

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

EVALUACIÓN DEL EFECTO ACIDIFICANTE DE DOS FERTILIZANTES  
FOSFORADOS Y TRES NITROGENADOS EN LAS CARACTERÍSTICAS  
QUÍMICAS DE LA RIZOSFERA, Y EN EL CRECIMIENTO INICIAL DE UNA  
PLANTA INDICADORA

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del  
Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales  
para optar por el grado y título de  
Maestría Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales  
con énfasis en Suelos

JOSÉ ANTONIO BEJARANO FERNÁNDEZ

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2011

## DEDICATORIA

A Dios por la salud y fortaleza que me ha dado en todos los momentos de mi vida.

A Marce, mami y toda mi familia por el apoyo y paciencia que siempre me han brindado en mi desarrollo profesional y personal.

A Floria por tomarme de la mano siendo un niño y ayudarme en convertirme en un profesional triunfador, siempre intentaré seguir tus pasos.

## AGRADECIMIENTO

Al Dr. Eric Guevara por su dedicación a muchos estudiantes que estábamos retrasados con la finalización de esta etapa de estudios, sin su empuje no hubiera finalizado esto con buen puerto.

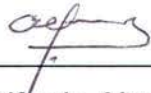
A Floria por sus consejos, guía, dirección y colaboración durante todo el proyecto, desde el primer intento de tesis hasta la finalización de este segundo proyecto.

A mi madre por su esfuerzo en darme todos los estudios que requerí durante mi preparación profesional, así como su gran dirección en la vida, sin su apoyo estaría en cualquier otro lugar menos en donde me encuentro.

A Marce y el resto de mi familia, gracias por su ayuda como peones durante las evaluaciones y demás labores que tuvieron que desarrollar para ayudarme.

A Abonos del Pacífico y en especial al departamento técnico por su tiempo y colaboración económica, para la realización de este trabajo.

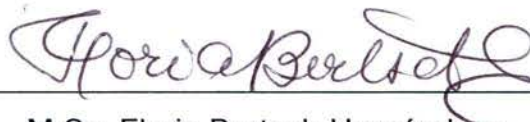
“Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado y título de Maestría Académica en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales con énfasis en Suelos”



---

Dr. Alfredo Alvarado Hernández

Representante del Decana Sistema de Estudios de Posgrado



---

M.Sc. Floria Bertsch Hernández

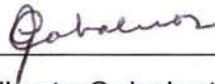
Directora de Tesis



---

M.Sc. Esteban Loria Solano

Asesor



---

M.Sc. Gilberto Cabalceta Aguilar

Asesor



---

Dr. Eric Guevara Berger

Director Programa de Posgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales



---

José Antonio Bejarano Fernández

Candidato



## TABLA DE CONTENIDOS

CONTENIDO	Página
PORTADA.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
HOJA DE APROBACIÓN.....	iv
TABLA DE CONTENIDOS.....	v
RESUMEN.....	ix
LISTA DE CUADROS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos.....	4
1. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
1.1 Aspectos generales sobre acidez.....	5
1.2 Factores que afectan la acidificación del suelo.....	7
1.2.1 Precipitación.....	7
1.2.2 Descomposición de residuos orgánicos.....	7
1.2.3 Actividad de los microorganismos.....	8
1.2.4 Lluvia ácida.....	8
1.2.5 Remoción de cationes básicos del suelo.....	8
1.2.6 Acidificación causada por fertilizantes.....	9
1.2.6.1 Fertilizantes fosforados.....	9

1.2.2.2 Fertilizantes nitrogenados.....	9
1.3 La rizosfera de las plantas.....	10
1.3.1 Absorción de nutrientes por las plantas.....	13
1.3.2 Crecimiento de plantas bajo condiciones de acidez.....	14
1.3.3 Crecimiento de plantas ante condiciones de P limitante....	15
1.4 Aspectos relevantes de la nutrición con P y de los fertilizantes fosforados.....	17
1.4.1 Aspectos generales.....	17
1.4.2 Formas de P en el suelo.....	18
1.4.3 Características de los fertilizantes fosforados.....	19
1.4.4 Reacciones de los fertilizantes fosforados en el suelo.....	21
1.5 Aspectos relevantes de la nutrición con N y de los fertilizantes nitrogenados .....	23
1.5.1 Aspectos generales.....	23
1.5.2 Formas de N en el suelo.....	25
1.5.3 Características de los fertilizantes nitrogenados .....	26
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
2.1 Ubicación del trabajo y selección del suelo .....	29
2.2 Análisis químico y textural del suelo.....	29
2.3 Primer experimento.....	31
2.3.1 Descripción de tratamientos y diseño experimental.....	31
2.3.2. Preparación del suelo, siembra y aplicación de tratamientos.....	31
2.3.3 Evaluaciones.....	35

2.4 Segundo experimento.....	38
2.4.1 Descripción de tratamientos y diseño experimental.....	38
2.5 Tercer experimento.....	39
2.5.1 Descripción de tratamientos y diseño experimental.....	39
2.6 Evaluación de la solución de fuentes fosforadas en agua.....	40
2.7 Efecto sobre la composición química del suelo.....	41
2.8 Análisis de datos.....	42
3. RESULTADOS y DISCUSIÓN.....	43
3.1 Fertilizantes fosforados.....	43
3.1.1. Efecto de la solución de las fuentes de P en el pH del agua..	43
3.1.2 Efecto de las fuentes de P en la germinación de semillas de arroz.....	45
3.1.3 Efecto de las fuentes de P en el crecimiento inicial de plantas de arroz.....	46
Variables de crecimiento aéreo.....	46
Variables de crecimiento radical.....	49
3.1.4 Efecto de las fuentes de P en el suelo.....	51
3.1.4.1 Efecto sobre el pH del suelo.....	51
Prueba de invernadero.....	51
Prueba en bandejas de laboratorio.....	56
3.1.4.2 Efecto sobre el contenido de nutrientes en el suelo..	58
Prueba en invernadero.....	58
Prueba en bandejas de laboratorio.....	65

3.1.4.3 Efecto de las fuentes de P en la disponibilidad de N..	70
3.1.4.4 Efecto de las fuentes de P en la curva de disponibilidad de P.....	72
3.2. Efecto de los fertilizantes nitrogenados.....	74
3.2.1 Efecto de las fuentes de N en el crecimiento inicial de plantas de arroz.....	74
Variables de crecimiento aéreo.....	74
Variables de crecimiento radical.....	79
3.2.2 Efecto de las fuentes de N en el suelo.....	80
3.2.2.1. Efecto sobre el pH del suelo.....	80
3.2.2.2. Efecto sobre el contenido de nutrientes en el suelo.....	84
4. CONCLUSIONES.....	87
4.1 GENERALES.....	87
4.2 FUENTES FOSFORADAS.....	88
SOBRE EL pH DEL SUELO.....	88
SOBRE DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES.....	88
SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE UNA PLANTA INDICADORA....	89
4.3 FUENTES NITROGENADAS .....	90
SOBRE EL pH DEL SUELO.....	90
SOBRE DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES .....	90
SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE UNA PLANTA INDICADORA....	91
LITERATURA CITADA.....	92

## RESUMEN

Se determinó la magnitud, duración y distancia del efecto acidificante en el suelo y la rizosfera con dos fertilizantes fosforados (FF) con base amoniacal y tres fertilizantes nitrogenados (FN). Para esto se realizaron dos trabajos de invernadero y otro de laboratorio, en el primero de invernadero se aplicaron  $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  utilizando DAP y MAP como fuentes de P. Después de 30 días se aplicaron  $93 \text{ kg N ha}^{-1}$  como urea (Ur), nitrato de amonio (NA) y nitrato de Ca (NCa), sobre los fertilizantes de siembra. Se valoró su efecto en el crecimiento de arroz como planta indicadora, así como el efecto sobre el pH y en la composición química del suelo sobre la línea de aplicación (0 cm) y a 2 cm de ella. También se compararon dos dosis de los FF 120 y  $240 \text{ kg ha}^{-1}$ , a través de los mismos parámetros en invernadero y bandejas de laboratorio, además se midió el amonio y nitrato del suelo. El efecto de los FF sobre el pH del suelo fue de mayor magnitud, menor duración y menor distancia que el de los FN. Ante aplicaciones de fuentes fertilizantes el área rizosférica sufrió cambios más fuertes y en tiempos más cortos a los encontrados en el suelo. Para detectar efectos de fuentes sobre el pH de los suelos es importante utilizar condiciones más controladas, intervalos más cortos y sitios de muestreo más cercanos al lugar de aplicación. En laboratorio bajo condiciones controladas los efectos fueron más definidos. La interpretación de los resultados de análisis de suelos y foliares mediante el uso de los porcentajes de saturación de bases, constituyeron una alternativa que permitió detectar cambios en las bases. La germinación y el crecimiento de la planta de arroz no fueron afectados por los FF ni por los FN. El efecto alcalinizante del DAP fue de 0,8 unidades y el acidificante del MAP de 0,4, y ocurren en los 5 días posteriores a la aplicación. Estos efectos fueron confirmados mediante la medición de pH en: la disolución de las fuentes en agua; en el suelo en bandejas de laboratorio; y sobre la línea de aplicación en cultivo en invernadero. Bajo condiciones controladas de laboratorio los efectos de las fuentes de P se mantuvieron hasta por 18 días. Bajo condiciones de invernadero la acidificación ocasionada por el componente amoniacal de los FF queda claramente establecida a partir de los 12 días después de aplicación (dda), y fue mayor con el DAP por su mayor aporte de N. La aplicación de los FF ocasionó un fuerte incremento en la disponibilidad de este nutriente a 0 cm, que perdura hasta los 75 dda, y cuya magnitud se incrementa al aumentar la dosis. A tan sólo 2 cm la disponibilidad de P no aumentó y el incremento en dosis apenas ocasionó un leve efecto. Con la aplicación de los FF los contenidos de amonio en el suelo son mayores a los de nitrato. Para el amonio, con la fuente con más aporte de N, la mayor dosis y a 0 cm se obtuvieron mayores valores, mientras que el nitrato no varió. Las plantas que recibieron DAP como FF mostraron datos más altos de N, debido al mayor aporte de N que ofrece esta fuente. Los FN variaron el pH del suelo en forma significativa y similar a 0 y 2 cm, causando una disminución inicial del pH seguida por una alcalinización. El NA presentó el menor valor de pH final, mientras que el NCa el mayor. El impacto de los FN sobre el pH de la rizosfera es mayor que en el suelo. El uso del NCa como FN ocasionó un incremento en la disponibilidad de Ca que perduró hasta cerca de los 35 dda. El uso del NCa incrementó los contenidos de Ca y B en forma sostenida, ya que son constituyentes de la fuente y no fueron compensados en las otras fuentes.



## LISTA DE CUADROS

Cuadro	Título	Página
1	Resultado del análisis químico de suelos, del suelo extraído de Carrillo, Guanacaste, junio 2008.	30
2	Resultado del análisis textural de suelos, del suelo extraído de Carrillo, Guanacaste, junio 2008.	30
3	Altura y peso seco aéreo de plantas de arroz a los 20 días después de emergencia, con incorporación el día de siembra de 120 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo (DAP y MAP).	46
4	Análisis de tejido aéreo a los 20 y 25 días después de emergencia, con la incorporación el día de siembra de 120 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo (DAP y MAP), en invernadero.	47
5	Análisis de tejido radical a los 25 días después de emergencia, con la incorporación el día de siembra de 120 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo (DAP y MAP) en invernadero.	50
6	Análisis químico de suelo inicial y a 1, 5, 10 y 21 dda 120 kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> y a los 1 y 10 dda 240 kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo (DAP y MAP), sobre la línea de aplicación, en invernadero.	59
7	Análisis químico de suelo inicial y a 1, 5, 10 y 21 dda 120 kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> y a los 1 y 10 dda 240 kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo (DAP y MAP), a 2 cm de la línea de aplicación, en invernadero, en invernadero.	59
8	Análisis químico de suelo inicial y a 1 y 10 dda 120 y 240 kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> , a 0 y 2 cm de la línea de aplicación de dos fuentes de fósforo (DAP y MAP), en invernadero.	65
9	Análisis químico de suelo inicial y a 1, 5, 10 y 18 dda 120 y 240 kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> , con dos fuentes de fósforo (DAP y MAP), en bandejas de laboratorio.	66
10	Altura de planta, tasa de crecimiento y peso seco radical por planta a los 55 dde, 35 dda 93 kg de N ha <sup>-1</sup> con nitrato de amonio, nitrato de calcio y Urea, en invernadero.	75



11	Análisis de tejido aéreo a los 25 dde, 5 dda 93 kg N ha <sup>-1</sup> con nitrato de amonio, nitrato de calcio y Urea a los 20 dde, en invernadero.	76
12	Análisis de tejido aéreo a los 55 dde, 35 dda 93 kg N ha <sup>-1</sup> con nitrato de amonio, nitrato de calcio y Urea a los 20 dde, en invernadero.	77
13	Peso seco y análisis de tejido radical a los 55 dde, 35 dda 93 kg de N ha <sup>-1</sup> con nitrato de amonio, nitrato de calcio y Urea, en invernadero.	80
14	Análisis de suelo, sobre la línea de aplicación, desde 0 a 44 dda 93 kg de N ha <sup>-1</sup> con nitrato de amonio (NA), nitrato de calcio (Nca) y Urea (Ur).	85

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1	Distribución de hileras y plantas en cada caja. Izquierda: esquema; Derecha: foto.	32
2	Molienda, distribución e incorporación del fertilizante de siembra.	33
3	Siembra del arroz, acomodo de semillas en la hilera y siembra completamente realizada.	34
4	Molienda y aplicación de fertilizantes nitrogenados.	35
5	Medición del pH del agua 1, 2 y 5 dda 120 y 240 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg ha <sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo: DAP (D) y MAP (M), utilizando agua con pH 7,8, en laboratorio.	43
6	Variación del pH del agua con la aplicación de 120 y 240 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg ha <sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo: DAP (D) y MAP (M), en laboratorio.	44
7	Peso seco radical por planta de arroz a los 20, 25 y 45 días después de emergencia, con la incorporación el día de siembra de 120 kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo (DAP y MAP) en invernadero.	49
8	Variación del pH del suelo, sobre la línea de aplicación (A) y a 2 cm (B), a 1, 4, 5, 7, 10, 12 y 21 dda 120 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo: DAP y MAP, en invernadero.	51
9	Variación del pH del suelo, en la línea de aplicación (A) y a 2 cm (B) 1, 4, 7 y 10 dda 120 y 240 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo: DAP y MAP, en invernadero.	54
10	Variación del pH del suelo, sobre la línea de aplicación (A) y a 2 cm (B), entre el día de siembra y los 75 dda 120 kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo: DAP y MAP, más la aplicación de 93 kg N ha <sup>-1</sup> a los 30 dda el fertilizante fosforado, en invernadero.	55
11	Variación del pH del suelo entre 1 y 18 dda 120 y 240 kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo: DAP (D) y MAP (M), realizado en bandejas en laboratorio.	56
12	Relación entre saturación de acidez y pH del suelo (A), y contenido de P (B), sobre la línea de aplicación de DAP y MAP a 120 y 240 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> , en	62

	invernadero.	
13	Relación entre el contenido de P en el y la saturación de calcio, sobre la línea de aplicación de DAP y MAP a 120 y 240 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> , en invernadero.	63
14	Relación entre saturación de calcio y contenido de P, con la aplicación de DAP y MAP a 120 y 240 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> , en bandejas de laboratorio.	67
15	Relación entre saturación de acidez y ph del suelo (A), y P disponible (B), con la aplicación de DAP y MAP a 120 y 240 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> , en bandejas de laboratorio.	68
16	Acidez intercambiable ante MAP (M) y DAP (D) y dos dosis 120 y 240 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> , en bandejas de laboratorio.	69
17	Contenido de amonio y nitrato en el suelo, sobre la línea de aplicación 1, 4, 7 y 10 dda 120 (A1 y A2) y 240 (B1 y B2) kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo: DAP (D) y MAP (M), en invernadero.	70
18	Contenido de amonio y nitrato en el suelo, a 2 cm de la línea de aplicación a 1, 4, 7 y 10 dda 120 (A1 y A2) y 240 (B1 y B2) kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo: DAP (D) y MAP (M).	72
19	Disponibilidad de P sobre la línea de aplicación de 120 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> con DAP y MAP, y luego de 93 kg N ha <sup>-1</sup> con Urea, NA y NCa.	73
20	Comparación de absorción de bases por plantas de arroz 5 y 35 dda 93 kg N ha <sup>-1</sup> con nitrato de amonio (NA), nitrato de calcio (NCa) y Urea (Ur) , en invernadero.	79
21	Variación del pH del suelo, sobre la línea de aplicación, de 0 a 44 dda 93 kg de N ha <sup>-1</sup> con nitrato de amonio (NA), nitrato de calcio (NCa) y Urea (Ur), en invernadero.	81
22	Variación del pH de la rizosfera a 1, 5 y 35 dda 93 kg de N ha <sup>-1</sup> con nitrato de amonio (NA), nitrato de calcio (NCa) y Urea (Ur), en invernadero.	83

## INTRODUCCIÓN

La acidez de los suelos es una de las principales limitantes de la producción agrícola mundial, ya que al menos el 40%, y en ocasiones hasta el 70% de la tierra arable a nivel mundial, presenta este problema (Rengel, 2003). En la producción agrícola de Costa Rica los problemas de acidez son de gran importancia, ya que según Molina (1998), un 20-25% de los suelos del país tienen características ácidas y otro porcentaje similar podría ser, por mal manejo, inducido a acentuar su acidificación.

Naturalmente, la acidificación es un proceso lento que ocurre durante la pedogénesis, sin embargo puede ser acelerado o retrasado por las prácticas agrícolas (Quaggio, 2000; Tang y Rengel, 2003). Uno de los principales efectos que tiene la acidez del suelo, es que puede controlar o por lo menos influir fuertemente sobre la solubilidad y precipitación de compuestos químicos, de muchos de los nutrientes esenciales para la planta, especialmente en el área rizosférica (Claassen, 2007b) y por lo tanto es un factor decisivo para su disponibilidad (Prasad y Power, 1997).

El principal problema de la acidez es la presencia de  $Al^{+3}$  en la solución del suelo, pues afecta dramáticamente el crecimiento radicular impidiendo a la planta absorber nutrientes y agua, ya que inhibe la división celular de los tejidos meristemáticos de la raíz (Valencia, 1998).

Según Prasad y Power (1997), los factores que más afectan la acidificación de los suelos son el tipo y cantidad de fertilizante utilizado, la cantidad de cationes extraídos por el cultivo, la magnitud de la lixiviación, la intensidad de la descomposición de los residuos orgánicos, las transformaciones del N en el suelo, y la presencia de lluvia, que, además de influir sobre la lixiviación, puede depositar ácidos, nitratos y/o sulfatos.

Debido a que las compañías que suministran fertilizantes se han dado a la tarea de utilizar fórmulas que no contengan piedra calcárea como relleno, se ha venido utilizando en mayor medida las fuentes puras para realizar, principalmente, las abonadas de siembra (p.e. fosfato diamónico (DAP) y fosfato monoamónico (MAP) por sus siglas en inglés), por lo que toma mayor importancia el efecto directo e indirecto de cada fuente fertilizante en el suelo al ser aplicada.

Los fertilizantes pueden acidificar o basificar, y/o también salinizar el medio. Este efecto varía según cada fertilizante; los más acidificantes son los amoniacales especialmente el sulfato de amonio, así como la urea, nitrato de amonio y fosfatos de amonio; los potásicos y el triple superfosfato tienen reacción neutra, mientras que los nitratos y la roca fosfórica tienen reacción básica. La acidificación por efecto de los fertilizantes está determinada por factores como las características del suelo, el sistema de cultivo, el método y las dosis de aplicación del producto, sin embargo la fuente de N es la más reconocida en tener influencia sobre la acidificación (Bertsch, 1995; Adams y Martin, 1984).

La eficiencia en el uso de los fertilizantes no sólo debe incrementarse para disminuir su efecto acidificante en el suelo sino que hay que considerar la ventaja que eso representa en la conservación del ambiente, y también el frecuente incremento y fluctuación en el precio de los fertilizantes durante los últimos años. Durante el 2007, el costo de la Urea granular FOB en Venezuela en la primera semana de enero (el precio viene dado por tonelada de producto) era \$287.5 y el precio al 13 de diciembre fue de \$415; para el caso del DAP el precio a inicios del 2007 era de \$256.5 y en diciembre llegó a \$593.5, lo que corresponde a un incremento del 44% para la Urea y 131% para el DAP en un mismo año (FMB Consultants Ltd., 2007a; FMB Consultants Ltd, 2007b). Este efecto fue dramático durante el 2007, y posteriormente a ese año los precios nuevamente bajaron, sin embargo es posible detectar la tendencia al incremento a largo plazo. Por ejemplo, la Urea prilada que en enero del 2006 costaba cerca de \$200 tanto en Yuzhny (Rusia) como en el Medio Oriente, a finales del 2009 tenía un precio de \$260, lo que representa un incremento global del 30% entre el 2006 y el 2009. El DAP costaba \$220 a inicios

del 2006 y, para finales del 2009 el precio era de \$330, lo que representa un incremento del 50% (FMB Consultants Ltd, 2009; The Market, 2007).

Debido a la diversidad de efectos de los fertilizantes sobre la acidificación de los suelos, es de gran utilidad conocer claramente el efecto de las principales fuentes que se usan sobre los suelos de nuestro país, con el fin de propiciar el uso más racional de los mismos, especialmente al elegirlos para formar parte de las mezclas físicas a recomendar. Lo importante será conocer con gran detalle sus efectos inmediatos, para que la toma de decisión sobre el uso de una fuente u otra no se rijan sólo por los precios internacionales sino que considere todos los aspectos técnicos que sean pertinentes, incluso la ejecución de prácticas complementarias que permitan conservar la productividad de nuestros suelos.

En el caso de los fertilizantes fosforados que se usan principalmente al momento de la siembra es de gran importancia determinar el efecto que puedan tener en el suelo durante el establecimiento inicial del cultivo.



**Objetivo general:**

Determinar la magnitud, duración y distancia del efecto de dos fertilizantes fosforados con base amoniacal y tres fertilizantes nitrogenados, en el suelo y la rizosfera de la planta.

**Objetivos específicos:**

- Evaluar el efecto de dos fuentes fertilizantes utilizadas para suplir P (DAP y MAP), y de tres fuentes fertilizantes utilizadas para suplir N (Urea, Nitrato de Amonio y Nitrato de Ca) en la composición química (principalmente pH) del suelo inmediato a la zona de aplicación.
- Comparar el efecto de las fuentes fosforadas por dosis de aplicación.
- Determinar el efecto de cada una de las fuentes fertilizantes sobre el crecimiento inicial de una planta indicadora (germinación, peso seco, altura, crecimiento radical, etc.).
- Cuantificar el efecto de cada una de las fuentes fertilizantes sobre el crecimiento de los cultivos, a través de la concentración de nutrientes de una planta indicadora en invernadero.
- Valorar el aporte inmediato de N posterior a la aplicación de los fertilizantes fosforados, mediante análisis de nitratos y amonio.
- Determinar la curva de disponibilidad de P según dosis y fuente fertilizante utilizada.

# 1. REVISIÓN DE LITERATURA

## 1.1 Aspectos generales sobre acidez

La nutrición mineral de plantas es el principal factor ambiental al cual responden las plantas. El suplemento y absorción de nutrientes y su metabolismo están afectados por condiciones climáticas y de suelo (Shuman, 2000).

