varianza del rendimiento de semilla de las líneas del VIDAC.

Fuente de variación	Gl		Cuadrados Medios	
	VIDAC-rojo	VIDAC-negro	VIDAC-negro	VIDAC-rojo
Repetición	1	1	138369	1025493
Línea	71	67	590023*	489685*
Error	71	67	396126	274326

*p>0.05

Conclusión y Recomendaciones

La variedad de habichuela 'Morales' no mostró una disminución significativa en el rendimiento en una concentración de Al^{3+} intercambiable en el suelo de $3.84 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y un pH de 4.78. El rendimiento de semilla promedio máximo obtenido fue de $1,279 \text{ kg ha}^{-1}$. Este se obtuvo a un pH de 5.17 y un contenido de Al^{3+} intercambiable de $1.67 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. El aumentar el pH de 4.78 a 5.17 no ocasionó un incremento significativo en el rendimiento de semilla de la variedad 'Morales'. Se observó un rendimiento menor de semilla de 'Morales' al aumentar el pH más de 5.17.

El análisis de regresión indicó que no hubo disminución significativa en el rendimiento de semilla de Morales hasta alcanzar niveles de Al^{3+} intercambiable mayores de $6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Este puede ser un indicativo de tolerancia al aluminio por esta variedad. En variedades susceptibles se empieza a observar el efecto del aluminio en concentraciones menores de $2.5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Goenaga y Smith, 2002).

En la segunda evaluación de la variedad 'Morales' no se observaron diferencias significativas en el rendimiento de semilla entre el tratamiento con un contenido de Al^{3+} intercambiable de $3.44 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y los demás tratamientos. En este tratamiento se obtuvo un rendimiento de semilla promedio de 862 kg ha^{-1} . Este valor representa un 83% del rendimiento de semilla promedio máximo observado ($1,028 \text{ kg ha}^{-1}$) a una concentración de Al^{3+} intercambiable de $0.86 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ y a un pH de 6.45. Los índices de cosecha en esta evaluación no fueron similares a los obtenidos en la primera evaluación. La primera evaluación se realizó en la época seca mientras que la segunda evaluación se realizó en la época de lluvia. Los índices

de cosecha fueron similares en todos los tratamientos. Sin embargo estos fueron más bajos que en la primera evaluación indicando un mayor crecimiento vegetativo.

El análisis nutricional indicó un contenido promedio bajo de calcio en las hojas en el tratamiento con una concentración de Al^{3+} intercambiable de $3.44 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Este tratamiento mostró la menor concentración de Ca^{2+} en el suelo. En el contenido foliar de aluminio no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos.

La variedad 'Morales' muestra cierto grado de tolerancia a Al^{3+} intercambiable en el suelo estudiado. Estudios posteriores deben realizarse con ésta y otras variedades que sean consideradas como tolerantes al Al^{3+} intercambiable. Estos deben ser realizados bajo condiciones de campo y las plantas deben ser analizadas luego de completar la madurez fisiológica. Además, se deben de estudiar las raíces de las plantas, ya que es la parte que más se afecta y donde se concentra la mayor parte del aluminio. Así podremos determinar mejor y comparar la tolerancia al aluminio de ésta y otras variedades.

En el estudio de las líneas del VIDAC se pudieron identificar las líneas que mejor se desarrollaron en este tipo de suelo con la utilización de encalado. El promedio de producción de las líneas rojas del VIDAC evaluadas en un suelo con un pH de 6.45 fue de $1,534 \text{ kg ha}^{-1}$. La línea que obtuvo el mayor rendimiento de semilla fue MR 13425-57-1 con una producción de $2,950 \text{ kg ha}^{-1}$. El promedio de las líneas negras del VIDAC evaluadas en un suelo con un pH de 5.20 fue de $1,219 \text{ kg ha}^{-1}$. La línea negra con el mayor rendimiento de semilla fue MEN 2204-39 ($2,900 \text{ kg ha}^{-1}$). Las líneas que mostraron los rendimientos de semilla mayores deben ser material de evaluación para determinar su tolerancia a concentraciones más altas de aluminio.

Se debe realizar la misma investigación en otros tipos de suelos también ácidos como Oxisoles e Inceptisoles para poder observar mejor el efecto que tiene el aluminio en el desarrollo

de la variedad 'Morales'. El suelo Corozal se caracteriza como arcilloso con una alta retención de humedad. Las plantas de habichuela como muchos otros cultivos necesitan crecer en suelos con buena capacidad de drenaje. Esto disminuye el desarrollo de hongos y otras plagas en la planta que pueden afectar la calidad de la semilla en el momento de la cosecha.

Para poder determinar y entender mejor la tolerancia de 'Morales' a suelos con toxicidad de aluminio se debe estudiar la capacidad de esta variedad de liberar ácidos orgánicos. Se deben comparar los resultados obtenidos en este experimento con la capacidad de esta variedad de liberar este tipo de compuestos. Si comparamos esta variedad con otras ya estudiadas en cuanto a la capacidad de liberar ácidos orgánicos podremos demostrar con mayor certeza la tolerancia de la variedad 'Morales' a la toxicidad de aluminio.