La acidez, como fenómeno natural que comienza a originarse lentamente durante el proceso de formación de los suelos (Bloom, 2000) es de gran importancia en la agricultura mundial; del área libre de hielo en el mundo, el 30% está ocupada por suelos ácidos. En zonas tropicales los principales órdenes de suelo son Oxisoles (22% del área) y Ultisoles (18%), y ambos presentan características ácidas (Matsumoto, 2002). En Costa Rica los Ultisoles y Alfisoles representan aproximadamente el 30% del territorio (Mata, 1991, citado por Bertsch *et al.* 2000) y los otros órdenes abundantes, Andisoles e Inceptisoles están dentro de los suelos con frecuentes problemas de acidez (Molina, 1998).

El efecto químico limitante para las plantas en suelos ácidos es la alta disponibilidad de H, Al y Mn, así como la disminución en la disponibilidad de cationes Ca, Mg y K y en la solubilidad de P y Mo; todo lo anterior ocasiona una limitación en el crecimiento radical así como un incremento en lixiviación (deficiencia de minerales) (Clark y Baligar, 2000).

Este pobre crecimiento de los cultivos en suelos ácidos es usualmente atribuido al efecto directo de la toxicidad del Al sobre las raíces (Sumner y Noble, 2003), que consiste en una inhibición de la división y extensión celular (Clark y Baligar, 2000; Matsumoto, 2002). En la mayoría de suelos ácidos el Al y Mn intercambiables son los principales elementos tóxicos. Según Baligar *et al.* (1998) citados por Matsumoto (2002), en Oxisoles y Ultisoles la saturación de Al puede llegar a valores tan altos como 94%. El Al existe en el suelo como óxidos o aluminosilicatos; a pH<5 el

$\text{Al}^{+3}$  se encuentra como octaedro hexahidratado,  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$  que es abreviado como  $\text{Al}^{+3}$ , siendo la especie más tóxica para las plantas, mientras que cuando la solución del suelo se torna menos ácida, el  $\text{Al}^{+3}$ , se desprotona y se convierte primero en  $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$ , y posteriormente en  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ . Estas formas son menos tóxicas, mientras que en soluciones neutras el  $\text{Al}(\text{OH})_3$  se precipita como gibsita, que se redisuelve en soluciones básicas ( $\text{pH} > 9$ ) dando como resultado la formación del tetrahedro  $\text{Al}(\text{OH})_4$  como anión aluminato (que a  $\text{pH}$  por debajo de 5 no es significativo) (Matsumoto, 2002). Existen otros compuestos con Al, entre estos se pueden citar los compuestos con sulfatos, que, incluso bajo condiciones locales (López y González 1987), se ha confirmado que no causan problemas de toxicidad para las plantas. Igualmente soluciones del suelo con altos niveles de complejos de Al-floruro normalmente no son tóxicas (Matsumoto, 2002). Por último es bien conocido el efecto de compuestos orgánicos para disminuir el efecto tóxico del Al para los cultivos al acomplejarlo e indisponibilizarlo (Kinraide, 1991).

Por su parte, a los  $\text{H}^+$  por lo general, se les asigna un efecto indirecto, al ocasionar un incremento en la solubilidad de elementos tóxicos como Al, Mn y Fe. Las plantas pueden crecer normalmente a  $\text{pH}$  relativamente bajo (3.5-4.0) si la fuente de acidez en la solución del suelo es solamente  $\text{H}^+$  (Valencia, 1998). Sin embargo también se conoce que el  $\text{H}^+$  puede tener un efecto directo sobre nodulación y crecimiento radical, así como ocasionar una disminución en la capacidad de la raíz para retener cationes y obstruir la actividad de la ATP-asa a nivel de la membrana que conlleva a una disminución de la carga de cationes en la vía apoplástica (Clark y Baligar, 2000). Trabajos como el de Marschner (1991) en *Fagus sylvatica* mostraron que para algunas especies, el crecimiento de las raíces fue más sensible a altas concentraciones de  $\text{H}^+$  que al  $\text{Al}^{+n}$  (suma de especies mononucleares y polinucleares de Al).

## **1.2 Factores que afectan la acidificación del suelo**

### **1.2.1 Precipitación**

El efecto de la precipitación sobre el lavado de cationes explica el hecho de que existan suelos más ácidos en zonas más lluviosas, con menos contenidos de cationes básicos ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ ) y mayores contenidos de cationes metálicos ( $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$  y  $\text{Mn}^{+2}$ ), que producen hidrólisis ácida y por consiguiente, un menor valor de pH (Kass, 1996; Bloom, 2000; Zapata, 2004). Clark y Baligar (2000) sugieren que el efecto de la precipitación es importante cuando ésta es mayor que la evaporación.

### **1.2.2 Descomposición de residuos orgánicos**

La descomposición de la materia orgánica del suelo implica una oxidación del C de los restos orgánicos que llegan a éste, por organismos que emplean la energía almacenada en los enlaces de estas sustancias (Mengel, 1996). El  $\text{CO}_2$  producido, al combinarse con agua, se transforma en bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) que liberan  $\text{H}^+$ ; este bicarbonato se puede combinar con los cationes lo que facilita aún más su arrastre a estratos más profundos (Valencia, 1998; Bloom, 2000; Matsumoto, 2002)

Al afectar el pH, la mineralización posteriormente afectará en forma directa la propia capacidad de mineralización del suelo, ya que la actividad de las enzimas es dependiente del pH, por lo tanto los suelos ácidos normalmente tienen una baja tasa de mineralización o bien es nula (Mengel, 1996).

### **1.2.3 Actividad de los microorganismos**

Según Zapata (2004), la acidificación del suelo es atribuible, en parte, a la respiración de los microorganismos y de las raíces, ya que los procesos metabólicos generan CO<sub>2</sub>, y ácidos orgánicos solubles acidificantes, los cuales se comportan como ácidos libres en el suelo. También indica que por el efecto de la hidrólisis del CO<sub>2</sub> a la presión que se alcanza en el suelo, el pH puede llegar a ser menor o cercano a 5.0.

### **1.2.4 Lluvia ácida**

La lluvia ácida puede tener un efecto directo en el crecimiento de las plantas y un efecto indirecto al alterar la química y biología del suelo, ya que aporta nutrientes como N, S, P, Ca y K (Reddy *et al.*, 1991).

Zapata (2004) señala que los agentes causantes de la acidificación de la lluvia son el dióxido de azufre, los óxidos de N y el amoníaco. Los dos primeros provienen de la quema de combustibles fósiles por centrales térmicas, motores de carros, calentadores y plantas industriales, mientras que el amoníaco, es aportado por el estiércol en sitios con grandes explotaciones de ganadería. Bloom (2000) confirma lo descrito anteriormente, sin embargo añade que la lluvia ácida no tiene un efecto claro en el pH del suelo en el corto tiempo, sino que su efecto se ve en el largo tiempo y principalmente ocurre en suelos con un bajo efecto tampón.

### **1.2.5 Remoción de cationes básicos del suelo**

Una de las principales causas de acidificación de los suelos es la pérdida de cationes básicos del suelo (Matsumoto, 2002), esta pérdida puede ocurrir ya sea por escorrentía, lixiviación o bien por remoción por parte del cultivo. Los dos últimos aspectos mencionados son claramente afectados por el cultivo a sembrar, ya que puede ser un cultivo altamente extractor de nutrientes del suelo,

y/o ser un cultivo que favorezca o disminuya la lixiviación de nutrientes del suelo (Tisdale *et al.*, 1985; Rajaram *et al.*, 1991).

### **1.2.6 Acidificación causada por fertilizantes**

Los fertilizantes en su mayoría tienen un efecto ácido en los suelos; son muy pocos los que tienen reacción básica o neutra. Reportados con efecto básico están tanto el nitrato de Na como el de Ca (Prasad y Power, 1997; Tisdale *et al.*, 1985; Bloom, 2000, Finck, 1988).

#### **1.2.6.1 Fertilizantes fosforados**

Sobre los dos fertilizantes fosforados utilizados más comúnmente en nuestra agricultura actual, el fosfato monoamónico (MAP) y el fosfato diamónico (DAP), por sus siglas en inglés, Fixen (1989), indica que tienen un efecto inicial muy diferente entre sí en el suelo: una solución saturada de MAP tiene un pH de 3,47, mientras que la de DAP tiene un pH de 7,98.

Fixen (1989) manifiesta que el efecto detrimental del amonio presente en el DAP, aplicado a la siembra junto a la semilla, parece no ser muy frecuente en suelos ácidos o neutros, mientras que en suelos calcáreos es más común dependiendo de la dosis de N aplicada. Los efectos perjudiciales han sido observados más claramente en la emergencia y el establecimiento del cultivo, pero con poco impacto en los rendimientos finales; estos efectos negativos se incrementan con aumentos en la temperatura y sequía del suelo.

#### **1.2.2.2 Fertilizantes nitrogenados**

Está ampliamente documentado (Marschner, 1995) que el pH del medio de crecimiento de las plantas se eleva con el uso de fuentes nítricas mientras que disminuye con el uso de fuentes



amoniacaes. El ejemplo clásico de la acidificación causada por fertilizantes nitrogenados corresponde al proceso de nitrificación del amonio (Rajaram *et al.*, 1991; Kass, 1996).

Por otro lado, Gerendás y Ratcliffe (2002) y Claassen (2007a) mencionan el mismo efecto en la rizosfera con el uso de las fuentes nitrogenadas y señalan diferencias que oscilan entre 1 y 2 unidades de pH; no obstante, indican que el cambio en el pH intracelular de las raíces tratadas con nitrato y amonio es muy leve.

El realizar la nutrición con fuentes nítricas o amoniacaes es de gran importancia para la nutrición y crecimiento de las plantas, primero porque el amonio y el nitrato tienen características químicas diferentes, la principal de éstas es que el primero tiene carga positiva y el segundo negativa; segundo, cada forma de N va acompañada de diferentes iones acompañantes; tercero, la absorción por la planta de cada forma tiene un efecto diferente en el suelo; cuarto, y como ya ha sido mencionado anteriormente, ambas formas tienen un efecto acidificante diferente en el suelo; y quinto, el amonio en el suelo puede desplazar y competir con algunos cationes, efecto que no ocurre con el nitrato (Hageman, 1984).

### **1.3 La rizosfera de las plantas**

Según Kennedy (1999) el término rizosfera fue utilizado por primera vez en 1904 por Hiltner para describir la zona de suelo bajo influencia de las raíces. Él y otros autores definen la rizosfera como el área de suelo inmediatamente adyacente a las raíces de las plantas con influencia de microorganismos, y apuntan que los tipos, números y/o actividad de microorganismos difieren de un suelo a otro (Kennedy, 1999; Neumann y Romheld, 2002; Claassen, 2007a). La rizosfera va a tener un espesor variable, ya que la actividad de la raíz consiste por un lado en la absorción de nutrientes y agua, y por el otro en la liberación o exudación de compuestos orgánicos e

inorgánicos; según la movilidad de los nutrientes absorbidos o de los compuestos liberados así será la zona de influencia de la raíz (Claassen, 2007a).

El suelo, como sistema multifásico que es, contiene nutrientes en varios grados de solubilidad; la mayoría están unidos a la fase sólida y son prácticamente insolubles y sólo una pequeña porción están disueltos en la fase líquida. Las raíces absorben nutrientes de la fase líquida, por lo que ocurre una disminución en la concentración de la solución del suelo, que ocasiona un gradiente que conlleva a la difusión de nutrientes de otras zonas del suelo a la superficie de las raíces. Ello causa un desequilibrio entre la solución del suelo y los iones unidos a la fase sólida, que posteriormente debe ser restituido (Jungk, 2002). También las plantas pueden alterar este equilibrio, al propiciar la modificación de la composición química de la rizosfera al exudar sustancias, y de esta manera promover la liberación de nutrientes de la fase sólida (Schachtman *et al.*, 1998). Otra estrategia es la asociación con microorganismos, particularmente hongos, que en conjunto mejoran la absorción de nutrientes al incrementar el área de absorción; en más del 90% de la tierra cultivada con plantas, existe la formación de asociaciones simbióticas con hongos micorrízicos (Kottke, 2002).

Los gradientes de nutrientes minerales, pH, potencial redox, exudados radicales y actividad microbiana que ocurren en la rizosfera pueden ser radiales y longitudinales (Kapulnik y Okon, 2002; Marschner, 1991). Los microorganismos del suelo, la planta (tipo y estado nutricional de la misma), o bien los factores físicos y químicos del suelo, pueden afectar estos gradientes. Por su cercanía con el órgano de absorción de la planta, todos estos factores ocasionan una variación de vital importancia en la disponibilidad de nutrimentos (Marschner, 1995).

El cambio del pH en la rizosfera tiene un profundo efecto en la disponibilidad de los nutrientes (Glass, 2002). Los cambios en el pH de la rizosfera depende de varios factores de suelo y planta (Neumann y Romheld, 2002), tales como capacidad buffer del suelo, humedad del suelo y aireación, producción de CO<sub>2</sub> por las raíces de las plantas y microorganismos, producción ácida

microbiana, exudación de carboxilatos por raíces, tipo de planta y estado nutricional de la misma (Phillips y Fahey, 2008).

En suelos neutros o alcalinos, la disminución del pH de la rizosfera que ocurre con la aplicación de amonio puede incrementar la movilización de los fosfatos de Ca escasamente solubles y mejorar la absorción de P, al igual que de algunos micronutrientes como B, Fe, Mn y Zn (Marschner, 1995).

Duncan (2000) indica que el sistema radical de las plantas puede ser modificado en respuesta de estímulos ambientales, con lo cual pueden ocurrir cambios en la dirección del crecimiento, alteración en la regulación de genes, así como en la activación de enzimas y proteínas, modificación en división, expansión y diferenciación celular. Marschner (1995) muestra el efecto contrario al descrito anteriormente, pues según sus conclusiones, también existe un efecto del estado nutricional de las plantas sobre los cambios en la rizosfera de las plantas, ya que se han observado cambios importantes en el pH de la rizosfera de plantas deficientes en Fe debido a liberación de protones por parte de la planta. Esta acidificación se ha encontrado también en plantas nutridas con nitrato donde se han cuantificado niveles de liberación de  $H^+$  por unidad de peso de raíz tan altos como cuando se tienen plantas nutridas con amonio y sin deficiencia de Fe. Lo descrito anteriormente por ambos autores demuestra que existe un sistema en equilibrio entre el comportamiento del suelo y de las plantas.

Los valores de pH medidos en y alrededor de las raíces con frecuencia se encuentran entre 3 y 9. El del apoplasto y las vacuolas de las raíces son medianamente ácidos, mientras que el del citoplasma de las raíces se ubica entre 7,2 y 7,6 (Gerendás y Ratcliffe, 2002).



### 1.3.1 Absorción de nutrientes por las plantas

La cantidad de nutrientes que efectivamente va a absorber una planta depende de su capacidad de adquisición. Existen grandes diferencias entre plantas, principalmente debido a diferencias morfológicas y fisiológicas del sistema radical; por ejemplo, el largo de raíces de trigo alcanza 36 km m<sup>-2</sup> mientras que para espinaca se estima en 7 km m<sup>-2</sup> (Claassen, 2007b).

Para que ocurra la absorción de nutrientes debe haber contacto entre el nutriente y las raíces, por lo tanto hay dos formas de lograrlo: una por crecimiento de las raíces hasta donde están los nutrientes (intercepción radical) y otra por movimiento de nutrientes hasta la zona de crecimiento de las raíces (flujo de masas y difusión) (Jungk, 2002). Jungk y Barber (1974) citados por Eghball y Sander (1989) indican que el contacto entre raíz y fertilizante es un factor que influencia la utilización de los fertilizantes fosforados debido a la baja movilidad del P en el suelo.

En el caso de la intercepción radical, como normalmente las raíces no llegan a explorar más allá del 1% del suelo, sólo una pequeña parte de nutrientes puede ser absorbida por este mecanismo. La única excepción es la cantidad de Ca que puede ser absorbido en un suelo rico en este nutriente (Jungk, 2002; Koopmans *et al.*, 2004).

El flujo de masas (Barber, 1962, citado por Jungk, 2002) depende de la concentración de nutrientes en solución y del flujo de agua. Si el flujo de masas es menor a la entrada de agua a la planta, se creará una zona disipada de nutrientes, que es lo normal para P y K, mientras que si es mayor ocurrirá un acumulo de nutrientes en la interfase suelo-raíz. Nutrientes móviles como Ca, Mg, nitrato y sulfato, normalmente son absorbidos por flujo de masas (Black, 1993; Neumann y Romheld, 2002).

Por su parte, la fuerza que dirige la difusión es el gradiente de concentración y se rige por la ley de Fick. Cuando ocurre una absorción mayor al flujo de masas se crea un diferencial de

concentración que permite la difusión; existen algunos factores que pueden afectarla sensiblemente como son el tipo y cantidad de arcillas y algunos otros factores propiamente de la planta como son la formación de micorrizas que pueden ampliar la zona de absorción de las raíces. P y K son los nutrimentos frecuentemente reportados por llegar a las raíces por medio de difusión (Black, 1993; Marschner, 1995; Schachtman *et al.*, 1998; Neumann y Romheld, 2002).

### **1.3.2 Crecimiento de plantas bajo condiciones de acidez**

La acidificación de la rizosfera sin duda alguna tiene el efecto más fuerte en la absorción del Al. Blamey *et al.* (1983) citados por Matsumoto (2002) mostraron que un incremento en el pH de la solución de nutrientes de 4,5 a 4,6 ocasionó una disminución de hasta 26% en la concentración de Al soluble. El mismo autor cita un trabajo de Degenhardt *et al.* (1998) donde se logró determinar que el mutante de *Arabidopsis* alr-104 incrementa el pH alrededor de la punta de la raíz (20-50  $\mu\text{m}$ ) mientras que el cultivar silvestre no, lo que sugiere que el mutante es tolerante al Al debido al incremento en el pH que logra hacer en presencia del Al.

Zapata (2004) sintetiza algunas de las estrategias que utilizan las plantas como formas para tolerar la acidez del suelo. Para cada una de ellas se incluyen observaciones efectuadas por otros autores.

1) Reducción de absorción de Al por parte de la planta. En este caso, Matsumoto (2002) y Duncan (2000) mencionan que por lo general los cultivares tolerantes tienen mecanismos que excluyen al Al de los ápices radicales que se considera el principal tejido donde ocurre la inhibición del crecimiento.

2) Desintoxicación una vez que el Al ha penetrado en la planta. Marschner (1991) indica que algunas plantas pueden acumular altas cantidades de Al en la hoja, relacionadas con procesos de inducción de quelación de Al en la rizosfera, seguidos por su translocación y deposición en capas de epidermis. También ha observado en plantas con poca habilidad para acumular Al que éstas pueden juntar el Al con proteínas en el citoplasma o bien producir una compartimentación

del Al en las vacuolas. Zapata (2004) añade que en algunas especies maderables el Al citoplasmático es acomplejado y no afecta el metabolismo celular, y una vez inactivado puede ser almacenado en el citoplasma o depositado en vasos viejos de xilema o en paredes celulares. Blamey *et al.* (1997), demostraron que el Al es absorbido por los pectatos de Ca en las paredes celulares.

3) Aumento o reducción de la capacidad de intercambio catiónica radical.

4) Cambios morfológicos en las raíces (como mayor producción de mucílago en zonas con mayores niveles de Al). Según Horts *et al.* (1982) citado por Matsumoto (2002), el 50% del Al en ápices de raíces de caupí está ligado a mucílago. Matsumoto (2002), amplía el tema de la quelatización de Al al indicar que las plantas pueden secretar malato, citrato y ácido oxálico de las raíces para reducir la toxicidad de Al formando quelatos de Al. El malato y el oxalato son excretados inmediatamente al presentarse el estrés por Al, mientras que el citrato lo es luego de cierto periodo, lo que sugiere que los primeros dos están almacenados y son secretados por la raíz, mientras que el citrato es sintetizado por un sistema regulado genéticamente (Blamey *et al.*, 1997).

5) Tolerancia a bajas concentraciones internas de Ca, P y Fe, en presencia de Al.

### **1.3.3 Crecimiento de plantas ante condiciones de P limitante**

Bajo condiciones de deficiencia de P las plantas muestran cambios morfológicos radicales entre los que están el maximizar el volumen de suelo explorado y por lo tanto incrementar la disponibilidad de P al ampliar el área radical efectiva. También se favorece la formación y elongación de raíces laterales, así como un aumento en el número y largo de los pelos radicales. Igualmente pueden mostrarse cambios bioquímicos para mejorar la absorción de P. Entre estos están, favorecer la capacidad de transportar P por las células radicales y acrecentar la excreción de ácidos orgánicos con lo que logran variar el pH de la rizosfera y mejorar la disponibilidad de P. Estos ácidos son producidos por el ciclo del ácido tricarbóxico y se ha observado que la actividad de las enzimas de este ciclo se elevan en plantas deficientes en P. Otro mecanismo



propuesto es la excreción de enzimas hacia la rizosfera para lograr mineralizar el P poco disponible de compuestos orgánicos (Neumann y Romheld, 2002; Hammond *et al.*, 2004).

Ante condiciones de P limitantes, las plantas internamente pueden retranslocar el P de las hojas viejas o bien utilizar el P almacenado en las vacuolas, mientras que ante condiciones de alto suplemento de P las plantas pueden convertirlo en formas orgánicas almacenables, disminuir la absorción de P de la solución o perder P por reflujo (que puede alcanzar entre 8-70% del absorbido) (Schachtman *et al.*, 1998).

Shuman (2000), menciona que las plantas pueden hacer cambios en la rizosfera mediante diversos factores para lograr absorber el P; entre estos procesos destaca la secreción de fosfatasa ácida por parte de canola, así como de deshidrogenasa por parte del trigo o secreción de protones por arroz. Schachtman *et al.* (1998), señalan que raíces especializadas exudan grandes cantidades de ácidos orgánicos (más del 23% de la fotosíntesis neta), con los cuales acidifican el suelo y quelatan iones metálicos alrededor de las raíces, obteniendo movilización de P y algunos micronutrientes.

Uno de los principales mecanismos por los cuales las plantas mejoran la absorción de P, en suelos con bajos contenidos de este nutriente, es mediante la formación de micorrizas con hongos de la rizosfera. La formación de una red de hifas producidas por el hongo incrementa el volumen de suelo explorado por las raíces. Los hongos micorrízicos tienen la habilidad de lograr tomar P de fuentes orgánicas que normalmente no son disponibles directamente para las plantas (Schachtman *et al.*, 1998; Kottke, 2002).

## **1.4 Aspectos relevantes de la nutrición con P y de los fertilizantes fosforados**

### **1.4.1 Aspectos generales**

El P es absorbido por las plantas como  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  o  $\text{H}_3\text{PO}_4$  y la forma presente en la solución del suelo es dependiente del pH. A un pH por debajo de 6,0, la mayoría está presente como  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y la máxima absorción y disponibilidad de P ocurre en suelos con pH entre 5 y 7, lo que indica que el P es tomado principalmente en esta forma monovalente. También la planta puede absorber P de compuestos orgánicos solubles pero esto ocurre en menor proporción (Tisdale *et al.*, 1985; Marschner, 1995; Schachtman *et al.*, 1998; Hammond *et al.*, 2004; Engelstad y Terman, 1980, Young *et al.*, 1985).

La disponibilidad de P para las plantas depende de la concentración de P en la solución del suelo, esto es conocido como el factor de intensidad, sin embargo este factor por si sólo no describe claramente la disponibilidad de P para las plantas. La cantidad de P en solución en un momento dado puede ser muy baja debido a una alta extracción por la planta, por lo que es de gran importancia el factor cantidad, el cual es la habilidad del suelo para reponer rápidamente el P en la solución del suelo (Kissel *et al.*, 1985).

Según Schachtman *et al.* (1998), muy pocos suelos, sin recibir fertilizantes, tienen la capacidad de liberar P tan rápidamente como el requerido por las plantas para maximizar su crecimiento. En suelos fertilizados la recuperación del P es menor del 20% ya que el aplicado se torna poco disponible por adsorción, precipitación y/o conversión a formas orgánicas. Kleinman *et al.* (2002) agregan que suelos con baja saturación de P adsorbido tienen mayor afinidad para adsorber P que suelos con alta saturación de P adsorbido. Engelstad y Terman (1980) refuerzan lo anterior

al indicar que la respuesta a los fertilizantes fosforados disminuye debido a acumulación por su aplicación.

Hay plantas que han especializado transportadores en la interfase suelo-raíz para extraer el P de soluciones con muy bajas concentraciones; también han desarrollado otros mecanismos para transportar P a través de las membranas entre compartimentos intracelulares, así como sistemas de salida del P que tiene un papel importante en la redistribución (Schachtman *et al.*, 1998).

La función esencial del P en las plantas es su rol en almacenamiento y transferencia de energía (Tisdale *et al.*, 1985; Jagendorf, 1973). El adenosin trifosfato (ATP) es la fuente de energía que activa prácticamente todos los procesos biológicos en las plantas que requieren energía. También forma parte estructural de muchos compuestos de gran importancia para la planta como ácidos nucleicos, coenzimas, nucleótidos, fosfoproteínas, fosfolípidos y fosfatos de azúcar (Marschner, 1995; Alcántar y Trello-Téllez, 2007).

Shuman (2000) indica que la deficiencia de P tiene efectos claros en disminución de fotosíntesis, conductancia estomatal, fijación de CO<sub>2</sub>, disminución de la enzima Rubisco en maíz, trigo, soya y papa, y menor nodulación en soya y alfalfa.

#### **1.4.2 Formas de P en el suelo**

El pH del suelo es el principal factor que controla las formas de P en el suelo, pues rige la formación de fosfatos de Fe, Al, Mn y Ca, sin embargo la concentración de estos cationes también determina la cantidad de estas formas (Sharpley, 2000).

El P orgánico representa entre el 20 y el 80% del total presente en el suelo y se encuentra prácticamente ausente de la solución del suelo. La mayoría de formas de P orgánicas naturales



del suelo son ésteres de ácido ortofosfórico; han sido caracterizados varios mono y di-ésteres, siendo usualmente el ácido fítico (inositol hexafosfato) el principal (Schachtman *et al.*, 1998).

Las fosfatasas son las enzimas que actúan en la mineralización de fosfatos orgánicos en el suelo. Existen muchos microorganismos del suelo que, por medio de sus fosfatasas, tienen la capacidad de desfosforilar (mineralizar) fosfatos orgánicos. La mineralización del P orgánico está influenciada por la temperatura, pH, aireación, naturaleza del material orgánico y la relación C/P. Cuando esta es menor a 200 ocurre mineralización, mientras que si es mayor a 300 el P orgánico es inmovilizado (Alcántar y Trello-Téllez, 2007).

#### **1.4.3 Características de los fertilizantes fosforados**

La fuente original para la industria de fertilizantes fosforados fueron huesos, pero rápidamente fue agotada, por lo que actualmente la única fuente de importancia es la roca fosfórica, de la cual los principales yacimientos están en USA, antigua URSS y en África del Norte (Marruecos, Argelia y Túnez). El compuesto fosfatado presente en estos depósitos es la apatita, la cual puede ser carbonato-, fluoro-, cloro- o hidroxí- apatita (Tisdale *et al.*, 1985; Finck, 1988).

La roca fosfórica tiene una baja concentración de P, una baja solubilidad (incluso en suelos ácidos donde su disponibilidad se incrementa), altos costos de transporte y poca respuesta en la mayoría de cultivos, por lo que es poco utilizada directamente en la agricultura (Rehm *et al.*, 2002).

Para producir ácido fosfórico cuyo P es totalmente disponible para las plantas, se utiliza ya sea un proceso húmedo o seco. El proceso seco, mediante un horno eléctrico, produce un compuesto muy puro pero de alto costo; el proceso húmedo consiste en el tratamiento de la roca con un ácido (Rehm *et al.*, 2002).

Sin duda alguna los fosfatos de amonio son los principales fertilizantes fosforados utilizados. Una de sus grandes ventajas es que son muy solubles en agua (90 a 100%), sin embargo, en el largo plazo es reconocido que tienen una reacción ácida en los suelos debido a la presencia del amonio. Estos fosfatos de amonio son producidos al hacer reaccionar amoníaco con ácido fosfórico, y las principales fuentes disponibles son el fosfato monoamónico y el fosfato diamónico (Tisdale *et al.*, 1985).

El fosfato monoamónico (MAP) tiene un análisis que varía entre 11-48-0 y 12-60-0. Tanto el P como el N presentes son hidrosolubles, tiene un índice salino de 0,485, su humedad relativa crítica es de 91,6% y su índice de acidez es 59% (Moody *et al.*, 1995; Alcántar y Trello-Télez, 2007; Guerrero, 1981; Beegle, 2007).

El fosfato diamónico (DAP) tiene una reacción inicial alcalina, por lo que se debe de tener cuidado con la liberación de amoníaco que puede dañar las semillas o bien los primeros estadios de las plantas, luego de la emergencia (Chien *et al.*, 2008). El índice salino del DAP es 0,637, su humedad relativa crítica es 82,8% y su índice de acidez es 70% (Moody *et al.*, 1995; Guerrero, 1981; Beegle, 2007).

Según datos de IFA (2009) para el año 2007 se calculó un consumo de 9 835 000 de toneladas métricas de MAP, y de 12 530 000 de toneladas métricas de DAP, lo cual representa un 27.4% más que el MAP.

Existe una diferencia en el pH inicial entre MAP y DAP que induce importantes diferencias de comportamiento que se detallan a continuación:

- 1) mayor formación de gas amoníaco por parte del DAP,
- 2) formación inicial de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  con MAP mientras que con DAP se forma  $\text{HPO}_4^{2-}$ , siendo el primero más rápidamente absorbido por las plantas, y

3) el MAP puede contener mayor cantidad de impurezas, por utilizarse rocas fosfóricas de menor calidad para su fabricación. Estas impurezas producirán otros productos fosforados de diferente solubilidad (Fixen, 1989; Moody *et al.*, 1995). Según Prochnow *et al.* (2008) estas impurezas tienen que ser tomadas muy en cuenta, ya que muchas son menos solubles en agua y por lo tanto cambian las propiedades inicialmente conocidas del fertilizante. Mullins y Sikora (1995) realizaron un trabajo donde lograron demostrar que el pH inicial del medio repercute sobre los requisitos de solubilidad de la fuente para obtener máximos rendimientos. En trigo a un pH de 5,4 se necesitó solamente que el fertilizantes tuviera un 37% del PSA, mientras que a pH 6,4, para el máximo rendimiento, el fertilizante debió tener un 63% PSA.

El trabajo de Prochnow *et al.* (2008) demostró que el requerimiento de PSA es dependiente del pH y de la fuente, sin embargo el efecto del pH fue diferente al demostrado anteriormente en el trabajo de Mullins y Sikora (1995), ya que observaron que a mayor pH necesitaron menor % de PSA para obtener las mayores respuestas en rendimiento, lo cual de acuerdo a un trabajo que citan de Mendez y Kamprath (1978) es atribuido a la mayor fijación de P bajo condiciones más ácidas.

Prochnow *et al.* (2008) lograron determinar que todas las fuentes alcanzaron al menos un 90% de rendimiento relativo con sólo tener más del 50% PSA, lo cual indica que muchas regulaciones internacionales son muy rígidas, pues indican que en Brasil la legislación regula un contenido mínimo de PSA del 90% en fertilizantes fosforados acidulados.

#### **1.4.4 Reacciones de los fertilizantes fosforados en el suelo**

El P proveniente ya sea de fertilizantes (Sample *et al.*, 1980) o bien de fuentes endógenas del suelo, inmediatamente después de ser disuelto en el agua del suelo, inicia una serie de reacciones con las partículas y compuestos de fertilizantes no fosforados presentes en el medio, que convierte a los fosfatos en formas menos solubles. Las principales reacciones involucradas



en este proceso son la adsorción, la fijación, la precipitación y la inmovilización (Tisdale *et al.*, 1985).

Entre los factores que definen la intensidad de estas reacciones se pueden citar los siguientes: 1) la naturaleza y cantidad de componentes del suelo (óxidos, arcillas, y/o carbonatos de Ca); 2) el pH (entre 6,0 y 6,5 hay mayor disponibilidad de P); 3) la cantidad y tipo de cationes presentes, ya que estos definirán el tipo de compuestos a formarse (a mayor carga por parte del catión hay una mayor absorción del P con el mismo); 4) el efecto de otros aniones presentes (tanto aniones orgánicos como inorgánicos pueden competir por sitios de absorción con el P); 5) los contenidos de materia orgánica (resultados experimentales indican que los abonos orgánicos aumentan la disponibilidad del P); 6) el grado de saturación con P; 7) la inundación, ya que al inundar un terreno puede ocurrir un aumento en la disponibilidad de P al reducir los fosfatos férricos ( $\text{Fe}^{+3}$ ) insolubles a ferrosos ( $\text{Fe}^{+2}$ ) solubles y por la hidrólisis de los fosfatos de Fe y Al (Alcántar y Trello-Téllez, 2007).

La adsorción es el primer paso en el proceso de retención. En suelos calcáreos, el P se adsorbe a la calcita, formando un compuesto amorfo en su superficie. La segunda reacción es la cristalización y transformación de este compuesto en fosfatos de Ca (Kissel *et al.*, 1985).

Esta retención de P también puede ocurrir por óxidos de Fe y Al, alumino-silicatos, carbonatos y materia orgánica (Sample *et al.*, 1980).

La efectividad de los fertilizantes es afectada por su solubilidad y el tamaño del gránulo (Barrow, 1980). Engelstad y Terman (1980) y Guerrero (1981) afirman lo anterior e indican que para gránulos mayores a 6 mm de diámetro la difusión en el suelo puede estar entre 4,2 y 20,6  $\text{cm}^3$ , al tener un PSA (P soluble en agua) entre 14 y 70%, respectivamente.

Como resultado de su baja movilidad, el aprovechamiento de los fertilizantes fosforados está en el rango de 10% a 20% al año de su aplicación, pero como en general las pérdidas son muy bajas, el uso al largo plazo es cercano al 100% (Claassen, 2007a). El mismo autor menciona que la aplicación del fertilizante fosforado es mejor cuando se hace de forma localizada, y añade que el mejor efecto no es por la cercanía del fertilizante a las raíces sino por el efecto que se tiene sobre el suelo, ya que la curva tampón de P no es lineal sino curvada, es decir la concentración de la solución del suelo aumenta más que proporcional a la adición de P por unidad de suelo y esto puede incrementar el crecimiento radical.

## **1.5 Aspectos relevantes de la nutrición con N y de los fertilizantes nitrogenados**

### **1.5.1 Aspectos generales**

El N es nutriente más importante para las plantas, se ha identificado como el que limita los rendimientos en los cultivos tropicales y a su alta respuesta en la mayoría de los cultivos (Bertsch, 1995). El N es una parte integral de la molécula de clorofila, cuya estructura básica es el sistema de anillos porfirina, compuesto de cuatro anillos de pirrol, cada uno de los cuales está formado por un átomo de N y cuatro de carbono, y contienen en el centro un átomo de magnesio (Tisdale *et al.*, 1985). Normalmente se encuentra en las plantas con una concentración que oscila entre 0,5 y 5%, y puede ser absorbido por las plantas ya sea como nitrato, amonio y/o urea (Shuman, 2000; Criddle *et al.*, 1988). Una adecuada nutrición con N brinda vigor a las plantas y normalmente una coloración verde más intensa. Por otro lado excesos de este nutriente pueden prolongar el ciclo vegetativo de las plantas al mismo tiempo que la etapa de madurez (Tisdale *et al.*, 1985).

Según Good *et al.* (2004), citados por Masclaux-Daubresse *et al.* (2008), en el año 1930 se producían 1,3 millones de toneladas métricas de fertilizantes nitrogenados; para 1960 ese valor

se había incrementado a 10,2 millones, para el 2004 había crecido hasta cerca de 85-90 millones y para el 2005 tuvo otro aumento hasta llegar a los 240 millones de toneladas métricas.

La principal vía por la cual las plantas toman el N es por flujo de masas (Mengel y Rehm, 2000), aunque existe un pequeño aporte por parte de la intercepción radical, que es cercano al 1% (Jungk, 2002).

La principal fuente de N utilizada por las plantas proviene del gas  $N_2$ , el cual constituye cerca del 78% de la atmósfera (Lea, 1997). Si bien las plantas no lo pueden absorber, existen varias formas para que las plantas lo puedan fijar: 1) por microorganismos que viven en relación simbiótica en las raíces de las plantas; 2) por microorganismos libres del suelo y algunos en las hojas; 3) como un óxido de N en las descargas atmosféricas; y 4) como amonio, nitrato o urea en procesos industriales de manufactura de fertilizantes sintéticos (Tisdale *et al.*, 1985).

El amonio tiene que ser incorporado en compuestos orgánicos en las raíces, mientras que el nitrato, que es móvil en el xilema puede ser almacenado en las vacuolas de raíces, tallos u órganos de almacenaje. Una vez ingresado en la planta el nitrato debe ser reducido a amonio, para poder ser convertido en aminoácidos. Este proceso necesita de energía por parte de las plantas, usualmente proveniente de la fotosíntesis, la mayor parte de la reducción se da en los tallos (Kirkby y Armstrong, 1980; Lea, 1997; Marschner, 1995; Van Beusichen *et al.*, 1988).

La proporción de nitrato que se reduce en las raíces o en las hojas es variable y depende de la concentración externa de nitrato, la edad de la hoja y el tipo de planta. Conforme se incrementa la concentración externa de nitrato las plantas dejan de reducirlo en mayor proporción en las raíces y toma mayor importancia la reducción en las hojas; por otro lado la edad de la hoja también tiene un efecto importante, ya que la hoja al alcanzar la madurez es cuando alcanza la mayor actividad de nitrato reductasa y por lo tanto su mayor capacidad de reducir nitrato (Lea, 1997; Marschner, 1995). Contrario al nitrato, el amonio y su compuesto en equilibrio (amoníaco)

son tóxicos a bajas concentraciones, por lo que no son almacenados en la planta (Marschner, 1995).

Una de las principales funciones del N es su participación en la síntesis de proteínas, muchas de las cuales resultan más funcionales que estructurales, como lo son las enzimas, las cuales controlan gran diversidad de metabolismos en la planta, incluyendo la reducción del nitrato y la síntesis de nuevas proteínas (Blackmer, 2000).

### **1.5.2 Formas de N en el suelo**

La preferencia de las plantas por alguna de las formas está definida por el tipo de planta, edad, factores ambientales entre otros (Marschner, 1995). La absorción de nitrato normalmente es mayor y ocurre de una forma activa, es favorecida por condiciones de pH bajo, pero es disminuida por la presencia de amonio. Plantas nutridas con altas concentraciones de nitrato muestran mayor síntesis de ácidos orgánicos lo cual está emparejado con un incremento en la acumulación de cationes inorgánicos (Ca, Mg y K), por el contrario la nutrición con amonio disminuye la absorción de estos, pero incrementa la absorción de aniones orgánicos como P, azufre, boro y cloro (Gerendás y Ratcliffe, 2002).

La nutrición con amonio muestra algunas ventajas, una de ellas es que su absorción ocasiona un ahorro energético para las plantas cuando es utilizado para síntesis de proteínas, pues no es necesaria su reducción. Además con el uso de amonio se disminuyen las pérdidas por lavado y desnitrificación (Tisdale *et al.*, 1985).

La naturaleza catiónica del amonio permite su adsorción y retención por los coloides del suelo, la absorción por los microorganismos heterótrofos produce una fase orgánica activa, la cual normalmente representa 5-15% del N del suelo y es la principal fuente de mineralización durante el crecimiento de los cultivos (Tisdale *et al.*, 1985; Neumann y Romheld, 2002).



### 1.5.3 Características de los fertilizantes nitrogenados

La concentración promedio de los fertilizantes nitrogenados orgánicos es entre 1 y 13% (Tisdale *et al.*, 1985), por lo que el suministro de N por mineralización es muy bajo. Por esta razón, los fertilizantes químicos o sintéticos son por mucho las principales fuentes de N utilizadas en agricultura actualmente (Black, 1993). Los fertilizantes químicos nitrogenados se pueden catalogar en amoniacales, nítricos, de liberación lenta y otros (Tisdale *et al.*, 1985).

Por la alta movilidad del N mineral en el suelo, los fertilizantes nitrogenados minerales podrían ser usados hasta cerca del 100% en el año de su aplicación. Sin embargo el aprovechamiento del fertilizante es menor porque se inmoviliza, lixivia o desnitrifica (Claassen, 2007b).

La Urea (46%) y el Nitrato de Amonio (33,5%) son dos de las fuentes amoniacales más utilizadas (Tisdale *et al.*, 1985; Alcántar y Trello-Téllez, 2007). Esta última, tiene un 50% del N-nítrico considerado de rápida disponibilidad para las plantas, mientras que el otro 50% de N-amoniaco es de disponibilidad más lenta, por lo tanto puede considerarse que tiene un comportamiento intermedio entre los fertilizantes amoniacales y los nítricos (Teuscher y Adler, 1984; Tisdale *et al.*, 1985) El Nitrato de Ca (15,5 N y 26,5 CaO) constituye un buen representante del grupo de fertilizantes nítricos (Tisdale *et al.*, 1985).

La principal característica limitante de los fertilizantes amoniacales es la producción de acidificación ya que la asimilación de amonio en las raíces produce cerca de un protón por cada molécula de amonio absorbido. Esta situación conduce a una caída en el pH del citoplasma, que tiene que ser estabilizado con la salida del protón al medio o bien por la descarboxilación de ácidos orgánicos; ambos procesos generan una caída en el pH del medio (Marschner, 1995).

En el 2006 la Urea representó el 51% del consumo mundial de N (Cabrera, 2008). Según datos de IFA (2009) para el año 2007 el consumo de Urea se calculó en 66 301 000 de toneladas métricas, el de Nitrato de Amonio, en 14 596 000 y el de Nitrato de Ca en 3 699 000 de toneladas métricas.

Varios factores afectan la efectividad de la urea, entre ellos están: 1) el pH inicial del suelo, ya que a mayor pH hay mayor probabilidad de que ocurran pérdidas por formación de amoniaco; 2) la capacidad de intercambio catiónico (CIC) pues a mayor CIC ocurren menores pérdidas de N gaseoso; 3) la capacidad tampón del suelo, pues si ésta es mayor, tendrá menores variaciones en el pH y por lo tanto menores pérdidas de amoniaco; 4) temperatura del suelo, ya que la hidrólisis de la urea es menor a bajas; y 5) la humedad del suelo, pues como se mencionó anteriormente la producción de amoniaco en presencia de humedad adecuada formará amonio y  $\text{CO}_2$  (Tisdale *et al.*, 1985).

Por otro lado el nitrato de amonio tiene varias desventajas como las siguientes: 1) alto grado de higroscopicidad, que causa problemas en almacenamiento y transporte; 2) fácilmente se apelmaza y forma gránulos duros y tenaces, o bien almacenado puede convertirse en una masa dura; 3) alto riesgo de incendio y explosión. En su proceso de fabricación es factible un efecto explosivo sin lograr encontrar explicaciones claras; 4) menor eficiencia técnica en suelos inundados; y 5) más posibilidad de pérdida por lixiviación y desnitrificación (Teuscher y Adler, 1984; Tisdale *et al.*, 1985).

El uso de fuentes nítricas ocasiona un incremento en el pH del medio, debido a que para la reducción del  $\text{NO}_3^-$  en los tallos, la planta recircula en el xilema  $\text{K}^+$  junto con el  $\text{NO}_3^-$ , donde, por cada ión de  $\text{NO}_3^-$  reducido se forma uno de malato. Parte del  $\text{K}^+$  es transferido vía floema junto con el malato nuevamente a las raíces y ahí el malato es descarboxilado y oxidado, produciendo  $\text{HCO}_3^-$  el cual es estequiométricamente intercambiado por más  $\text{NO}_3^-$ ; el  $\text{K}^+$  remanente en las



raíces es nuevamente transportado junto al  $\text{NO}_3^-$  y el ciclo se repite (Kirkby y Armstrong, 1980; Van Beusichem *et al.*, 1988).

Las fuentes nítricas tienen mayor solubilidad y movimiento en el suelo. Los nitratos de K, Ca y Na, no son acidificantes como lo es el nitrato de amonio y los otros fertilizantes amoniacales, esto debido a que la absorción del N es normalmente más rápida que la del catión acompañante, lo que ocasiona un incremento en las bases del suelo, dando una condición alcalina (Marschner, 1995).

El nitrato de Ca se puede producir de dos formas, tratando carbonato de Ca con ácido nítrico, lo que produce un nitrato de Ca que luego es clarificado y concentrado en un evaporador al vacío seguido por el prilado. La otra forma de obtenerlo es como un subproducto de los procesos de nitrofosfatos, donde es filtrado o centrifugado y separado por cristalización (Tisdale *et al.*, 1985).

Esta fuente fertilizante tiene como gran problema de manejo su elevada higroscopicidad, lo que normalmente no le permite ser mezclado con la mayoría de fertilizantes, o se debe ser muy cuidadoso en el manejo de las mezclas que contienen esta materia prima. Una de las grandes ventajas es su efecto alcalino en los suelos, principalmente en suelos ácidos. En suelos con problemas de Na, su uso causa una sustitución del Na por Ca en las partículas de arcilla disminuyendo el problema (Teuscher y Adler, 1984; Kass, 1996).

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### ***2.1 Ubicación del trabajo y selección del suelo***

El trabajo se realizó en los laboratorios e invernaderos del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica.

Para la realización del trabajo se utilizó un suelo que fue traído de la finca Azucarera El Viejo, Carrillo, Guanacaste. Se tomó de los primeros 20 cm de un suelo del Orden Molisol, por ser usado para siembras de cultivos comerciales de importancia en la zona como arroz, caña y melón, y se utilizó arroz como planta indicadora. Se escogió un suelo que brindara facilidad de manejo en invernadero, pues el otro orden de suelos de importancia en Guanacaste es el Vertisol, cuyo manejo en invernadero es muy complicado. Como se quería determinar el impacto acidificante de las fuentes se decidió trabajar con un suelo de pH inicial alto.

### ***2.2 Análisis químico y textural del suelo***

Al momento de la recolección del suelo se efectuó una muestra para análisis químico y textural del suelo con tres repeticiones para utilizarlo como representativo de las características edaf químicas naturales del suelo antes de las aplicaciones de fertilizantes. Los datos de las tres repeticiones, así como el promedio, el valor de la desviación estándar y el porcentaje del coeficiente de variación se muestran en el Cuadro 1, para el análisis químico y en el Cuadro 2, para el análisis textural. El primero de los muestreos fue tomado con el suelo saturado, razón por la cual el Mn seguido del Fe mostró cambios importantes. Esto que ocasionó que estos elementos tuvieran mayor coeficiente de variación.

Cuadro 1. Resultado del análisis químico de suelos, del suelo extraído de Carrillo, Guanacaste, junio 2008.

ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS																
	pH	cmol(+)/L				%					mg/L				%	
Muestra	H <sub>2</sub> O	K	Ca	Mg	Acidez	CICE	SK	SCa	SMg	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn	MO
1	6,3	0,68	7,92	2,86	0,44	11,90	5,7	66,6	24,0	3,7	20	9,2	15	121	92	1,8
2	6,0	0,83	8,15	2,92	0,43	12,33	6,7	66,1	23,7	3,5	20	9,7	14	97	36	2,2
3	5,9	0,81	7,72	2,81	0,26	11,60	7,0	66,6	24,2	2,2	20	9,4	14	106	36	1,9
Promedio	<b>6,1</b>	<b>0,77</b>	<b>7,93</b>	<b>2,86</b>	<b>0,38</b>	<b>11,94</b>	<b>6,5</b>	<b>66,4</b>	<b>24,0</b>	<b>3,1</b>	<b>20</b>	<b>9,4</b>	<b>14</b>	<b>108</b>	<b>55</b>	<b>2,0</b>
DE	0,2	0,08	0,2	0,06	0,10	0,4	0,7	0,3	0,3	0,8	0,0	0,3	0,6	12	32	0,2
% CV	3,4	10,5	2,7	1,9	26,9	3,1	10,4	0,4	1,1	25,0	0,0	2,7	4,0	11,2	59,1	10,6

CICE= capacidad de intercambio catiónico efectiva; SK= saturación de K; SCa= saturación de Ca; SMg= saturación Mg; SA= saturación de acidez  
MO= materia orgánica; DE= desviación estándar; CV= Coeficiente de variación

Las características químicas del análisis muestran que este suelo es representativo de los suelos presentes en la zona y que son los utilizados para la producción de caña de azúcar y arroz, ya que presenta un alto pH, alta CICE, y valores adecuados de Ca, Mg y K, con una acidez baja que corresponde con una SA bajo. El P presenta valores óptimos y en los micronutrientes no se encuentran deficiencias visibles.

Cuadro 2. Resultado del análisis textural de suelos, del suelo extraído de Carrillo, Guanacaste, junio 2008.

ANÁLISIS DE TEXTURA EN SUELOS				
Muestra	%			NOMBRE TEXTURAL
	ARENA	LIMO	ARCILLA	
1	39	43	18	FRANCO
2	44	38	18	FRANCO
3	42	40	18	FRANCO
Promedio	<b>41</b>	<b>40</b>	<b>18</b>	<b>FRANCO</b>
DE	3	3	0	
% CV	6	6	0	

DE= desviación estándar; CV= coeficiente de variación

El Cuadro 2, muestra que el suelo escogido presenta características adecuadas para un manejo en invernadero, al tener menos de 20% de arcilla que, como se mencionó anteriormente, fue uno de los parámetros para la escogencia del mismo.



## **2.3 Primer experimento**

### **2.3.1 Descripción de tratamientos y diseño experimental**

Los tratamientos al inicio del trabajo fueron la aplicación de los dos fertilizantes fosforados, DAP y MAP, el día de la siembra. Se compararon por medio de un diseño de bloques completos al azar, con dos tratamientos repetidos tres veces cada uno.

Posteriormente, al agregar los fertilizantes nitrogenados, urea (Ur), nitrato de Ca (NCa) y nitrato de amonio (NA), la prueba cambió a un diseño experimental factorial donde se determinaron los efectos combinados de la aplicación de los fertilizantes fosforados con la de cada una de las fuentes nitrogenadas (2 fuentes de P x 3 fuentes de N), quedando 6 tratamientos repetidos cada uno tres veces.

### **2.3.2. Preparación del suelo, siembra y aplicación de tratamientos**

El suelo, antes de ser agregado a los potes, se tamizó por una malla de 2 cm de grosor, para eliminar todos los "terrones" y evitar problemas de movimiento de agua, y lograr un suelo uniforme y que no tuviera interferencia con el crecimiento de la planta indicadora.

Posterior al tamizado, el suelo se colocó en cajas plásticas, a cada una de las cuales se le hizo ocho huecos en la base para permitir el drenaje del agua en exceso en el suelo. Las cajas presentaban un largo de 42 cm, un ancho de 38 cm y la profundidad fue de 20 cm. Cada repetición estuvo conformada por una caja en la que se sembraron tres hileras de plantas de arroz colocadas con una distancia de 11 cm entre líneas y cuatro cm entre puntos de siembra. La variedad utilizada fue Palmar-18, ya que es la variedad de mayor área de siembra en el país.

Según la Corporación Arrocera Nacional en el período 2008-2009 el porcentaje de área sembrada de arroz con la variedad Palmar 18 fue de un 53.15% (CONARROZ, 2009).

En la Figura 1, a la izquierda se muestra un esquema de la forma en que quedaron las hileras en la caja, y las plantas en cada hilera y a la derecha se muestra una foto de cómo se apreciaban en las cajas de siembra.

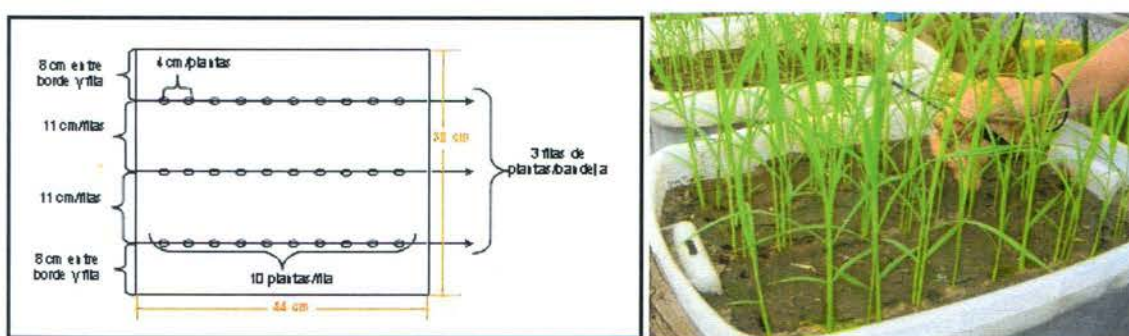


Figura 1. Distribución de hileras y plantas en cada caja. Izquierda: esquema; Derecha: foto.

El control de malas hierbas e insectos se realizó de forma manual al menos dos veces por semana, sin embargo la incidencia de estos factores no fue relevante.

Una semana antes de la siembra se inundaron los potes para tener el suelo totalmente mojado y que no hubiera diferencias en humedad al inicio del experimento. Cuatro días antes de la siembra se comenzó con un riego diario para uniformizar las cajas que fue bastante tenue pues los potes estaban adecuadamente humedecidos. Todas las aplicaciones de agua fueron por medio de aspersión. El día de la siembra se aplicaron los fertilizantes fosforados evaluados: fosfato diamónico (DAP, 18-46-0) y fosfato monoamónico (MAP, 11-52-0). La dosis de P aplicada a la siembra fue  $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ .

Para lograr alcanzar estas cantidades se agregaron  $230 \text{ kg de MAP ha}^{-1}$  y  $260 \text{ kg de DAP ha}^{-1}$ , se dividió el área de la hectárea entre la distancia entre hileras para calcular los metros lineales

$\text{ha}^{-1}$ , luego se multiplicó por 100 para tener  $\text{cm lineales ha}^{-1}$ , el valor fue de 9 090 909,09. Los kg de cada fuente se llevaron a  $\text{g ha}^{-1}$  y luego se dividieron para obtener  $\text{g/cm lineal}$ , finalmente se multiplicaron por 42 que era el largo de las hileras de los bordes de las cajas plásticas y por 38 que era el largo de la línea central, pues por las agarraderas, las cajas tenían menor distancia en el centro. Así, se pesó para el DAP 1,2052 g para las líneas laterales y 1,0904 g para la central, mientras que para el MAP 1,0662 g y 0,9646 g, respectivamente.

Para la aplicación de los fertilizantes se hizo primero una línea de siembra con una profundidad de 2 cm a lo largo del centro de la caja y posteriormente a 11 cm a cada lado de esta línea central se hicieron otras dos líneas.

El fertilizante se trituroó utilizando un mortero y un pistilo, para lograr un tamaño de partícula uniforme que pudiera distribuirse en forma adecuada en la línea de siembra, además que facilitara su pesaje que se efectuó con una balanza analítica. Luego se agregó el contenido de cada pesaje en cada línea, buscando la mayor uniformidad posible. Sobre el fertilizante se agregó cerca de 1 cm de suelo para incorporarlo y que no quedara en contacto con las semillas, Figura 2.



Figura 2. Molienda, distribución e incorporación del fertilizante de siembra.



Se utilizaron tres semillas por punto de siembra para asegurarse una germinación que diera la posibilidad de evaluar el efecto de los fertilizantes en germinación así como para obtener al menos una planta por cada punto, a los quince días de siembra se ralearon las plantas. Luego de colocadas las semillas se procedió a terminar de rellenar las líneas de siembra con el suelo del experimento hasta que quedó un leve "lomillo". Apenas se terminó de sembrar se volvió a regar para asegurar una humedad adecuada para germinación y la incorporación y acción del fertilizante. Se continuó regando todos los días hasta el final del experimento.



**Figura 3. Siembra del arroz, acomodo de semillas en la hilera y siembra completamente realizada.**

A los diez días después de la siembra se observó la emergencia de las plantas, y a los 20 días posteriores a la emergencia, se aplicaron los fertilizantes nitrogenados.

Se evaluaron tres fuentes nitrogenadas: Urea (Ur, 46-0-0), Nitrato de amonio (NA, 33,5-0-0) y Nitrato de Ca (NCa, 15,5-0-0-26,5CaO). La dosis de N aplicada fue de  $93 \text{ kg ha}^{-1}$ , para lo cual se aplicó  $202 \text{ kg Ur ha}^{-1}$ ,  $277 \text{ kg NA ha}^{-1}$  y  $600 \text{ kg NCa ha}^{-1}$ . Para el cálculo del fertilizante se siguió el mismo procedimiento descrito para las fuentes fosforadas obteniendo un peso de  $0,9340 \text{ g}$  para las líneas de los bordes y  $0,8451 \text{ g}$  para la línea central con urea, con el nitrato de amonio fue  $1,2826 \text{ g}$  y  $1,1604 \text{ g}$ , respectivamente, por último para el nitrato de Ca los valores fueron  $2,7720 \text{ g}$  y  $2,5080 \text{ g}$ .

El fertilizante se aplicó sobre la línea de semillas de arroz. Al igual que para el caso de los fertilizantes fosforados, también se tuvo que macerar los fertilizantes para lograr una uniformidad en la aplicación. Posterior a la aplicación del fertilizante se efectuó un riego para propiciar la incorporación y evitar las pérdidas de fertilizantes por volatilización y de esta manera buscar el mayor aprovechamiento y acción del fertilizante.



**Figura 4. Molienda y aplicación de fertilizantes nitrogenados.**

### **2.3.3 Evaluaciones**

De las tres plantas que se sembraron en cada punto de siembra en cada una de las cajas, se hizo al momento de raleo (15 dds), un conteo de plantas germinadas del total de semillas sembradas para determinar el porcentaje de germinación para cada fuente de P aplicada. A pesar de que se utilizó semilla de arroz certificada, ésta fue almacenada previo a la siembra y mostró valores bajos de germinación. Se hizo un análisis de germinación de las semillas, inmediatamente luego de la emergencia de las plantas, en el Centro de Investigación en Granos y Semillas (CIGRAS), el cual indicó que la germinación de las semillas era de 65%. Se determinó el porcentaje de semillas viables germinadas, que explica de mejor manera el efecto de los fertilizantes en la germinación de semillas de arroz.

Posterior a la aplicación de las fuentes fosforadas se muestreó sobre la línea de siembra y a 2 cm de ésta, para determinar el cambio en la magnitud del pH. Se utilizó pH pues es una



medición rápida y muestra claramente si hay un cambio en la acidificación del suelo causado por la aplicación de los fertilizantes; esto se hizo a los 5, 12 y 21 días después de aplicación (dda).

El pH se determinó con una relación 1:2,5 (10 g suelo:25 ml de agua) al mezclar el suelo seco con agua y luego de 20 min de agitación se realizó la lectura con un potenciómetro de acuerdo a la metodología descrita por Henríquez y Cabalceta (1999).

En las cajas los muestreos se hicieron con un sacabocados de un diámetro aproximado a 1 cm. El sacabocados se introdujo en el suelo a 2 cm de profundidad para la toma de la muestra y cada muestra constó de 12 submuestras. Finalmente se introdujeron las muestras al horno para el secado.

De acuerdo a lo anterior se utilizaron 3 de las 9 cajas aplicadas con MAP, para el primer muestreo a los 5 dda, otras 3 cajas para el de los 12 dda y las últimas 3 para el muestreo de los 21 dda. Cada caja representó la muestra por repetición; el mismo procedimiento se utilizó para el DAP.

Para cada muestreo se usó el espacio alrededor de las 3 plantas ubicadas más cercanas de cada uno de los dos bordes laterales de la caja (6 plantas). A estas seis plantas se les tomó submuestra, a ambos lados sobre la línea de aplicación, así como a los dos costados de la planta, para alcanzar el total de las 12 submuestras.

Al día siguiente de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados, lo cual corresponde con el final de la evaluación de las fuentes fosforadas, se hizo una determinación de altura, y peso fresco y seco, tanto aéreo como radical, de las 6 plantas alrededor de las cuales se tomaron las muestras para cada repetición. A estas plantas se les realizó un análisis químico completo de tejido, no se pudo hacer análisis para el caso de las raíces pues el peso seco de la muestra no alcanzaba para el análisis de tejidos.

Debido a que no alcanzó el peso seco del tejido radical para hacer análisis de raíces al momento de la aplicación de las fuentes nitrogenadas, se hizo otro muestreo 5 dda de los fertilizantes nitrogenados, para evidenciar alguna diferencia en los contenidos nutricionales de las raíces, que mostrara el efecto de las fuentes fosforadas aplicadas previamente. Lo que se hizo fue agrupar las raíces de las plantas que tenían DAP con las tres fuentes de N y lo mismo para el MAP, así se garantizó suficiente peso seco para poder hacer el análisis de raíces. Se aprovechó el muestreo para analizar el contenido de nutrientes de la parte aérea de las plantas para todas las interacciones.

Luego de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados se efectuó el mismo muestreo de suelo, descrito anteriormente para las fuentes fosforadas, a una distancia de 0 y 2 cm, a los 5, 12, 21, 35 y 44 dda, para nuevamente determinar si ocurría un cambio en la magnitud del pH. Se tomó el muestro final de las cajas con DAP y MAP como el muestreo inicial de estas evaluaciones.

El experimento estaba previsto que finalizara a los 22 dda, sin embargo al observar los cambios ocurridos en el pH se determinó llevarlo hasta los 35 dda, donde se hizo la evaluación final de las plantas. Al quedar posibilidad de hacer otro análisis de suelos, se procedió a realizar la última evaluación a los 44 dda.

La evaluación final de las plantas consistió en la determinación de altura de plantas, y el peso fresco y seco (tanto aéreo como radical) de las 6 plantas centrales que no habían sido influenciadas por los muestreos, lo que se hizo en cada caja para tener el dato de cada interacción por cada repetición. A cada caja (interacción P-N) se le realizó un análisis químico completo de tejido para la parte aérea y se juntaron las raíces (de las cajas de DAP y MAP) para cada repetición de cada fuente nitrogenada y así determinar la absorción de nutrientes.

A los 1, 5, y 35 dda de las fuentes nitrogenadas se sacaron las raíces, se les eliminó todo el suelo circundante a mano, y posteriormente se lavaron con agua desionizada; el suelo en contacto con las raíces que fue lavado y se recogió en cajas de plástico y se dejó por un día para que el suelo decantara y así poder eliminar el exceso de agua. Posteriormente la muestra se introdujo en el horno; con el fin de determinar el efecto de los fertilizantes en el pH de la rizosfera.

## **2.4 Segundo experimento**

### **2.4.1 Descripción de tratamientos y diseño experimental**

Luego de finalizar el primer experimento y analizar los valores de pH en cada edad de muestreo, se observó la necesidad de detallar el efecto del cambio en el pH entre las edades de 0 y 12 días.

Por esta razón se colocaron otras cajas con la misma dosis de P, siguiendo la metodología descrita anteriormente, pero sin sembrar plantas, y se definió hacer los muestreos en los días 1, 4, 7 y 10 dda con las dos fuentes.

Se optó por no estudiar la interacción entre las fuentes de P con las fuentes de N, y evaluar el efecto de elevar la dosis de  $P_2O_5$  a  $240 \text{ kg ha}^{-1}$  para determinar si las modificaciones en el suelo se incrementan por mayores dosis de fertilizantes. Para la aplicación de esta dosis se pesó para el DAP 2,4104 g para las líneas laterales y 2,1809 g para la central, mientras que para el MAP los pesos fueron 2,1323 g y 1,9292 g, respectivamente.

Luego de cada muestreo las muestras fueron introducidas en refrigeración, pues se quería valorar el efecto de las fuentes y dosis de P en la cantidad de nitratos y amonios presentes en el



suelo, por lo que se esperó hasta tener todas las muestras para introducir las al laboratorio y efectuar el análisis en el mismo momento. El resto de la muestra se procesó normalmente para efectuar las lecturas de pH.

En este experimento se utilizó un diseño de parcelas divididas, donde las parcelas grandes era la fuente de P y las parcelas pequeñas las dosis de fertilizante, cada parcela pequeña constó de tres repeticiones.

## **2.5 Tercer experimento**

### **2.5.1 Descripción de tratamientos y diseño experimental**

Con el fin de obtener un grupo de muestras más homogéneo, sin la influencia de factores como la planta o el riego que ocasiona lixiviación y movimientos laterales del fertilizante, se realizó este tercer experimento.

Consistió en la colocación de dos dosis de  $P_2O_5$  (120 y 240 kg ha<sup>-1</sup>) provenientes de las dos fuentes fosforadas (DAP y MAP) en potes de laboratorio con un volumen de suelo conocido; igual que en los experimentos anteriores se trabajó con tres repeticiones para cada tratamiento (fuente y dosis).

A cada pote se le agregaron 5 g de suelo previamente secado al horno, luego se agregó el fertilizante de acuerdo a la dosis y fuente, y por último se agregaron 5 g de suelo seco. Previamente se había determinado que una humedad adecuada (cercana a capacidad de campo) que propiciara la reacción de los fertilizantes se alcanzaba agregando 5 ml de agua a cada pote con 10 g de suelo seco más el fertilizante. Se utilizó 10 g de suelo seco ya que esta es la cantidad empleada en laboratorio para hacer el análisis de pH en agua.

Este procedimiento se ejecutó directamente sobre las bandejas de análisis usadas en el laboratorio con el fin de que la determinación del pH fuera prácticamente "in situ".

Para el cálculo del fertilizante por pote se midió el diámetro de los potes que fue de 4 cm y de acuerdo a los cm lineales se calculó el peso para cada dosis y fuente, para el DAP se pesaron 0,1148 g para 120 kg ha<sup>-1</sup> y 0,2296 g para 240 kg ha<sup>-1</sup>, los valores para el MAP fueron 0,1015 g y 0,2031 g, respectivamente.

Para este experimento se planeó realizar 11 muestreos que se hicieron a 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 15 y 18 dda de los fertilizantes. Se realizó de forma tal que el día de la evaluación coincidieran todos los muestreos, por lo que se fueron colocando a reaccionar los fertilizantes con el suelo y el agua en días diferentes. Se procedió a leer el pH de todas las muestras el mismo día y luego se secaron para el análisis químico de suelo.

Se utilizó un diseño experimental irrestricto al azar, pues no se hicieron bloques de los tratamientos, ya que se utilizó como se mencionó, las bandejas de análisis convencional utilizados en el laboratorio para cada tratamiento (dosis-fuente), que tiene tres hileras de potes cada una con 11 vasos; cada hilera se utilizó como repetición.

## ***2.6 Evaluación de la solución de fuentes fosforadas en agua***

Se aprovechó la facilidad de manejo en bandejas de laboratorio para valorar el efecto de cada dosis y fuente en el pH del agua. Para esto se adicionaron las mismas cantidades determinadas a añadir a cada pote para la dosis de 120 y 240 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> con DAP y MAP a 25 ml de agua; esta cantidad de agua es la que se utiliza para realizar la medición de pH en laboratorio. El pH inicial del agua utilizada fue de 7,8, luego se midió el pH al primer, segundo y quinto día de

efectuado la disolución para determinar si existían diferencias en los días. Posterior a esto se realizó lo mismo pero con agua acidificada con ácido clorhídrico al 10%, se llevó el agua a pH 6,8 y 6,3 para observar el comportamiento de las fuentes y dosis en otro pH de agua. Debido al leve efecto observado en los días posteriores a la aplicación de los fertilizantes, en la primera evaluación, sólo se valoró el cambio en el pH al día siguiente de adicionarlos.

## ***2.7 Efecto sobre la composición química del suelo***

De acuerdo a los resultados en la variación del pH de los primeros dos experimentos, se determinó los días para hacer análisis químico completo de nutrimentos, tanto para las fuentes fosforadas como para las nitrogenadas, con el fin de comprobar el efecto de la acidificación del suelo en la disponibilidad de los otros nutrimentos.

Para efectuar análisis químico completo se escogieron los muestreos hechos los días 5 y 21 del primer experimento, y a los días 1 y 10 del segundo experimento, y así tener de los experimentos elaborados en cajas en invernadero, un análisis químico de suelos a lo largo del proceso en los días 1, 5, 10, y 21 después de aplicados los fertilizantes.

A los muestreos realizados en el tercer experimento se les hizo el análisis químico completo a los días 1, 5, 10 y 18, con el fin de lograr comparar los datos de potes con los de laboratorio, con el único diferencial que se compara el día 21 de los potes con el día 18 de laboratorio como día final.

Para el caso de los muestreos ejecutados sobre las aplicaciones de los fertilizantes nitrogenados se les analizó químicamente todos los días muestreados, obteniendo un análisis químico completo de suelos para los días 5, 12, 21, 35 y 44 después de aplicados (dda).

## **2.8 Análisis de datos**

Para el análisis estadístico de los experimentos se realizaron ANDEVAS de acuerdo al diseño experimental utilizado en cada uno, seguido por una prueba de LSD para la separación de medias. Cuando fue necesario se hizo uso de desviaciones estándar y coeficientes de variación.



### 3. RESULTADOS y DISCUSIÓN

#### 3.1 Fertilizantes fosforados

##### 3.1.1. Efecto de la solución de las fuentes de P en el pH del agua

Como información preliminar se verificó el cambio en el pH del agua, en los primeros cinco días de reacción, al solubilizar ambas fuentes bajo estudio, MAP y DAP, directamente en agua. Estos resultados se muestran en la Figura 5 donde se destacó un cambio en el pH ocasionado por la fuente de P agregada y no así por la dosis ni el tiempo en solución.

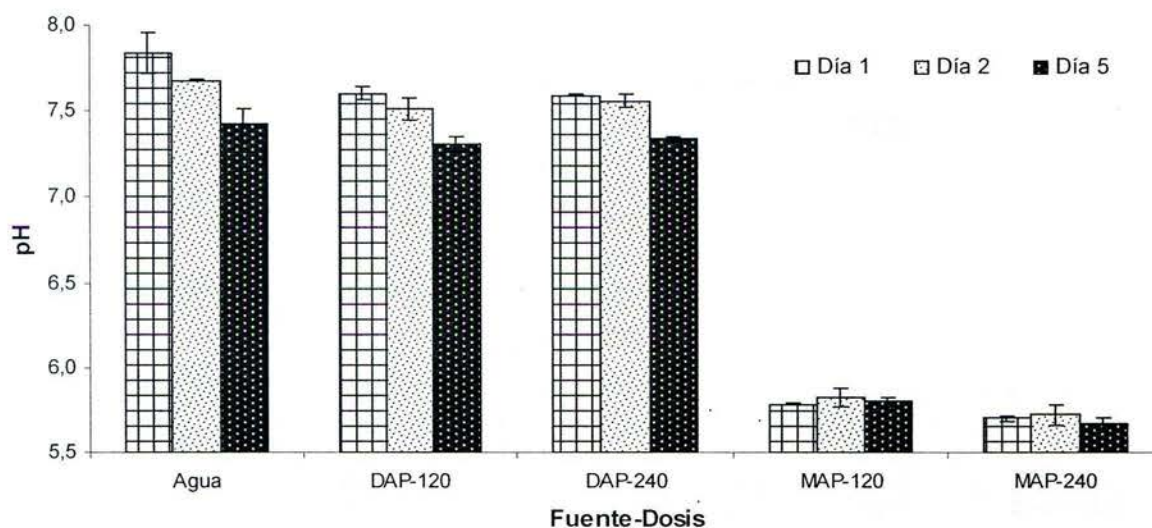


Figura 5. Medición del pH del agua 1, 2 y 5 dda 120 y 240  $P_2O_5$   $kg\ ha^{-1}$  con dos fuentes de fósforo: DAP (D) y MAP (M), utilizando agua con pH 7,8, en laboratorio.