Referencias

- Abruña, F., R. Pérez-Escolar, J. Vicente-Chandler, J. Figarella and S.Silva. 1974. Response of green beans to acidity factors in six tropical soils. *J. Agric. Univ. P.R.* 58(1):44-58.
- Abruña, F., J.A. Rodríguez García y J. Badillo-Feliciano, S. Silva, and J. Vicente-Chandler. 1978. Crop response to soil acidity factors in Ultisols and Oxisols in Puerto Rico-Soybeans. *J. Agric. Univ. P.R.* 62(1):90-112.
- Buerkert, A., K.G. Cassman, R. de la Piedra, and D.N. Munns. 1990. Soil Acidity and Liming Effects on Stand, Nodulation, and Yield of Common Bean. *Agronomy Journal* 82: 749-754.
- Chardon, U. 2004. Evaluation of Aluminum Tolerance in Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.), Grown Under Screenhouse Conditions. Univ. P.R. thesis.
- Delhaize, E. and P. Ryan. 1995. Aluminum toxicity and tolerance in plants. *Journal of Plant Physiol.*107:315-321.
- Foy, C.D., W.H. Armiger, A.L. Fleming, and W.J. Zaumeyer. 1967. Differential tolerance of dry bean, snap bean, and lima bean varieties to an acid soil high in exchangeable aluminum. *Agronomy Journal* 59: 561-563.
- Foy, C.D., A.L. Fleming, and G.C. Gerloff. 1972. Differential aluminum tolerance in two snapbean varieties. *Agronomy Journal* 64: 815-818.
- Goenaga, R. and J.R Smith. 2002. Dry matter production and leaf elemental concentrations of common bean grown on an acid ultisol. *Journal of Plant Nutrition.* 25(1):103-112.
- Gunsé, B., Teresa Garzón and Juan Barceló. 2003. Study of aluminum by means of vital staining profiles in four cultivars of *Phaseolus vulgaris* L. *Journal of Plant Physiol.* 12:1445-1448.
- Harter, R.D. 2002. Acid soils of the tropics. An echo technical note. Univ. of New Hampshire.
- Haynes, R.J. and M.S. Mokolobate. 2001. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and mechanisms. *Nutrient Cycling in Agroecosistemas.* 59: 47-63.
- Hocking, P.J. 2001. Organic acids exuded from roots in phosphorus uptake and aluminum tolerance of plants in acid soils. *Advances in Agronomy* Vol. 74. pp 63-89.
- Hue, N.V and H. Ikawa. 1999. Acid Soils in Hawaii: Problems and Management. Department of Agronomy and Soil Science. University of Hawaii at Manoa.

- Hue, N.V and H. Ikawa. 2003. Acid Soils in Hawaii: Problems and Management. Department of Agronomy and Soil Science. University of Hawaii at Manoa.
- Ma, J.F, S. Hiradate and H. Matsumoto. 1998. High aluminum resistance in buckwheat. *Journal of Plant Physiol.* 117:753-759.
- Miyasaka, S.C and M.C Hawes. 2001. Possible role of root border cells in detection and avoidance of aluminum toxicity. *Journal of Plant Physiol.* 125:1978-1987.
- Miyasaka, S.C, J. George Buta, Robert K. Howell and Charles D.Foy. 1991. Mechanism of aluminum tolerance in Snapbeans. *Journal of Plant Physiol.* 96:737-743.
- Muñiz, O. 1986. Análisis de suelo y tejido – interpretación y recomendaciones. Servicio de Extensión Agrícola.
- Pellet, D.M, D.L Grunes and L.V Kochian. 1995. Organic acids as an aluminum-tolerance mechanism in maize (*Zea mays* L.). *Planta.* 196:788-795.
- Pellet, D.M, L.A Papernik and L.V. Kochian. 1996. Multiple aluminum-resistance mechanism in wheat. *Journal of Plant Physiol.* 112:591-597.
- Peter, R.R, T.B Kinraide and L.V Kochian. 1994. Al^{3+} - Ca^{2+} interactions in aluminum rhizotoxicity. *Planta.* 192:98-103.
- Rao, Idupulapati M., Stephen Beebe, Jaumer Ricaurte, Henry Terán and Shree P. Sinhg. 2002. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotype tolerant to aluminum-toxic soils in the tropics. Bean Annual Report, CIAT, Colombia.
- Rout, G.R, S. Samantaray and P. Das. 2001. Aluminum toxicity in plants:a review. *Agronomie.* 21:3-21.
- Sánchez, P.A. 1976. Properties and Management of Acid Soils in the Tropics. John Wiley, New York.
- Smith, J.R and R. Goenaga. 2005. Field performance of two snap bean cultivars at varying levels of exchangeable aluminum. *Journal of Plant Nutrition.* 28:237-246.
- Soil acidity and aglime. *Agronomy Facts* 3. Pennstate College of Agricultural Sciences. Cooperative Extension.
- Sparks D. L. 1996. Methods of Soil Analysis Part 3 – Chemical Methods. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA. 1390 p.