El pH tanto con DAP como con MAP disminuyó con respecto al del agua, pero la mayor disminución la mostró el MAP. Esta fuente de P llegó a disminuir el pH del agua hasta en 2 unidades (Figura 5). Esta reacción, previamente documentada por autores como Fixen (1989) y Moody *et al.* (1995) fue una de las observaciones que motivó este trabajo. Por tanto, después de

ejecutar esta primera prueba se confirmó la importancia de verificar la repercusión de este efecto sobre el suelo inmediato a la raíz y sobre las plantas que crecen en él.

En relación con la dosis de P, el cambio que una o el doble de ella produjo sobre el pH del agua no fue mayor. En condiciones de laboratorio tampoco el tiempo influyó, el cambio ocurrido al primer día no varió con el paso de los días (Figura 5).

Para comprobar que el efecto de las fuentes sobre el pH no es algo dependiente del pH del agua inicial, ambas fuentes en sus dos dosis fueron expuestas a agua con tres valores de pH inicial; 6,3, 6,8 y 7,8. En la Figura 6, se puede observar nuevamente que el pH del agua fue modificado por la fuente de P agregada y no así por la dosis.

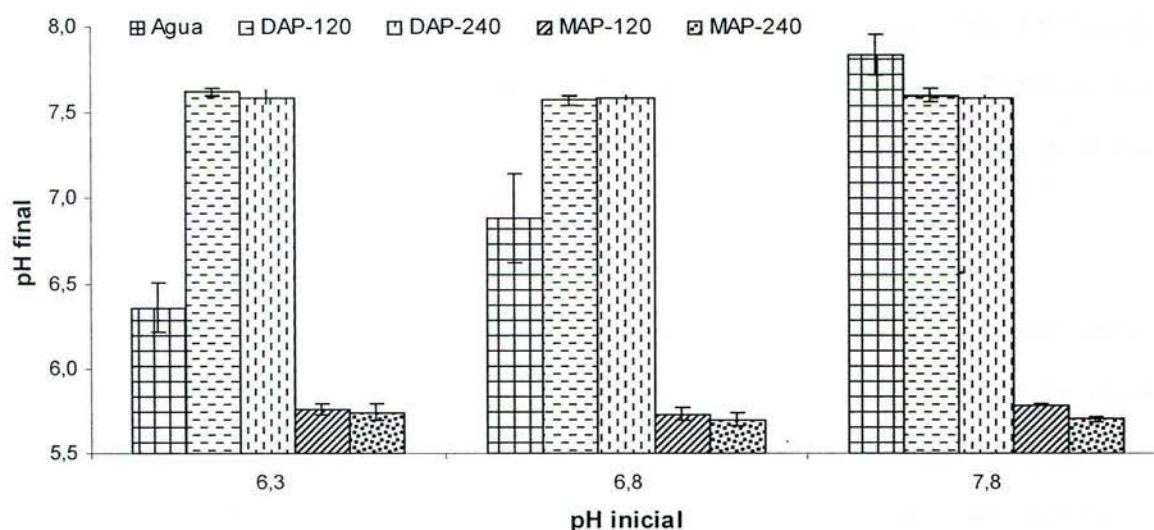


Figura 6. Variación del pH del agua con la aplicación de 120 y 240  $P_2O_5$  kg ha<sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo: DAP (D) y MAP (M), en laboratorio.

El efecto observado en la Figura 5, fue constante en la Figura 6. Sin importar el pH inicial del agua, el DAP tendió a llevar la solución a pH 7,6, mientras que el MAP la estabilizó en 5,7; estos resultados concuerdan con lo encontrado por autores como Langguth *et al.* (1955) citados por

Moody *et al.* (1995) y Sample *et al.* (1980). Lo anterior también permite indicar que tanto el DAP como el MAP tienen un efecto tampón al entrar en solución. Esto se evidencia a través de la disminución en el porcentaje de coeficiente de variación, ya que para las mediciones de pH con MAP y DAP, el coeficiente de variación fue cercano a 0,5%, mientras que para la del agua fue cercano a 2,5%.

### **3.1.2 Efecto de las fuentes de P en la germinación de semillas de arroz**

El primero de los efectos que se evaluó sobre la planta indicadora, fue la influencia de las dos fuentes de P (MAP y DAP) sobre la germinación de las semillas. Los resultados obtenidos, 87% de germinación con DAP y 81% con MAP, indican que las fuentes de P, incorporadas al suelo el día de la siembra, no mostraron un efecto significativo sobre el porcentaje de semillas viables germinadas, ya que de los tres factores que indican Moody *et al.* (1995) que pueden disminuir la germinación: un efecto osmótico, toxicidad de amoníaco y deficiencia de Ca inducida por aumento en la salinidad en la zona inmediata a la raíz, ninguno parece haber actuado en forma diferencial según la fuente.

Los cambios en el pH y en el resto de características químicas alrededor del fertilizante, incluyendo liberación de amonio y nitrato, que se mostrarán adelante no marcaron una diferencia entre las fuentes evaluadas a 120 kg de  $P_2O_5$   $ha^{-1}$ , lo cual indica que el efecto de quema de raíces y disminución de germinación que menciona Fixen (1989) no ocurrió ante las condiciones valoradas en este experimento, a pesar de que la dosis utilizada de  $P_2O_5$   $ha^{-1}$  se puede catalogar como alta para la mayoría de los cultivos.



### 3.1.3 Efecto de las fuentes de P en el crecimiento inicial de plantas de arroz

#### Variables de crecimiento aéreo

Para valorar el efecto de las fuentes de P sobre el crecimiento aéreo de las plantas se determinaron las variables altura y peso seco de plantas (Cuadro 3), y contenido nutricional (Cuadro 4).

Cuadro 3. Altura y peso seco aéreo de plantas de arroz a los 20 días después de emergencia, con incorporación el día de siembra de 120 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo (DAP y MAP).

Fuente	Rep	Altura de planta (cm)	Peso seco (g)
DAP	1	34,1	0,21
	2	30,1	0,20
	3	32,1	0,18
<b>Promedio</b>		<b>32,1</b>	<b>0,20</b>
DE		2	0
% CV		6	9
MAP	1	33,5	0,18
	2	30,2	0,18
	3	31,9	0,16
<b>Promedio</b>		<b>31,8</b>	<b>0,17</b>
D.E.		2	0
C.V.		5	9

DE= Desviación estándar; CV= Coeficiente de variación

En el Cuadro 3 se aprecia la altura y el peso seco de las plantas de arroz 20 días después de la emergencia (dde). Al igual que para la germinación de las semillas, no se observaron cambios en estos parámetros para las dos fuentes de P evaluadas, con la dosis de 120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>.

En promedio, ambas fuentes mostraron una altura cercana a los 32 cm, lo cual representa una tasa de crecimiento de 1,6 cm/día, que es un crecimiento normal en etapas tempranas de un cultivo de arroz de invierno, que fue la época de crecimiento en invernadero.



La falta de respuesta en términos de altura de plantas y peso seco aéreo pudo ser debida a los buenos niveles de P iniciales del suelo (Cuadro 1), y al uso continuo de fertilizantes en el suelo bajo estudio (Engelstad y Terman, 1980).

En el Cuadro 4 se observa el promedio, desviación estándar y coeficiente de variación del análisis de tejido aéreo de las plantas cosechadas a los 20 y 25 dde.

**Cuadro 4. Análisis de tejido aéreo a los 20 y 25 días después de emergencia, con la incorporación el día de siembra de 120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo (DAP y MAP), en invernadero.**

Fuente	Rep	%					%			mg/kg					
		N	P	Ca	Mg	K	S	SCa	SMg	SK	Fe	Cu	Zn	Mn	B
<b>20 días después de aplicar fuentes fosforadas</b>															
DAP	1	4,96	0,48	0,36	0,23	3,18	0,28	9,5	6,1	84,4	335	16	99	159	24
	2	5,10	0,58	0,39	0,26	3,52	0,35	9,4	6,2	84,4	258	18	65	191	23
	3	5,06	0,57	0,42	0,26	3,28	0,32	10,6	6,6	82,8	212	17	72	219	28
<b>Promedio</b>		<b>5,04</b>	<b>0,54</b>	<b>0,39</b>	<b>0,25</b>	<b>3,33</b>	<b>0,32</b>	<b>9,8</b>	<b>6,3</b>	<b>83,9</b>	<b>268</b>	<b>17</b>	<b>79</b>	<b>190</b>	<b>25</b>
DE		0,07	0,06	0,03	0,02	0,17	0,04	0,7	0,2	0,9	62	1,0	18	30	2,6
% CV		1	10	8	7	5	11	7	4	1	23	6	23	16	11
MAP	1	4,73	0,55	0,37	0,24	3,45	0,31	9,1	5,9	85,0	250	17	67	115	33
	2	4,98	0,58	0,38	0,24	3,34	0,34	9,6	6,1	84,3	223	16	71	114	19
	3	4,68	0,49	0,44	0,25	3,06	0,29	11,7	6,7	81,6	193	16	78	171	39
<b>Promedio</b>		<b>4,80</b>	<b>0,54</b>	<b>0,40</b>	<b>0,24</b>	<b>3,28</b>	<b>0,31</b>	<b>10,1</b>	<b>6,2</b>	<b>83,6</b>	<b>222</b>	<b>16</b>	<b>72</b>	<b>133</b>	<b>30</b>
DE		0,16	0,05	0,04	0,01	0,20	0,03	1,4	0,4	1,8	29	0,6	6	33	10,3
% CV		3	8	10	2	6	8	14	6	2	13	4	8	24	34
<b>25 días después de aplicar fuentes fosforadas</b>															
DAP	1	4,51	0,43	0,35	0,25	3,54	0,28	8,4	6,0	85,6	176	19	115	188	23
	2	4,62	0,41	0,32	0,23	3,20	0,27	8,5	6,2	85,2	197	18	71	157	19
	3	4,63	0,46	0,34	0,24	3,29	0,28	8,7	6,3	85,0	194	18	78	205	24
<b>Promedio</b>		<b>4,59</b>	<b>0,43</b>	<b>0,34</b>	<b>0,24</b>	<b>3,34</b>	<b>0,28</b>	<b>8,5</b>	<b>6,2</b>	<b>85,3</b>	<b>189</b>	<b>18</b>	<b>88</b>	<b>183</b>	<b>22</b>
DE		0,07	0,03	0,02	0,01	0,18	0,01	0	0,2	0,3	11	0,3	23	24	2,6
% CV		1	6	4	3	5	2	1	3	0	6	2	27	13	12
MAP	1	4,54	0,41	0,32	0,23	3,15	0,26	8,7	6,3	85,0	164	17	67	103	21
	2	4,66	0,45	0,33	0,24	3,20	0,29	8,8	6,3	84,9	164	16	68	99	20
	3	4,61	0,46	0,38	0,25	3,21	0,29	9,9	6,5	83,6	183	16	74	169	30
<b>Promedio</b>		<b>4,60</b>	<b>0,44</b>	<b>0,35</b>	<b>0,24</b>	<b>3,19</b>	<b>0,28</b>	<b>9,1</b>	<b>6,4</b>	<b>84,5</b>	<b>171</b>	<b>16</b>	<b>70</b>	<b>124</b>	<b>24</b>
DE		0,06	0,03	0,03	0,01	0,03	0,02	1	0,1	0,8	11	0,5	3	39	5,5
% CV		1	6	9	4	1	7	7	2	1	6	3	5	32	23

SCa= Saturación de calcio; SMg= saturación de magnesio; SK= saturación de potasio; D.E.= Desviación estándar; % C.V.= Coeficiente de variación

Letras diferentes muestran diferencias a una probabilidad de  $p < 0,05$ , LSD.

En el primer muestreo sólo para N y Mn se obtuvieron mayores contenidos y con diferencia significativa en las parcelas donde se utilizó DAP. Para el segundo muestreo nuevamente el Mn y también el Cu mostraron mayores valores ante la misma fuente (Cuadro 4). No obstante las diferencias en el Cu no se van a discutir con amplitud pues carecen de significado agronómico

de acuerdo a las variaciones obtenidas entre laboratorios (10-15% para Cu) reportadas por Corrales *et al.* (2005).

El mayor porcentaje de N foliar en las plantas provenientes de las bandejas aplicadas con DAP puede ser debido a la mayor concentración de N que tiene este producto con respecto al MAP. Al aplicar una dosis de 120 kg de  $P_2O_5$   $ha^{-1}$  el DAP aporta 47 kg N  $ha^{-1}$  mientras que el MAP apenas 25,4 kg. Este efecto no se apreció en el segundo muestreo, pues para ese momento ya se había realizado la aplicación de los 93 kg N  $ha^{-1}$  correspondiente a los tratamientos nitrogenados sobre ambas fuentes de P, lo que probablemente volvió despreciable esa diferencia.

La mayor absorción de Mn por la planta concuerda con el trabajo realizado por Randall *et al.* (1975) citados por Fixen (1989), quienes encontraron que la absorción de Mn en soya fue mejorada con el uso de DAP con respecto a MAP.

El valor de P en el follaje en esta prueba de invernadero no varió entre las fuentes de P aplicadas en ninguno de los muestreos (Cuadro 4). A pesar de que Fixen (1989) señala que la formación inicial de  $H_2PO_4^-$  con MAP, es más rápidamente asimilable por las plantas en comparación con el  $HPO_4^{2-}$  producido con el DAP, no se obtuvo diferencias en la absorción de P, lo que demuestra que ninguna de las fuentes permitió u ofreció una mejor asimilación. Esta situación podría explicarse por alguna o varias de las siguientes razones: 1) la dosis utilizada fue alta, por lo que la ventaja comparativa que pudo ofrecer la fuente según su forma iónica quedó opacada; 2) el cambio inicial que ocasionan estos productos en el pH y otros factores del suelo, que se verán más adelante, ocurrieron muy temprano, incluso antes de la emergencia de las plantas, razón por la cual los cambios en las formas iniciales de las dos fuentes no fueron detectables por las plantas; 3) que el factor intensidad como fracción determinante en la nutrición del P según apunta Kissel *et al.* (1985) fuera muy alto (20 mg  $L^{-1}$ , Olsen modificado, valor superior al nivel crítico establecido) al iniciar el experimento.

### **Variables de crecimiento radical**

En el caso del crecimiento radical también se valoró el efecto de las fuentes de P a través del peso seco (Figura 7) y del contenido nutricional (Cuadro 6).

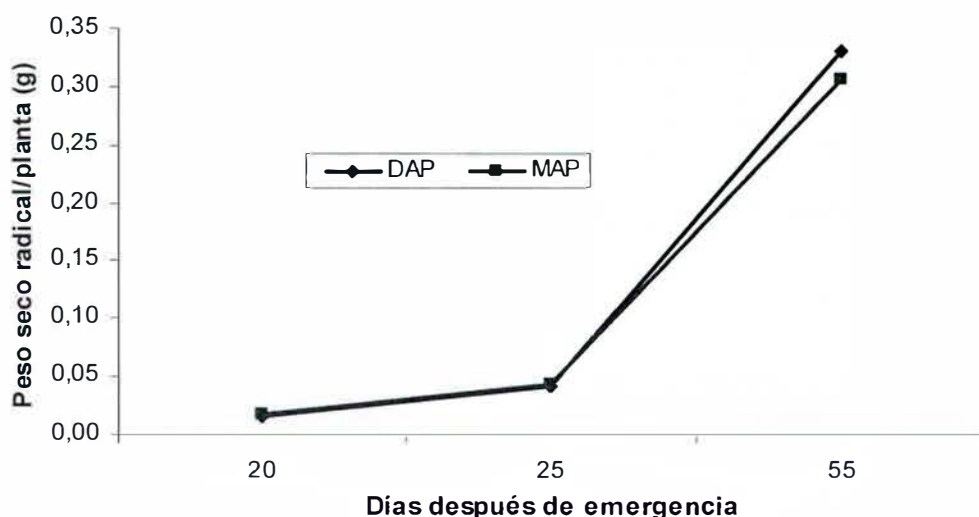


Figura 7. Peso seco radical por planta de arroz a los 20, 25 y 45 días después de emergencia, con la incorporación el día de siembra de 120 kg de  $P_2O_5$   $ha^{-1}$  con dos fuentes de fósforo (DAP y MAP) en invernadero.

En la Figura 7 se muestra el peso del sistema radical alcanzado por las plantas de arroz a los 20, 25 y 45 dde. Como se puede observar, no hubo diferencias significativas en el peso del sistema radical ante las fuentes de P evaluadas. A los 20 dde el peso del sistema radical en ambos tratamientos, apenas alcanzó los 0,02 g/planta, a los 25 dde casi alcanzaba el valor de 0,05 g/planta, mientras que al día de cosecha final del experimento se obtuvieron valores mayores a 0,30 g/planta.

Del segundo muestreo radical (25 dde), dado que había más material radical, se tomaron las raíces para hacer un análisis nutricional, y los resultados se muestran en el Cuadro 5.



Cuadro 5. Análisis de tejido radical a los 25 días después de emergencia, con la incorporación el día de siembra de 120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo (DAP y MAP) en invernadero.

Fuente	Rep	%						mg/kg				
		N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
DAP	1	2,58	0,23	0,22	0,29	1,58	0,25	5198	95	267	247	31
	2	2,40	0,22	0,25	0,26	1,76	0,26	5293	73	93	197	34
	3	2,47	0,27	0,26	0,30	1,71	0,31	3258	83	123	226	35
<b>Promedio</b>		<b>2,48</b>	<b>0,24</b>	<b>0,24</b>	<b>0,28</b>	<b>1,68</b>	<b>0,27</b>	<b>4583</b>	<b>84</b>	<b>161</b>	<b>223,3</b>	<b>33</b>
DE		0,09	0,03	0,02	0,02	0,09	0,03	1148	11	93	25	2,1
% CV		4	11	9	7	6	12	25	13	58	11	6
MAP	1	2,43	0,23	0,25	0,27	1,52	0,26	6627	89	144	206	33
	2	2,63	0,22	0,22	0,27	1,88	0,27	3076	81	118	138	32
	3	2,55	0,23	0,24	0,26	1,48	0,34	4052	76	116	182	31
<b>Promedio</b>		<b>2,54</b>	<b>0,23</b>	<b>0,24</b>	<b>0,27</b>	<b>1,63</b>	<b>0,29</b>	<b>4585</b>	<b>82</b>	<b>126</b>	<b>175,3</b>	<b>32</b>
DE		0,10	0,01	0,02	0,01	0,22	0,04	1835	7	16	34	1,0
% CV		4	3	6	2	14	15	40	8	12	20	3

SCa= Saturación de calcio; SMg= saturación de magnesio; SK= saturación de potasio;

D.E.= Desviación estándar; % C.V.= Coeficiente de variación

Letras diferentes muestran diferencias a una probabilidad de p<0,05, LSD.

No hubo diferencias entre los tratamientos fosforados para ninguno de los nutrientes analizados. En todos los casos los promedios fueron muy parecidos en las parcelas aplicadas con DAP con respecto a las aplicadas con MAP; sólo el Zn y Mn mostraron diferencia entre los promedios; para el Zn la diferencia podría haber sido ocasionada por una gran variación entre los resultados de las parcelas con DAP, donde un valor es el que eleva el promedio, mientras que para el Mn se percibe el mismo patrón observado en los resultados de follaje (Cuadro 4), donde las parcelas con DAP absorbieron más de este nutriente, pero en este caso las diferencias no llegaron a ser significativas.

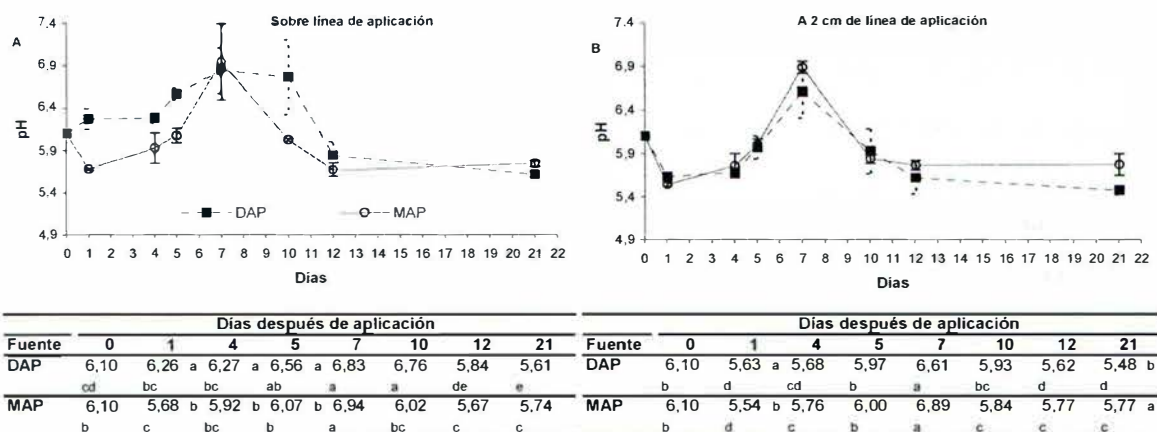


### 3.1.4 Efecto de las fuentes de P en el suelo

#### 3.1.4.1 Efecto sobre el pH del suelo

##### Prueba de invernadero

En la Figura 8 se muestra la variación en el pH del suelo de las pruebas realizadas en invernadero durante los 21 días siguientes a la incorporación del fertilizante, tanto sobre la línea de siembra (Figura 8A) como a los 2 cm (Figura 8B). Se puede resaltar que en la línea de aplicación (Figura 8A) hubo un comportamiento diferente entre fuentes, aspecto que no ocurre cuando los muestreos se hacen a 2 cm de dicha línea (Figura 8B).



Letras diferentes en columnas muestran diferencias entre fuentes a una probabilidad de  $p < 0,05$ , LSD.

Letras diferentes en filas muestran diferencias entre días de aplicación a una probabilidad de  $p < 0,05$ , LSD.

**Figura 8. Variación del pH del suelo, sobre la línea de aplicación (A) y a 2 cm (B), a 1, 4, 5, 7, 10, 12 y 21 dda  $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  con dos fuentes de fósforo: DAP y MAP, en invernadero.**

En concordancia con el comportamiento señalado en la literatura (Fixen, 1989; Moody *et al.*, 1995) y confirmado en la primera sección de esta discusión, el DAP mostró, inmediatamente después de su aplicación, una clara tendencia a elevar el pH del suelo sobre la línea de aplicación. Este proceso se inició al día siguiente de la aplicación y continuó ascendiendo hasta el séptimo día, donde alcanzó su máximo valor. A partir de los 10 días el comportamiento se

invirtió y se inició un fuerte proceso de acidificación hasta el día 12 que luego continuó pero con menor magnitud. El incremento de 0,7 unidades de pH con el uso de DAP a  $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  fue levemente superior al observado por Creamer y Fox (1980), de 0,5 unidades con el uso de  $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ .

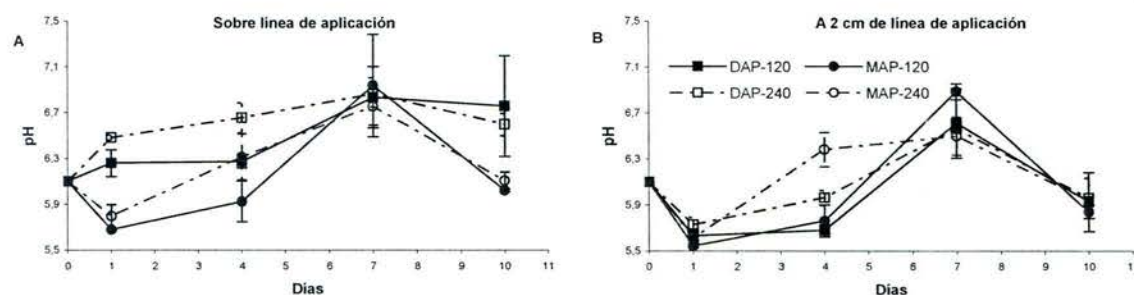
Contrario al DAP, cuando se evaluó el pH del suelo sobre la línea de aplicación (Figura 8A) el MAP tuvo un efecto acidificante en los primeros 5 días, comportamiento que también concuerda con los datos de solubilidad en agua obtenidos previamente (Figura 5) así como con lo descrito en la literatura. Por ejemplo Lombi *et al.* (2004), obtuvieron una disminución de 0,25 unidades en el pH con el uso de MAP en un suelo calcáreo, valor semejante al obtenido en este trabajo donde ocurrió una disminución de 0,4 unidades.

Después del efecto acidificante inicial del MAP, se revirtió este proceso y ocurrió una alcalinización del suelo que alcanzó valores tan altos como los obtenidos con el DAP al séptimo día (pH cercano a 7,0). Este efecto también fue descrito por Lombi *et al.* (2004), al indicar que en la vecindad de los gránulos de MAP puede ocurrir un incremento en el pH, que es debido a la formación de carbonatos de K y amonio, sin embargo señalan que este efecto normalmente ocurre en los primeros instantes de la reacción del MAP en el suelo y es temporal. Al igual que el DAP, el MAP, luego del incremento en el pH al día 7, comenzó de nuevo a acidificar el suelo hasta los 21 días, con valores similares entre ambas fuentes.

En síntesis, sobre la línea de aplicación, la principal diferencia entre ambas fuentes fertilizantes estuvo antes de los cinco días, donde el pH del suelo con el DAP se alcalinizó y con el MAP se acidificó; posterior a esta edad el efecto fue similar. Debido a que la emergencia de las plántulas de arroz ocurrió hasta los 10 dda, la fluctuación en el pH que se observó no tuvo efecto en germinación de semillas ni en el crecimiento radical.

En el caso del muestreo a 2 cm de la línea de aplicación, el incremento del pH observado con el DAP sobre la línea de siembra no se apreció (Figura 8B), lo cual concuerda con lo descrito por Mengel y Rehm (2000) y Claassen (2007a), quienes destacan la poca movilidad de los fertilizantes fosforados. A esta distancia el comportamiento de ambas fuentes fertilizantes fue el mismo, incluso con menor variación entre las repeticiones en todos los días evaluados. Para ambos fertilizantes, en los primeros 5 días posteriores a la aplicación a esa distancia de 2 cm no fue posible detectar los comportamientos particulares de cada fuente, así que lo que se reflejó en los datos fue el comportamiento general de la aplicación de los fosfatos amónicos: una disminución inicial en el pH del suelo, que al sétimo día, igual que sobre la línea de aplicación (Figura 8A), alcanzó valores máximos de pH e inmediatamente empezó a disminuir. A los 12 dda los valores de pH ya eran inferiores al valor inicial del suelo, efecto que se mantuvo hasta el día 21, donde se apreció una diferencia significativa entre el MAP y el DAP mostrando el primero mayor pH (Figura 8B). Esto concuerda con la mayor generación de acidez que puede producir el DAP al aportar más N y con su mayor índice de acidez (70%; Beegle, 2007) con respecto al del MAP (59%; Beegle, 2007).

Además de valorar el efecto de las fuentes de P en el suelo, se evaluaron dos dosis de P. Los datos tanto de DAP como de MAP a 120 y 240 kg  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> son presentados en la Figura 9, sobre la línea de aplicación y a 2 cm de ésta.



		Días después de aplicación							
Fuente	Dosis	0	1	4	7	10			
DAP	120	6,10	b	6,26	b	6,27	6,83	6,76	a
		b	b	b	a	a			
	240	6,10	a	6,48	a	6,65	6,86	6,60	a
		c	b	b	a	b			
MAP	120	6,10	c	5,68	c	5,92	6,94	6,02	b
		b	c	bc	a	bc			
	240	6,10	c	5,80	b	6,31	6,75	6,11	b
		b	c	b	a	b			

		Días después de aplicación								
Fuente	Dosis	0	1	4	7	10				
DAP	120	6,10	b	5,63	b	5,68	c	6,61	ab	5,93
		b	c	c	a	bc				
	240	6,10	a	5,73	a	5,96	b	6,56	ab	5,96
		b	c	b	a	b				
MAP	120	6,10	c	5,54	c	5,76	bc	6,89	a	5,84
		b	d	c	a	c				
	240	6,10	c	5,61	bc	6,38	a	6,50	b	5,94
		b	c	a	a	b				

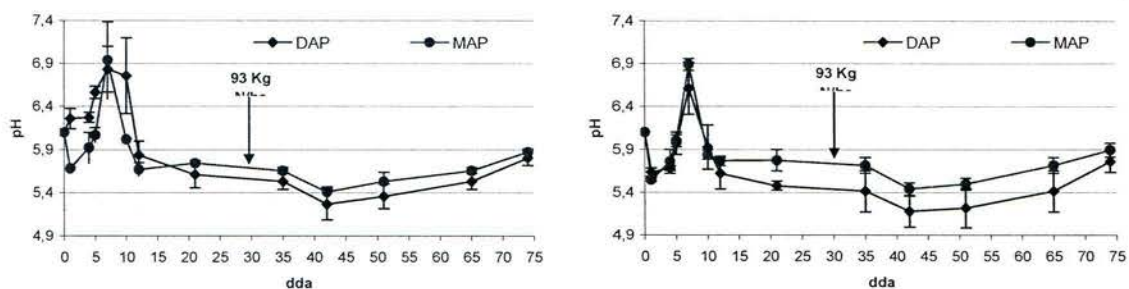
Letras diferentes en columnas muestran diferencias entre fuentes a una probabilidad de  $p < 0,05$ , LSD.  
 Letras diferentes en filas muestran diferencias entre días de aplicación a una probabilidad de  $p < 0,05$ , LSD.

**Figura 9.** Variación del pH del suelo, en la línea de aplicación (A) y a 2 cm (B) 1, 4, 7 y 10 dda 120 y 240  $P_2O_5$   $ha^{-1}$  con dos fuentes de fósforo: DAP y MAP, en invernadero.

Como se puede observar el comportamiento de la fuente de P se mantuvo a pesar del incremento de la dosis. El mayor pH se obtuvo a los 7 días tanto para el DAP como el MAP, con la misma magnitud que con la menor dosis. Lo único que ocurrió al duplicar la dosis del fertilizante, fue que en los días previos al 7 se obtuvieron valores de pH un poco más altos.

Posterior a la aplicación de los fertilizantes nitrogenados también se comparó el efecto de los fertilizantes fosforados sobre el pH. En la Figura 9, se presenta la curva de respuesta completa incluyendo hasta los 75 dda tanto para el muestreo sobre la línea de siembra (Figura 9A) como a los 2 cm de ésta (Figura 9B).





		Días después de la aplicación					
Fuente		21	35	42	51	65	74
DAP		5,61	5,53	5,27	5,36	5,53	5,80
		ab	bc	d	cd	bc	a
MAP		5,74	5,65	5,41	5,53	5,65	5,87
		b	b	d	c	b	a

		Días después de la aplicación					
Fuente		21	35	42	51	65	74
DAP		5,48	5,41	5,18	5,22	5,41	5,76
		ab	b	b	b	b	a
MAP		5,77	5,71	5,44	5,50	5,71	5,89
		ab	b	c	c	b	a

Letras diferentes en columnas muestran diferencias entre fuentes a una probabilidad de  $p < 0,05$ , LSD.  
 Letras diferentes en filas muestran diferencias entre días de aplicación a una probabilidad de  $p < 0,05$ , LSD.

**Figura 10.** Variación del pH del suelo, sobre la línea de aplicación (A) y a 2 cm (B), entre el día de siembra y los 75 dda  $120 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  con dos fuentes de fósforo: DAP y MAP, más la aplicación de  $93 \text{ kg N ha}^{-1}$  a los 30 dda el fertilizante fosforado, en invernadero.

En ninguna de las edades muestreadas después de los 21 días se encontraron diferencias significativas entre las fuentes fosforadas, en ninguno de los sitios de evaluación. La disminución en el pH y su posterior aumento es resultado de las reacciones de los fertilizantes nitrogenados, que se detallará más adelante.

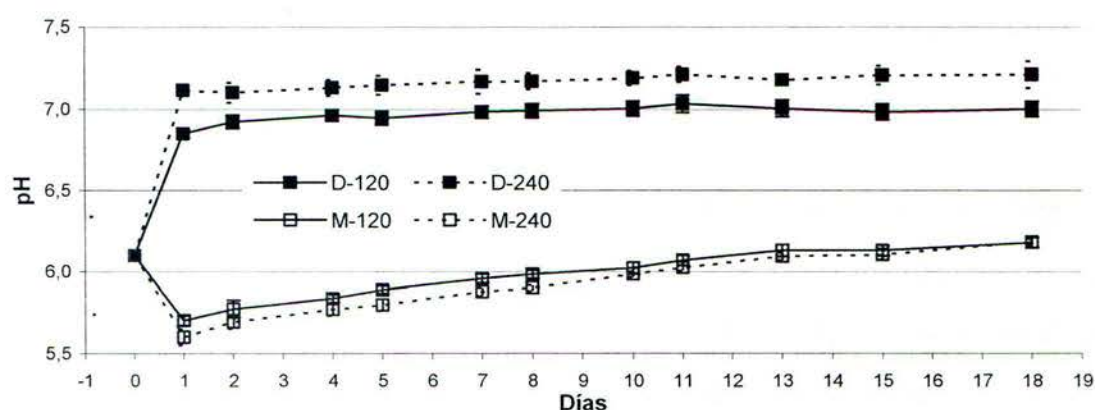
La diferencia existente entre MAP (superior) y DAP (inferior) que se había establecido aún antes de la aplicación de las fuentes nitrogenadas, se mantuvo constante hasta el último muestreo a los 74 dda, en ambos sitios de muestreo en concordancia con el mayor aporte de N del DAP.

El pH a los 74 dda (evaluación final) en promedio fue de 5,84 sobre la línea de aplicación y 5,83 a 2 cm de esta línea, lo cual constituyó una disminución de cerca de 0,25 unidades de pH, con respecto al valor inicial del suelo en un ciclo de cultivo de arroz con aplicaciones bajas de fertilizante nitrogenado ( $93 \text{ kg N ha}^{-1}$ ) pero con aplicación alta de fertilizante de siembra ( $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ ) como fue el efectuado en este ensayo. Este efecto marcado en la zona inmediata a la aplicación de fertilizantes, sin duda alguna explica la disminución en el pH del suelo que se produce a través de los años en las plantaciones continuas de arroz. En la experiencia personal

del autorexisten observaciones con cambios cercanos a 1,0 unidades de pH en el suelo de fincas comerciales de arroz en el transcurrir de 6-8 años.

### Prueba en bandejas de laboratorio

En la Figura 11 se presentará la comparación del pH del suelo para las dos fuentes de P y las dos dosis (120 y 240 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>), evaluadas durante los 18 días posteriores a la aplicación de los tratamientos en bandejas de laboratorio.



Fuente	Días después de aplicación												
Dosis	0	1	2	4	5	7	8	10	11	13	15	18	
DAP	6,10	6,85 b	6,92 b	6,96 b	6,94 b	6,98 b	6,99 b	7,00 b	7,03 b	7,01 b	6,98 b	7,00 b	
120	f	e	d	bcd	cd	bc	abc	ab	a	ab	bc	ab	
MAP	6,10	5,70 c	5,77 c	5,84 c	5,89 c	5,96 c	5,98 c	6,02 c	6,07 c	6,13 c	6,13 c	6,18 c	
120	bc	i	h	g	f	e	e	d	c	b	b	a	
DAP	6,10	7,12 a	7,10 a	7,13 a	7,15 a	7,17 a	7,17 a	7,19 a	7,21 a	7,18 a	7,21 a	7,21 a	
240	g	ef	f	def	cde	bcd	bcd	abc	a	abc	ab	a	
MAP	6,10	5,60 d	5,69 d	5,77 d	5,80 d	5,88 d	5,90 d	5,98 d	6,02 c	6,10 c	6,11 c	6,18 c	
240	b	h	g	f	f	e	e	d	c	b	b	a	

Letras diferentes en columnas muestran diferencias entre fuentes a una probabilidad de  $p < 0,05$ , LSD.

Letras diferentes en filas muestran diferencias entre días de aplicación a una probabilidad de  $p < 0,05$ , LSD.

Figura 11. Variación del pH del suelo entre 1 y 18 dda 120 y 240 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo: DAP (D) y MAP (M), realizado en bandejas en laboratorio.

Tanto la basificación que produce el DAP sobre el suelo como la acidificación del MAP descritas en la literatura (Creamer y Fox, 1980; Lombi *et al.*, 2004; Fixen, 1989; Moody *et al.*, 1995) se apreciaron con mayor claridad al realizar la evaluación bajo condiciones de laboratorio (Figura

11) probablemente por ser un sistema confinado, sin posibilidades de pérdidas o cambios dependientes del lavado. Igualmente, el efecto de la dosis de fertilizante aplicada quedó más claro en este trabajo con respecto al de los potes en invernadero, ya que con la dosis mayor se magnificó el resultado: una mayor basificación del suelo con el DAP y una mayor acidificación con el MAP.

El uso del DAP a la mayor dosis ( $240 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ ) mostró el mayor pH durante los 18 días de evaluación. Para ambas dosis se observó desde el primer día un incremento significativo con respecto al día cero o inicial, que se mantuvo hasta cerca de los 10 días; a partir de ahí el pH no sufrió variaciones importantes. La menor dosis de DAP tuvo datos menores en cerca de 0,2 unidades.

Contrario al DAP, y de acuerdo a la literatura, el MAP acidificó el suelo el primer día de aplicación, para ambas dosis. Posterior a esto ocurre una alcalinización continua hasta los 18 dda. Entre las dosis de MAP hubo diferencias significativas desde el primer día hasta el onceavo día, posterior a esta evaluación las dosis no volvieron a mostrar diferencias entre sí.

Como resumen del efecto de los fertilizantes fosforados sobre el pH del suelo se puede indicar, primero, que el impacto es muy claro cuando se trabaja bajo condiciones controladas de laboratorio; segundo, que bajo condiciones de invernadero el efecto tiende a disminuirse y no es tan claro debido a la dinámica de los procesos del suelo, que afectan directamente a los iones fosfato (adsorción, fijación y precipitación), así como los que afectan a los iones acompañantes (intercambio iónico y lixiviación); tercero, que el efecto sobre la línea de aplicación es diferente con respecto a 2 cm de dicha línea, lo que concuerda, como se mencionó anteriormente, con el bajo movimiento de los fertilizantes fosforados; cuarto, que la dosis más alta, magnifica el efecto claramente a nivel de laboratorio, en grado medio en invernadero, y no muestra impacto alguno al solubilizar los productos en agua. Esto último demuestra el papel fundamental del suelo en las reacciones de los fertilizantes.



### **3.1.4.2 Efecto sobre el contenido de nutrientes en el suelo**

#### ***Prueba en invernadero***

A partir de los resultados obtenidos en invernadero, se decidió realizar análisis químico completo de suelo a los 1, 5, 10 y 21 dda 120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> así como a los 1 y 10 dda 240 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> para valorar el efecto de la aplicación de los fertilizantes fosforados sobre el contenido nutricional. Lo anterior se realizó tanto sobre la línea de aplicación como a los 2 cm de dicha línea. Para cada una de esas fechas, así como en las dos dosis evaluadas se efectuó la comparación estadísticas entre el efecto de los dos productos, MAP y DAP, información que se resume en los Cuadro 6 y 7, sobre la línea de aplicación y a 2 cm, respectivamente. Los datos también se analizaron en función del tiempo (Anexo 1), y se establecieron correlaciones entre todos ellos, de las cuales, las más importantes se presentarán más adelante.



**Cuadro 6. Análisis químico de suelo inicial y a 1, 5, 10 y 21 dda 120 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> y a los 1 y 10 dda 240 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo (DAP y MAP), sobre la línea de aplicación, en invernadero.**

Día	Fuente	cmol(+)/L					%					mg/Kg				
		pH	K	Ca	Mg	Acidez	CICE	SK	SCa	SMg	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn
0		6,07	0,77	7,93	2,86	0,38	11,94	6,4	66,4	24,0	3,2	20	9	14	108	55
<b>120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup></b>																
1	DAP	6,26 a	1,02	7,81	3,30	0,33	12,45 *	8,2	62,7	26,5	2,6	369	15	21	187	82
	MAP	5,68 b	1,07	7,80	3,11	0,26	12,24	8,8	63,7	25,4	2,2	337	14	21	189	91
5	DAP	6,56 a	0,79	8,15	3,76	0,27	12,96	6,1	62,9	29,0	2,1	437 a	16	20	197	107
	MAP	6,07 b	0,76	8,25	3,63	0,22	12,86	5,9	64,1	28,2	1,7	299 b	15	23	176	107
10	DAP	6,76	0,86	7,53	3,83	0,36	12,58	6,8	59,8 b	30,5 a	2,9	585	18	26	234	90 b
	MAP	6,02	0,84	8,05	3,62	0,27	12,78	6,6	62,9 a	28,3 b	2,1	346	17	26	194	117 a
21	DAP	5,61	0,76	9,26	4,10	0,20	14,33	5,3	64,7	28,6 a	1,4	378	19	36 a	202	130
	MAP	5,74	0,71	9,05	3,82	0,17	13,74	5,2	65,8	27,8 b	1,3	222	25	31 b	169	134
<b>240 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup></b>																
1	DAP	6,48 a	1,03	6,03	2,85	0,56	10,46	9,9	57,3	27,3	5,5	906	19	29	295	106
	MAP	5,80 b	1,10	6,89	3,29	0,39	11,66	9,5	59,0	28,1	3,4	563	17	29	236	108
10	DAP	6,60 a	0,80	6,85	3,61	0,58	11,84	6,8	57,8 b	30,4 a	4,9	1002	22	28	319	127
	MAP	6,11 b	0,76	7,09	2,94	0,47	11,26	6,8	62,9 a	26,2 b	4,2	761	16	28	298	149

CICE: Capacidad de intercambio catiónico efectiva; SK: Saturación de potasio; SCa: saturación de calcio; SMg: saturación de magnesio; SA: saturación de acidez  
 Letras diferentes muestran diferencias a una probabilidad de p<0,05, LSD.

**Cuadro 7. Análisis químico de suelo inicial y a 1, 5, 10 y 21 dda 120 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> y a los 1 y 10 dda 240 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo (DAP y MAP), a 2 cm de la línea de aplicación, en invernadero, en invernadero.**

Día	Fuente	cmol(+)/L					%					mg/Kg				
		pH	K	Ca	Mg	Acidez	CICE	SK	SCa	SMg	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn
0		6,07	0,77	7,93	2,86	0,38	11,94	6,4	66,4	24,0	3,2	20	9	14	108	55
<b>120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup></b>																
1	DAP	5,63 a	0,96 b	8,86	3,52	0,12	13,47	7,2 b	65,8	26,2	0,9	20	12	21	100	88
	MAP	5,54 b	1,05 a	8,42	3,27	0,14	12,88	8,2 a	65,4	25,4	1,1	27	13	23	102	92
5	DAP	5,97 a	0,78	8,53	3,33	0,16	12,80	6,1	66,7	26,0	1,2	20	12	19	99	126
	MAP	6,00 a	0,79	8,87	3,60	0,18	13,43	5,8	66,0	26,8	1,3	17	10	20	94	117
10	DAP	5,93 a	0,80	8,29	2,97 b	0,17	12,24 b	6,6	65,8	23,7 b	1,5	30	13	27	105	92
	MAP	5,84 a	0,83	8,50	3,48 a	0,15	12,95 a	6,4	65,6	26,8 a	1,2	31	15	27	103	94
21	DAP	5,48 b	0,75	8,18 b	2,88 b	0,12	12,01 b	6,3	68,1	24,0	1,6	19	16	34	110 a	134
	MAP	5,77 a	0,78	9,01 a	3,63 a	0,14	13,57 a	5,9	65,1	25,8	1,4	20	14	27	94 b	136
<b>240 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup></b>																
1	DAP	5,73 a	1,03	8,17	3,31	0,15	12,67 a	8,1	64,5	26,1	1,2	62	13	26	114	88
	MAP	5,61 b	1,01	8,03	3,44	0,14	12,62 a	8,0	63,6	27,2	1,1	46	16	31	108	92
10	DAP	5,96	0,79	8,25	2,86 b	0,24	12,14 b	6,5	68,0 a	23,6 b	2,0	73	17	27	134	109
	MAP	5,94	0,79	8,53	3,84 a	0,23	13,38 a	5,9	63,7 b	28,7 a	1,7	194	16	28	169	112

CICE: Capacidad de intercambio catiónico efectiva; SK: Saturación de potasio; SCa: saturación de calcio; SMg: saturación de magnesio; SA: saturación de acidez  
 Letras diferentes muestran diferencias a una probabilidad de p<0,05, LSD.

En el suelo utilizado, en general para todos los elementos, los cambios obtenidos tanto sobre la línea de aplicación como a 2 cm de ésta fueron muy pequeños y se considera que en forma práctica no repercutirían de manera clara, sobre la decisión del uso de una fuente u otra en los programas de fertilización de cultivos como arroz, caña de azúcar y melón que son los utilizados normalmente sobre este tipo de suelo. Lo anterior es respaldado por el trabajo de Corrales *et al.* (2005) quienes señalan que la determinación en suelos con las soluciones extractoras Olsen modificado y Mehlich 3, que son las metodologías utilizadas en nuestro país, tienen una variación intrínseca de 10-15% para Ca, Mg, K y Acidez, 20-30% para P, S, Fe y Zn, y 15 a 20% para los otros elementos menores, por lo que si bien algunas de las evaluaciones presentan diferencias significativas, en la mayoría, éstas quedan incluidas dentro del ámbito de error del análisis en el laboratorio.

No obstante, resulta interesante observar los comportamientos estadísticos de estos resultados en busca de explicaciones a los comportamientos de las fuentes de P.

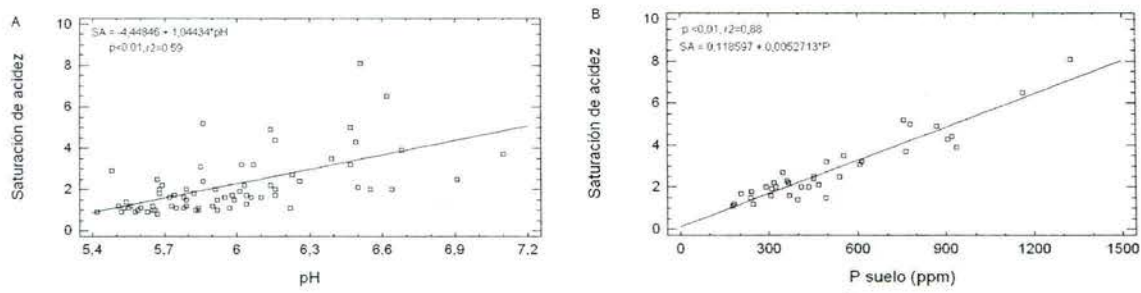
En términos estadísticos para las bases no se evidenciaron diferencias significativas entre las fuentes sobre la línea de aplicación (Cuadro 6). A los 2 cm, aparecieron algunos casos con diferencias significativas, que sugieren mayor disponibilidad de las bases cuando se aplica MAP que cuando se aplica DAP (Cuadro 7).

Otras observaciones que podrían ser relevantes de analizar se relacionan con el cambio en las concentraciones, ocasionados por las dos fuentes aplicadas, en comparación con el valor inicial del suelo. Los valores de K se incrementaron en forma consistente al día siguiente de la aplicación de las fuentes, sin importar el efecto de las dosis o ubicación del muestreo. En las etapas siguientes el K retornó al equilibrio existente previo a la aplicación de las fuentes. Por su parte el Mg presentó en más de un 90% de los muestreos valores mayores al inicial, mientras que el Ca a pesar de que podría pensarse que debería de mostrar un comportamiento similar al Mg, no presentó este incremento.



Los aumentos en los valores absolutos de las bases podrían asociarse al efecto que causan los fertilizantes en la zona aledaña a las arcillas, en donde como consecuencia de la alta concentración de  $H^+$  provenientes del proceso de hidrólisis del fertilizante, se podría producir una liberación o sustitución de esas bases hacia posiciones más externas de las arcillas que resulten más detectables para las soluciones extractoras utilizadas. No obstante como se mencionó anteriormente, la magnitud de los cambios encontrados en términos absolutos para el suelo en estudio, ocasionados por el MAP y el DAP, no representaron un cambio importante en su fertilidad. No obstante, incrementos de estas magnitudes en bases, podrían sí ser importante en suelos con menor fertilidad, donde el cambio observado podría inducir a una modificación en las decisiones de manejo.

Contrario a lo esperado, con la aplicación de las fuentes fertilizantes en estudio no se apreció un incremento en los valores de acidez intercambiable, más bien pareciera que lo que ocurrió fue una disminución en los contenidos. Sin embargo, estas diferencias no sobrepasaron más del 20-25% de variación aceptada en los laboratorios (Corrales *et al.*, 2005), para valores bajos como los obtenidos (Cuadro 6 y 7). Al observar la variación de la saturación de acidez del suelo en función del pH (Figura 12A), se obtuvo una correlación totalmente atípica porque fue positiva, lo cual es contrario a lo reportado en la literatura. Esto podría ser explicado nuevamente por la liberación de iones durante la reacción de hidrólisis de los fertilizantes en el suelo, que modifican el pH temporalmente pero no necesariamente la acidez intercambiable. En el análisis de laboratorio el AI intercambiable apareció como no detectable. Paralelamente en la Figura 12B, se puede observar que la saturación de acidez correlacionó más fuertemente con incrementos en la disponibilidad de P. Esta tendencia de tener más P soluble en condiciones levemente más ácidas, en un suelo como el del presente estudio resulta totalmente razonable.



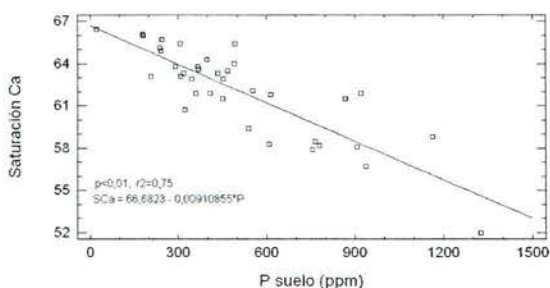
**Figura 12. Relación entre saturación de acidez y pH del suelo (A), y contenido de P (B), sobre la línea de aplicación de DAP y MAP a 120 y 240  $P_2O_5$   $ha^{-1}$ , en invernadero.**

El cálculo de la saturación de bases es un procedimiento que en ocasiones se ha usado con gran éxito para explicar de mejor manera el comportamiento del Ca, Mg, K en los suelos, al hacerlo en términos de proporción (relación entre valor de cada base con respecto a la CICE) (Kinsey, 1993; Valencia, 1988). En este trabajo la saturación de bases, específicamente la SMg, permitió visualizar con mayor claridad el incremento en Mg que ocurre sobre la línea de aplicación (Cuadro 7). La SMg cambió de 24% en el estado inicial a valores cercanos a 30%, lo que podría tener un impacto importante para los cultivos. No se apreció, sin embargo, una diferencia entre el MAP y el DAP sobre la disponibilidad de Mg. Tanto Kinsey (1993) como Valencia (1998) indican que ante condiciones ideales (para suelos ácidos) las saturaciones ideales deberían ser: SCa 60-70%, SMg 10-20%, SK 3-5% y SA 10-15%.

Otra ventaja del uso de la saturación de bases como herramienta de interpretación de resultados, se aprecia en la Figura 13, cuando se asoció la SCa con el valor de P disponible según el análisis de suelo. Esta relación sugiere que las aplicaciones fuertes de P pueden incidir sobre las cantidades de Ca que se podrían liberar por la acción de los fertilizantes aplicados, mediante una posible precipitación de fosfatos de Ca. Esto ocasionó que no se observara un incremento en el valor absoluto de la disponibilidad de Ca en el suelo como sí ocurrió con el Mg y que se había señalado anteriormente. Fassbender y Bornemisza (1994) enfatizan que uno de los principales problemas de la fertilización con fosfatos en suelos calcáreos es que estos



cambian rápidamente a formas que no son aprovechables por las plantas como fosfatos dicálcicos y tricálcicos poco solubles (apatitas). Nuevamente el parámetro de SCa fue más claro que el valor absoluto para explicar el comportamiento de este nutriente.



**Figura 13. Relación entre el contenido de P en el suelo y la saturación de calcio, sobre la línea de aplicación de DAP y MAP a 120 y 240  $P_2O_5$   $ha^{-1}$ , en invernadero.**

En lo que respecta al P sin duda alguna la principal diferencia radicó en el aumento de la disponibilidad sobre la línea de siembra con respecto a 2 cm de ella, junto a un efecto secundario de la dosis aplicada (Cuadro 6 y 7). En la banda de aplicación del producto, cuando se usó la menor dosis el incremento fue cercano a unas 20 veces con respecto al valor inicial, mientras que con la mayor dosis se incrementó 40 veces. Por otro lado a tan sólo 2 cm el cambio fue apenas de unas 5 veces con la dosis mayor y con la dosis menor no se apreció ningún aumento en el contenido. El hecho de que los efectos fueran más claros sobre la línea de aplicación se debe a los fuertes procesos de sorción o fijación que sufre el P en el suelo, que ocasionan una restringida movilidad a las zonas cercanas. Henríquez (2005) encontró mayores valores de sorción de P para un suelo cañero, con respecto a uno cafetalero y otro boscoso. Vale la pena recalcar que el suelo utilizado en este estudio provenía de uso continuo por más de 20 años en caña de azúcar. Además Lombi *et al.* (2004) señalan que inmediatamente después de la aplicación de los fertilizantes fosforados se pueden formar compuestos insolubles que ocasionan una disminución en la disponibilidad y movimiento del P. Por último al observar el efecto del producto aplicado sobre los contenidos absolutos de P, no se apreciaron diferencias

significativas entre el MAP y DAP, aunque el segundo podría tener la tendencia de producir mayores valores con respecto al MAP (Cuadros 6 y 7).

En síntesis la aplicación de la dosis de  $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ , que es una dosis alta para la mayoría de cultivos, no varió la disponibilidad de P en el suelo, a 2 cm de distancia; se necesitó una dosis tan alta como  $240 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  para apreciar algún grado de movimiento. Guerrero (1981) indica que los fosfatos solubles en agua son más efectivos cuando se utilizan granulados que cuando se usan en polvo, al disminuir la velocidad de disolución, en razón de la menor superficie total de partículas del fertilizante y la consecuente menor interacción con partículas del suelo. Es importante anotar que la aplicación realizada en este ensayo fue mediante fertilizante en polvo.

La disponibilidad de los micronutrientes no mostró una variación importante de destacar, que sea ocasionada, por la fuente aplicada, la dosis, la edad de evaluación o la distancia del muestreo con respecto al lugar de aplicación (Cuadros 6 y 7).

Anteriormente se describió el cambio en el comportamiento de los principales nutrientes ocasionados por la adición de MAP y DAP sobre la línea de siembra y a 2 cm de ella, ante dos dosis de P. No obstante, al estar desagregada la información la respuesta ante la dosis aplicada no quedó tan marcada como debería de estarlo, razón por la cual se presenta la información agrupada para cada dosis en el Cuadro 8, donde se compara la disponibilidad de los nutrientes a 0 y 2 cm de la línea de aplicación en los muestreos realizados a los días 1 y 10, sin importar la fuente.

Cuadro 8. Análisis químico de suelo inicial y a 1 y 10 dda 120 y 240 kg de  $P_2O_5$   $ha^{-1}$ , a 0 y 2 cm de la línea de aplicación de dos fuentes de fósforo (DAP y MAP), en invernadero.

Día	Dosis	pH	cmol(+)/L				%					mg/Kg				
			K	Ca	Mg	Acidez	CICE	SK	SCa	SMg	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn
0		6,07	0,77	7,93	2,86	0,38	11,94	6,4	66,4	24,0	3,2	20	9	14	108	55
<b>sobre línea de fertilización</b>																
1	120	5,97	1,04	7,80 a	3,21	0,30	12,35 a	8,5 b	63,2 a	25,9 a	2,4	353 b	14 b	21 b	188 b	87 b
	240	6,14	1,07	6,46 b	3,07	0,47	11,06 b	9,7 a	58,2 b	27,7 b	4,4	735 a	18 a	29 a	266 a	107 a
10	120	6,46	0,85 a	7,79 a	3,73 a	0,32 b	12,68 a	6,7	61,4	29,4	2,5 b	466 b	18	26	214 b	104 b
	240	6,35	0,78 b	6,97 b	3,28 b	0,52 a	11,55 b	6,8	60,4	28,3	4,5 a	882 a	19	28	309 a	138 a
<b>a 2 cm de línea de fertilización</b>																
1	120	5,86	0,84	7,61	2,84	0,18	11,48	7,9	66,0	24,5	1,6	26 b	13	23	105 b	85
	240	5,91	0,86	8,16	3,07	0,24	12,32	6,9	66,2	24,9	2,0	68 a	15	25	126 a	94
10	120	5,69	0,94	8,46	3,38	0,14	12,92	7,3	65,5 a	26,1 b	1,1 b	29	14 b	25	103	93 b
	240	5,78	0,90	8,28	3,64	0,19	13,00	7,0	63,7 b	27,9 a	1,4 a	120	16 a	29	139	102 a

CICE: Capacidad de intercambio catiónico efectiva; SK: Saturación de potasio; SCA: saturación de calcio; SMg: saturación de magnesio; SA: saturación de acidez  
 Letras diferentes muestran diferencias a una probabilidad de  $p < 0,05$ , LSD.

De esta manera, el efecto de las dosis de P sobre el Ca, que no se había podido apreciar en los Cuadros 6 y 7, al agrupar y promediar los datos por dosis de 120 y 240-kg  $P_2O_5$   $ha^{-1}$ , se mostró claramente sobre los contenidos en la línea de siembra, lo cual pone de manifiesto nuevamente el proceso de precipitación que ocurre entre el P disponible y el Ca.

También, la disminución en la disponibilidad de Ca absoluto con la mayor dosis (Cuadro 8), que por sí sola no pareciera ser muy importante, sí causa una variación en las saturaciones, un incremento para SK, SMg y SA, y la consecuente disminución de SCA, que podrían tener un impacto en el cultivo. Este efecto ocurre inmediatamente apenas se coloca el fertilizante en el suelo, sobre la línea de fertilización, y hasta los 10 dda a 2 cm de la banda de aplicación.

### ***Prueba en bandejas de laboratorio***

Al igual que para los resultados de los suelos en invernadero, se realizó análisis químico completo al suelo del experimento en bandejas de laboratorio a los mismos días. La principal diferencia entre invernadero y laboratorio fue que este segundo sólo se valoró la aplicación sobre el sitio en la zona inmediata a la banda de fertilización, y que el último muestreo en lugar de



realizarse a los 21 dda se realizó a los 18 dda. Los resultados de estas evaluaciones se muestran en el Cuadro 9.

**Cuadro 9. Análisis químico de suelo inicial y a 1, 5, 10 y 18 dda 120 y 240 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, con dos fuentes de fósforo (DAP y MAP), en bandejas de laboratorio.**

Día	Fuente	cmol(+)/L					%					mg/Kg				
		pH	K	Ca	Mg	Acidez	CICE	SK	SCa	SMg	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn
0		6,07	0,77	7,93	2,86	0,38	11,94	6,4	66,4	24,0	3,2	20	9	14	108	55
<b>120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup></b>																
1	DAP	6,85 a	0,87	6,04 b	2,89 b	1,25 a	11,04 b	7,8 a	54,7 b	26,2	11,3 a	1630 a	10	20	392	49
	MAP	5,70 b	0,86	6,99 a	3,10 a	1,00 b	11,95 a	7,2 b	58,5 a	26,0	8,4 b	1311 b	11	20	335	46
5	DAP	6,94 a	0,85	5,94 b	2,78	1,19 a	10,77	7,9	55,2	25,9	11,0 a	1765 a	10	19	368	85
	MAP	5,89 b	0,84	6,86 a	3,30	0,84 b	11,84	7,1	58,1	27,7	7,1 b	1482 b	11	18	351	84
10	DAP	7,00 a	0,83	6,08	2,87	1,14 a	10,92	7,6	55,7 b	26,3	10,4 a	1653 a	10	19	362	80
	MAP	6,02 b	0,80	6,27	2,84	0,83 b	10,74	7,5	58,4 a	26,5	7,7 b	1419 b	10	19	345	80
18	DAP	7,00 a	0,81	5,20 b	2,54 b	1,12 a	9,66 b	8,4 a	53,8 b	26,3	11,6 a	1664 a	10	17	363 a	83
	MAP	6,18 b	0,79	6,27 a	2,77 a	0,79 b	10,61 a	7,4 b	59,1 a	26,1	7,4 b	1275 b	10	17	327 b	74
<b>240 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup></b>																
1	DAP	7,12 a	0,81	4,69 b	2,48 b	2,68	10,66 b	7,6	44,0 b	23,2 b	25,2 a	2738	10 b	19	509	88 a
	MAP	5,60 b	0,79	5,61 a	2,90 a	2,47	11,76 a	7,5	47,6 a	24,6 a	21,0 b	2272	12 a	20	425	75 b
5	DAP	7,15 a	0,81	4,93	2,61	2,14	10,48	7,8	45,0	23,6	21,2	2853 a	10	17	428 a	119 a
	MAP	5,80 b	0,83	5,14	2,74	1,99	10,70	7,8	48,0	25,6	18,6	2499 b	12	18	403 b	104 b
10	DAP	7,19 a	0,79	4,70 b	2,39	2,27 a	10,15	7,8	46,3 b	23,6 b	22,4 a	2641 a	10 b	15	433 a	132 a
	MAP	5,98 b	0,82	5,20 a	2,62	1,90 b	10,54	7,8	49,3 a	24,9 a	18,0 b	2415 b	12 a	16	406 b	109 b
18	DAP	7,21 a	0,75	4,22 b	2,41 b	2,09 a	9,47 b	7,9	44,5 b	25,5 b	22,1 a	2591	9 b	16	441	136 a
	MAP	6,18 b	0,78	5,15 a	2,74 a	1,69 b	10,37 a	7,6	49,7 a	26,4 a	16,3 b	2302	11 a	17	414	107 b

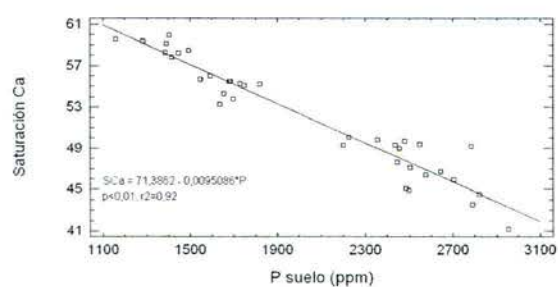
CICE: Capacidad de intercambio catiónico efectiva; SK: Saturación de potasio; SCa: saturación de calcio; SMg: saturación de magnesio; SA: saturación de acidez  
Letras diferentes muestran diferencias a una probabilidad de p<0,05, LSD.

El efecto sobre los parámetros del análisis de suelos por los fertilizantes fosforados fue más claro en las bandejas de laboratorio con respecto a las pruebas en invernadero.

La disponibilidad de K, no varió por la fuente de P utilizada, lo cual concuerda con lo descrito anteriormente para las condiciones de invernadero. Por otro lado, el aumento del K al primer día de evaluación fue mayor en invernadero (Cuadros 6 y 7) que en laboratorio, pero en ambos casos fue significativo (Cuadro 9).



Tanto la disponibilidad de Ca como de P mostraron diferencias significativas ante los factores fuente y dosis utilizada. Esta prueba en bandejas permitió demostrar el efecto de la fuente sobre la disponibilidad del Ca, aspecto que en la prueba en invernadero no se detectó. La fuente DAP disminuyó el contenido de Ca e incrementó el de P en todas las evaluaciones realizadas. Con el uso de la mayor dosis ocurrió la misma relación: menos Ca y más P. Sin duda alguna al relacionar los contenidos de P disponible con la SCa se obtuvo una muy alta correlación que explica de buena manera la precipitación del Ca como fosfatos de Ca (Figura 14).



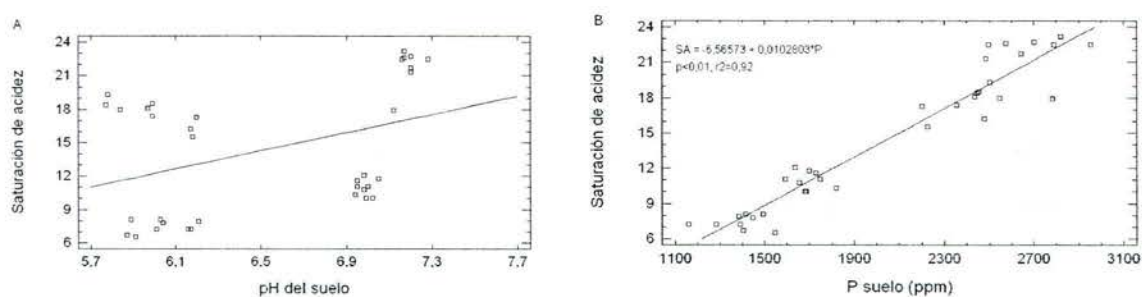
**Figura 14. Relación entre saturación de calcio y contenido de P, con la aplicación de DAP y MAP a 120 y 240  $P_2O_5$   $ha^{-1}$ , en bandejas de laboratorio.**

Los contenidos de Mg en el suelo con respecto al valor original, no se incrementaron tan claramente con el aporte de los fertilizantes, como lo observado en invernadero. Sin embargo, bajo condiciones de laboratorio sí se detectó un efecto de la fuente, donde nuevamente el DAP, al igual que con Ca muestra mayores valores que el MAP (Cuadro 9).

La acidez intercambiable del suelo sufrió un fuerte incremento ante la aplicación de ambas fuentes fertilizantes, y éste es todavía mayor al incrementar la dosis de fertilizante. El DAP consistentemente, en 6 de las 8 evaluaciones mostró mayores valores de acidez que cuando se aplicó MAP, en las otras dos evaluaciones se mantuvo la tendencia. Al comparar el efecto de la dosis, se obtuvo con la menor un promedio de 1,02 cmol, mientras que con la dosis mayor la

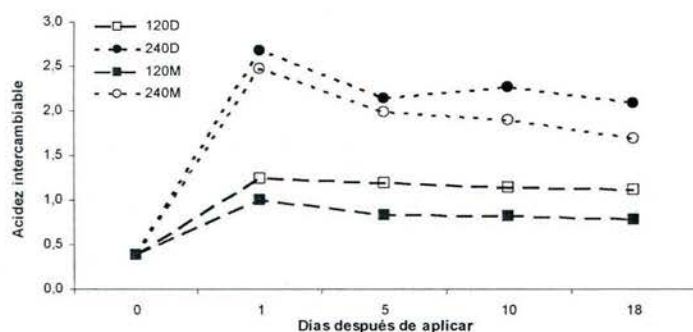
acidez alcanzó 2,15 cmol, lo que representa un incremento de 2,7 y 5,7 veces con respecto al valor inicial del suelo.

Igualmente que en condiciones de invernadero, no existe una buena relación entre el pH del suelo y la saturación de acidez (Figura 15A), mientras que se puede observar la misma buena correlación entre SA y P disponible (Figura 15B)



**Figura 15. Relación entre saturación de acidez y ph del suelo (A), y P disponible (B), con la aplicación de DAP y MAP a 120 y 240  $P_2O_5$   $ha^{-1}$ , en bandejas de laboratorio.**

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, se puede esperar un incremento fuerte en la acidez del suelo inmediatamente posterior a la aplicación de los fertilizantes, seguido por una disminución paulatina, que concuerda con los procesos de fijación y de menor liberación de  $H^+$  por los fertilizantes. Esto se puede apreciar en la Figura 16, donde se nota con claridad un efecto de la dosis, donde la magnitud fue cercana a 2 cmol para la dosis de 240 kg y a 1 cmol para 120 kg. Además en ambos casos el DAP presenta mayor acidez intercambiable con respecto al MAP. Al final de los 18 dda el valor de acidez todavía no retorna al valor inicial del suelo.



**Figura 16. Acidez intercambiable ante MAP (M) y DAP (D) y dos dosis 120 y 240 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>, en bandejas de laboratorio.**

Al comparar la disponibilidad de micronutrientes al recibir aplicación de DAP o MAP, ante la menor dosis, no hubo cambios de importancia. Pero con la mayor dosis sí se aprecia mayor disponibilidad de Zn, Fe y Mn con el uso de DAP. Si observamos por separado el efecto de la dosis, sin importar la fuente, sólo el Fe y el Mn mostraron un incremento en su disponibilidad (Cuadro 10), ante mayor cantidad de fertilizante. Esta mayor disponibilidad ocurre en mayor grado con el uso del DAP que a su vez incrementa el pH del suelo, lo cual demuestra que es un efecto directo de la solubilización del fertilizante y no de un cambio en la disponibilidad del nutriente ocasionado por pH. Valencia (1998) incluye dentro de la saturación de bases ideal para café un 3-5% de saturación de micronutrientes. El desplazamiento de los cationes de las arcillas por la actividad (liberación de H<sup>+</sup>) del fertilizante, puede ocasionar que, además ante una fuerte precipitación de fosfatos de Ca, queden espacios en la solución del suelo que puedan ser aprovechados por elementos como Fe y Mn. Estos cambios en disponibilidad de micronutrientes quedan dentro de la variación intrínseca del laboratorio (Corrales *et al.*, 2005) y no son de gran importancia en el manejo de cultivos.

### 3.1.4.3 Efecto de las fuentes de P en la disponibilidad de N

Debido a que en el presente trabajo el DAP y el MAP se equipararon buscando una dosis de P constante y a que el DAP aporta más kg de N por kg de  $P_2O_5$  con respecto al MAP, 0,39 vs 0,21, respectivamente, se evaluó el efecto de la fuente, dosis y sitio de colocación del fertilizante sobre los contenidos de amonio y nitrato en el suelo. A continuación se describe lo ocurrido a 0 y 2 cm de la línea de aplicación (Figuras 17 y 18).

Los contenidos de amonio y nitrato en el suelo ubicado sobre la línea de aplicación de DAP y MAP, con dosis de 120 y 240 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> se muestran en la Figura 17. Previo a comparar el efecto de la fuente y dosis, es importante señalar que los contenidos de amonio en el suelo fueron 22 veces mayores a los de nitrato.

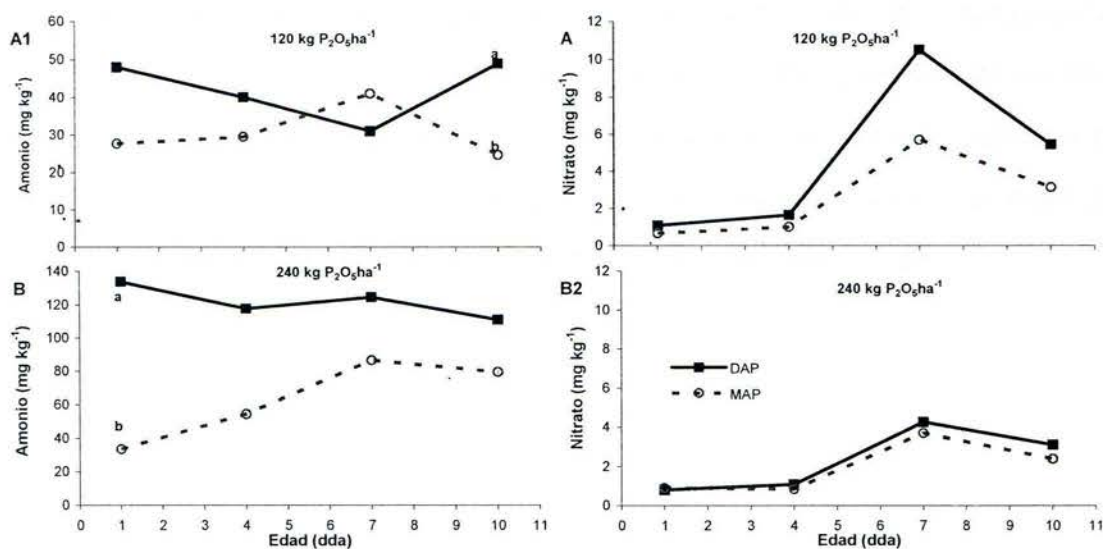


Figura 17. Contenido de amonio y nitrato en el suelo, sobre la línea de aplicación 1, 4, 7 y 10 dda 120 (A1 y A2) y 240 (B1 y B2) kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo: DAP (D) y MAP (M), en invernadero.



Ahora bien evaluando el efecto de la fuente, se obtuvo que el DAP, aunque sin diferencias significativas en la mayoría de las evaluaciones, tuvo valores superiores al MAP, lo que puede ser un efecto de la mayor cantidad de kg N aportados con esta fuente, ya que concuerda con lo mencionado por Dowling (2001) quien con el uso de DAP obtuvo un incremento en los niveles de amonio con respecto al MAP. A pesar de obtener un incremento en los niveles de amonio, éste no causó una disminución en la germinación de las semillas de arroz (Sección 3.1.2).

La dosis también tuvo un efecto importante en los contenidos de  $\text{NH}_4^+$  tanto para el DAP como para el MAP, sin embargo, los niveles de  $\text{NO}_3^-$  no fueron mayores con la mayor dosis, lo que indica que la capacidad de nitrificación del suelo se satura con la aplicación de la menor dosis (Figura 17).

Los contenidos de amonio y nitrato pero a 2 cm de la línea de aplicación, con las mismas fuentes y dosis se muestran en la Figura 18. Los fuertes incrementos en los valores de amonio ocurridos sobre la línea de aplicación (Figura 17), no se obtuvieron a tan sólo 2 cm de distancia de dicha línea. A 2 cm los valores con la mayor dosis de P son incluso menores a los obtenidos con la menor dosis pero sobre la línea de aplicación. También se puede notar que los contenidos de amonio a 2 cm son semejantes a los de nitrato, aspecto que no ocurrió a 0 cm.

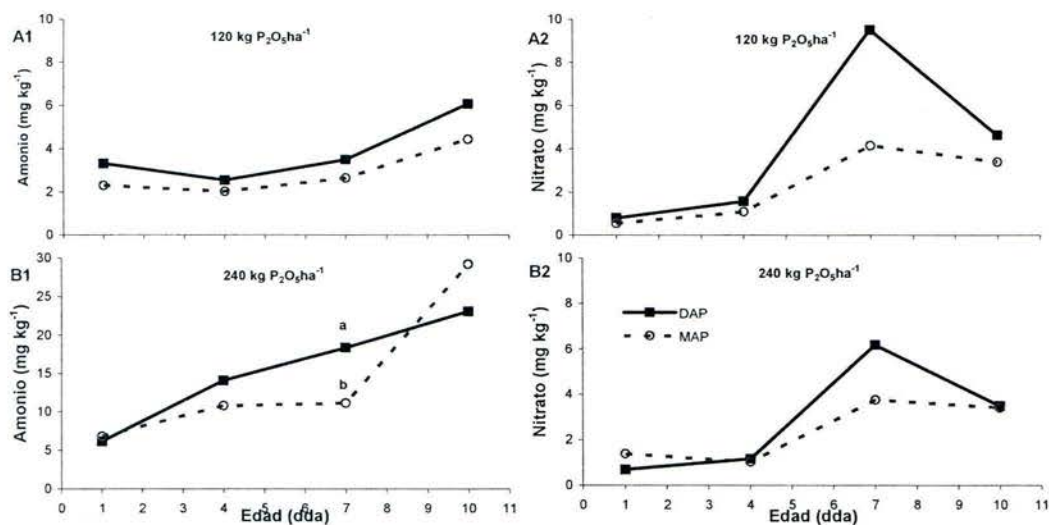
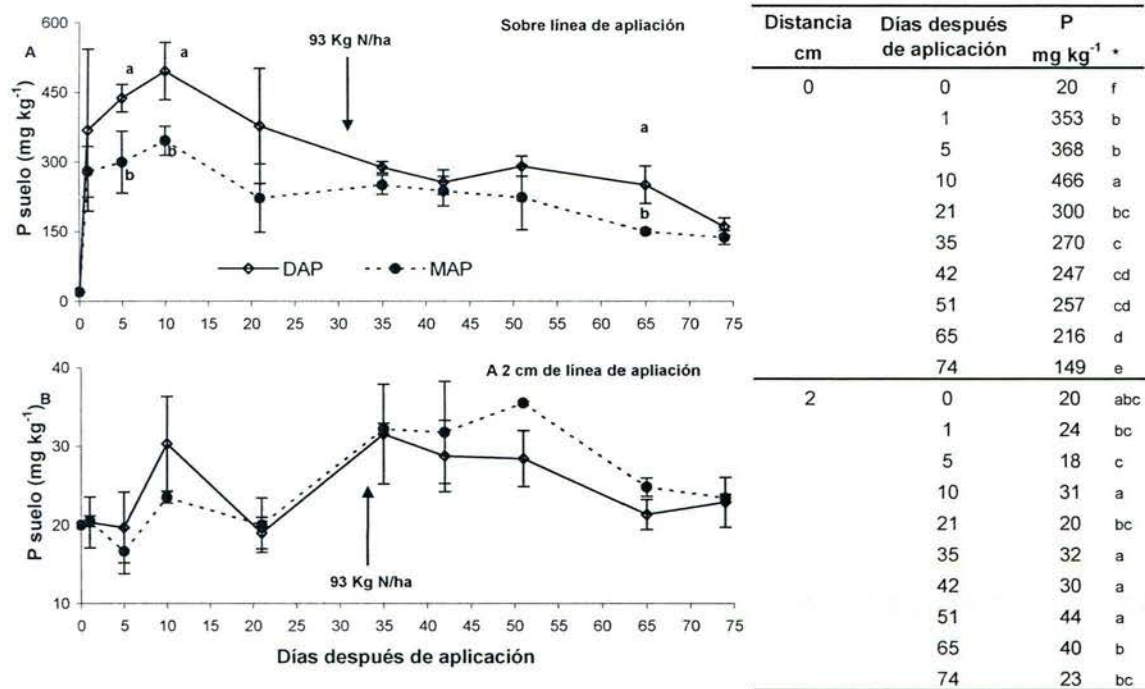


Figura 18. Contenido de amonio y nitrato en el suelo, a 2 cm de la línea de aplicación a 1, 4, 7 y 10 dda 120 (A1 y A2) y 240 (B1 y B2) kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> con dos fuentes de fósforo: DAP (D) y MAP (M).

A los 2 cm el comportamiento de amonio entre fuentes y dosis fue igual pero de menor magnitud. En el caso del nitrato en fue similar incluso en magnitud. El hecho de que no haya una clara variación para el nitrato entre dosis, fuentes y distancias podría deberse a que estos factores no son los que determinan la cantidad de nitratos presentes en el suelo, sino que el contenido está definido por la actividad de las bacterias nitrificadoras.

#### 3.1.4.4 Efecto de las fuentes de P en la curva de disponibilidad de P

El impacto que causa la fuente de P en la disponibilidad de este nutriente se estimó a través del tiempo del ensayo de invernadero. De este modo se obtiene la curva de disponibilidad de P en el suelo a 0 y a 2 cm de la línea de aplicación de los fertilizantes que se muestra en las Figura 19A y 19B, respectivamente. Se marcan dentro del gráfico con letras las diferencias entre fuentes y en la tabla de la par las diferencias entre los días después de la aplicación para cada distancia.



\*= Letras diferentes para cada distancia muestran diferencias a una probabilidad de  $p < 0,05$ , LSD

Figura 19. Disponibilidad de P sobre la línea de aplicación de  $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  con DAP y MAP, y luego de  $93 \text{ kg N ha}^{-1}$  con Urea, NA y NCa.

Lo más destacable de la Figura 19 es el cambio en la disponibilidad de P que ocurre entre los sitios de muestreo. Sobre la línea de aplicación ocurre un incremento de casi 20 veces con respecto al valor inicial, mientras que a tan sólo 2 cm de ésta el valor lo máximo que llega a ser es 2 veces el valor inicial del suelo. También se puede resaltar que sobre la línea de aplicación todavía a los 75 días se mantienen altos niveles de P, que sin lugar a duda pueden causar efectos benéficos en las plantas, los niveles vienen en disminución pronunciada que concuerda con lo mencionado por Lombi *et al.* (2004) quienes indican que la sorción de P en suelos calcáreos puede mantenerse en el tiempo. Los dos efectos descritos ratifican el poco movimiento que se describe en la literatura, y que ya fue mencionado anteriormente.

Sobre la línea de aplicación se obtuvieron mayores valores de P cuando se aplicó el DAP con respecto al MAP, pero sólo antes de los 10 días. Al no haber diferencia en la disponibilidad de P a 2 cm, tampoco se observa algún efecto de la fuente utilizada.

También es importante destacar, que a 2 cm de la línea de aplicación, ocurre un aumento en la disponibilidad de P posterior a la aplicación de los fertilizantes nitrogenados. Este efecto se debe a la inicial acidificación que en promedio ocasionan los fertilizantes nitrogenados en la composición química del suelo (Figura 22), y que hacen más solubles los fosfatos de Ca formados con anterioridad.

## **3.2. Efecto de los fertilizantes nitrogenados**

### ***3.2.1 Efecto de las fuentes de N en el crecimiento inicial de plantas de arroz***

#### ***Variables de crecimiento aéreo***

Para valorar el impacto de las tres fuentes nitrogenadas sobre el crecimiento aéreo de las plantas, se determinaron variables como: altura de planta (con la cual se calcula la tasa de crecimiento) y peso seco (Cuadro 10), así como contenido nutricional de la planta (Cuadro 11).

La altura y peso seco de plantas son variables que pueden describir ventajas ocasionadas por el aprovechamiento de una fuente nitrogenada, y por su parte la tasa de crecimiento refleja los incrementos en término de cm por día. Todas estas variables se presentan en el Cuadro 10.



**Cuadro 10. Altura de planta, tasa de crecimiento y peso seco radical por planta a los 55 dde, 35 dda 93 kg de N ha<sup>-1</sup> con nitrato de amonio, nitrato de calcio y Urea, en invernadero.**

		cm		cm día <sup>-1</sup>		g				cm		cm día <sup>-1</sup>		g			
Fuente	Rep	Altura	TC	A5	A35	Fuente	Rep	Altura	TC	A5	A35	Fuente	Rep	Altura	TC	A5	A35
Nitrato de amonio	1	68,3	1,24	3,0	14,7	Nitrato de calcio	1	65,9	1,20	2,6	14,6	Urea	1	67,3	1,22	2,9	12,7
	2	59,0	1,07	2,4	16,1		2	59,1	1,07	2,5	17,6		2	54,1	0,98	2,5	15,8
	3	64,6	1,17	1,4	12,2		3	62,6	1,14	1,8	8,7		3	58,4	1,06	1,5	13,9
	4	70,2	1,28	2,9	13,4		4	67,6	1,23	2,1	13,5		4	60,6	1,10	2,7	17,1
	5	59,4	1,08	2,1	14,2		5	56,0	1,02	2,9	13,3		5	58,1	1,06	2,4	16,2
	6	63,7	1,16	1,7	9,9		6	57,0	1,04	1,4	8,2		6	57,3	1,04	2,3	10,3
<b>Promedio</b>		<b>64,2</b>	<b>1,17</b>	<b>2,25</b>	<b>13,42</b>	<b>Promedio</b>		<b>61,4</b>	<b>1,12</b>	<b>2,22</b>	<b>12,65</b>	<b>Promedio</b>		<b>59,3</b>	<b>1,08</b>	<b>2,38</b>	<b>14,33</b>
D.E.		4,5	0,1	0,6	2,2	D.E.		4,8	0,1	0,6	3,6	D.E.		4,5	0,1	0,5	2,5
C.V.		7	7	28	16	C.V.		8	8	25	28	C.V.		8	8	20	18

TC= Tasa de crecimiento; A5= peso seco aéreo 5 días; A35= peso seco aéreo 35 días

Tanto para la altura de planta y la tasa de crecimiento, así como el peso seco aéreo a los 5 y 35 dda de las fuentes nitrogenadas, no se obtuvieron diferencias significativas que demuestren el mayor aprovechamiento de alguna de las fuentes. Esto concuerda con trabajos realizados por Bejarano (2010)<sup>1</sup> donde ha encontrado claros efectos por la dosis de N aplicada en plantas de arroz más que por la fuente utilizada. La tasa de crecimiento de las plantas, creciendo bajo condiciones de invernadero, fue bastante similar entre las fuentes; mostró valores en un rango normal-bajo para esta etapa de cultivo (cerca de inicio de primordio floral) de una siembra de invierno.

El día de la medición de peso seco aéreo, 5 dda las fuentes nitrogenadas se enviaron las plantas al laboratorio para realizar un análisis químico de su contenido. El promedio ante cada fuente así como su desviación estándar y el coeficiente de variación se presentan en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Análisis de tejido aéreo a los 25 dde, 5 dda 93 kg N ha<sup>-1</sup> con nitrato de amonio, nitrato de calcio y Urea a los 20 dde, en invernadero.

Fuente Rep	%						%			mg/kg									
	N	P	Ca	Mg	K	S	SCa	SMg	SK	Fe	Cu	Zn	Mn	B					
Nitrato Amonio	1	4,58	0,46	0,33	0,26	3,58	0,28	7,8	6,1	86,0	173	18	80	176	14				
	2	4,70	0,46	0,31	0,24	3,37	0,29	7,9	6,1	86,0	206	18	72	134	16				
	3	4,68	0,44	0,32	0,24	3,07	0,28	8,8	6,5	84,7	172	16	76	190	19				
	Promedio	<b>4,65</b>	<b>b</b>	<b>0,45</b>	<b>0,32</b>	<b>b</b>	<b>0,24</b>	<b>3,34</b>	<b>0,28</b>	<b>8,2</b>	<b>b</b>	<b>6,2</b>	<b>85,6</b>	<b>a</b>	<b>184</b>	<b>17</b>	<b>76</b>	<b>167</b>	<b>16</b>
D.E.	0,1	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,6	0,2	0,8	20	1	4	29	2					
% C.V.	1	3	2	4	8	2	7	3	1	11	8	5	18	14					
Nitrato Calcio	1	4,31	0,41	0,41	0,25	3,40	0,28	10,0	6,1	83,9	185	19	140	135	42				
	2	4,36	0,40	0,38	0,25	3,32	0,27	9,5	6,2	84,2	157	19	80	132	32				
	3	4,43	0,42	0,44	0,25	3,38	0,28	10,7	6,2	83,1	155	16	70	196	45				
	Promedio	<b>4,36</b>	<b>c</b>	<b>0,41</b>	<b>0,41</b>	<b>a</b>	<b>0,25</b>	<b>3,37</b>	<b>0,27</b>	<b>10,1</b>	<b>a</b>	<b>6,1</b>	<b>83,8</b>	<b>b</b>	<b>165</b>	<b>18</b>	<b>96</b>	<b>154</b>	<b>40</b>
D.E.	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,1	0,6	17	2	38	36	7					
% C.V.	1	3	7	1	1	3	6	1	1	10	10	39	23	18					
Urea	1	4,68	0,39	0,28	0,22	3,06	0,26	7,9	6,2	85,9	152	17	54	126	11				
	2	4,87	0,43	0,30	0,22	2,92	0,29	8,6	6,4	85,0	179	16	58	119	11				
	3	4,76	0,52	0,32	0,26	3,30	0,30	8,3	6,6	85,1	240	20	82	175	18				
	Promedio	<b>4,77</b>	<b>a</b>	<b>0,45</b>	<b>0,30</b>	<b>b</b>	<b>0,23</b>	<b>3,09</b>	<b>0,28</b>	<b>8,2</b>	<b>b</b>	<b>6,4</b>	<b>85,4</b>	<b>a</b>	<b>190</b>	<b>17</b>	<b>65</b>	<b>140</b>	<b>13</b>
D.E.	0,1	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0	0,4	0,2	0,5	45	2	15	31	4					
% C.V.	2	15	7	9	6	8	4	3	1	24	12	24	22	32					

SCa= Saturación de calcio; SMg= saturación de magnesio; SK= saturación de potasio; D.E.= Desviación estándar; % C.V.= Coeficiente de variación  
 Letras diferentes muestran diferencias a una probabilidad de  $p < 0,05$ , LSD.

A pesar de que no hubo diferencias significativas en el peso seco de las plantas a los 5 días después de aplicar las fuentes nitrogenadas. Si se aprecia un impacto inmediato a la aplicación de las fuentes, sobre la concentración foliar de N, Ca y B. La variación en el contenido absoluto de Ca ocasionó diferencias significativas en las saturaciones de Ca y K (Cuadro 11).

La aplicación de urea mostró valores más altos de N, seguida por el NA y el menor valor fue el del NCa. El NCa, a pesar de tener los menores valores de N, incidió de forma positiva en elevar los contenidos de B y Ca, este efecto era totalmente esperable pues esta fuente a parte del N aporta estos nutrientes, que no fueron nivelados en los otros tratamientos.

El día de la corta final del experimento, se volvió a enviar las plantas al laboratorio para realizar un análisis químico de su contenido y poder comparar el efecto de la aplicación inicial de las fuentes sobre los contenidos nutricionales 35 días después. En el Cuadro 12, se presenta el promedio, desviación estándar y coeficiente de variación para cada fuente aplicada.

Cuadro 12. Análisis de tejido aéreo a los 55 dde, 35 dda 93 kg N ha<sup>-1</sup> con nitrato de amonio, nitrato de calcio y Urea a los 20 dde, en invernadero.

Fuente	Rep	%						%			mg/kg				
		N	P	Ca	Mg	K	S	SCa	SMg	SK	Fe	Cu	Zn	Mn	B
Nitrato Amonio	1	3,38	0,31	0,32	0,27	3,22	0,26	8,1	7,1	84,5	251	16	105	194	6
	2	3,24	0,32	0,31	0,24	2,81	0,26	9,4	7,0	83,9	288	15	85	137	5
	3	3,51	0,41	0,33	0,37	3,87	0,27	8,8	8,0	84,7	206	18	146	210	6
	Promedio	<b>3,38</b>	<b>0,34</b>	<b>0,32</b>	<b>0,29</b>	<b>3,30</b>	<b>0,26</b>	<b>8,8</b>	<b>7,4</b>	<b>84,3</b>	<b>248</b>	<b>16</b>	<b>112</b>	<b>180</b>	<b>6</b>
	D.E.	0,1	0,1	0,0	0,1	0,5	0,0	0,6	0,5	0,4	41	2	31	38	1
% C.V.	4	16	4	23	16	2	7	7	1	16	9	28	21	9	
Nitrato Calcio	1	3,42	0,30	0,36	0,28	3,08	0,25	7,9	7,4	83,0	222	15	133	62	8
	2	3,17	0,32	0,39	0,27	3,22	0,26	8,1	7,0	83,1	230	14	81	53	12
	3	3,33	0,33	0,41	0,31	3,08	0,25	8,7	8,1	81,2	151	15	69	71	13
	Promedio	<b>3,30</b>	<b>0,31</b>	<b>0,38</b>	<b>0,28</b>	<b>3,12</b>	<b>0,25</b>	<b>8,3</b>	<b>7,5</b>	<b>82,4</b>	<b>201</b>	<b>15</b>	<b>94</b>	<b>62</b>	<b>11</b>
	D.E.	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,4	0,5	1,1	43	1	34	9	2
% C.V.	4	6	7	7	3	1	5	7	1	22	3	36	14	23	
Urea	1	3,33	0,28	0,37	0,22	2,96	0,25	7,8	6,1	83,5	199	15	55	136	6
	2	2,78	0,28	0,29	0,20	2,64	0,22	9,0	6,3	84,6	183	11	56	87	5
	3	3,43	0,33	0,37	0,29	3,12	0,25	8,7	7,7	82,7	179	13	68	143	6
	Promedio	<b>3,18</b>	<b>0,29</b>	<b>0,34</b>	<b>0,23</b>	<b>2,90</b>	<b>0,24</b>	<b>8,5</b>	<b>6,7</b>	<b>83,6</b>	<b>187</b>	<b>13</b>	<b>60</b>	<b>122</b>	<b>5</b>
	D.E.	0,4	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	0,6	0,9	0,9	11	2	7	30	0
% C.V.	11	9	14	21	8	7	8	13	1	6	14	12	25	5	

SCa= Saturación de calcio; SMg= saturación de magnesio; SK= saturación de potasio; D.E.= Desviación estándar; % C.V.= Coeficiente de variación

Letras diferentes muestran diferencias a una probabilidad de  $p < 0,05$ , LSD.

La inmediata modificación en los contenidos de N foliar, ocasionado por las fuentes, no mantuvo un efecto residual hasta cosecha. Los valores obtenidos tienden a ser bajos para un cultivo de arroz en inicio de primordio floral. Lo anterior supone que de haberse efectuado una segunda aplicación de las fuentes, se pudo haber tenido un efecto más claro en la concentración de N, además de evitar tener niveles medios-bajos en la planta.

En el muestreo final la mayoría de nutrientes mostraron efectos significativos por la fuente, entre ellos están P, Ca, S, Fe, Cu, Zn, Mn y B, nuevamente a pesar de no encontrar un cambio en K y Mg en la planta, el cambio en el valor de Ca modificó la SMg y SK (Cuadro 12). De cualquier manera debe tenerse en consideración las variaciones por análisis de laboratorio sugeridas por Corrales *et al.* (2005) para tejidos vegetales (5-10% para elementos mayores y 10-15% para elementos menores). Por lo que la importancia de estas diferencias en muchos casos decae en términos prácticos.



Entre los nutrientes que mostraron diferencias significativas, los contenidos de Ca y B nuevamente aumentaron con la aplicación del NCa con respecto a Ur y NA. Esto indica que la planta de arroz ante una dosis de  $159 \text{ kg CaO ha}^{-1}$ , incluida en el NCa, es capaz de aumentar y mantener altos los contenidos de este nutriente. Lo mismo ocurre para el B, ya que al utilizar el NCa como fuente de N incorporó  $2,4 \text{ kg B ha}^{-1}$ .

Los valores de Ca, Mg y K en la planta estuvieron en rangos de suficiencia con las tres fuentes de N. Hubo una variación en la SMg y SK debido a los mayores valores de Ca, con el NCa, así como a menores contenido de K con el uso de Ur. El impacto en la SK a pesar de ser significativo es muy bajo, apenas en el orden del 2% de incremento. Por otro lado el incremento en la SMg fue significativo y además podría ser de importancia para el cultivo.

El único macronutriente que mostró diferencias significativas fue el P, el mayor valor se obtuvo con NA, seguido por NCa y de último Ur. Al revisar la fuente de P aplicada a cada muestra, no se encontró ningún patrón de respuesta que pueda ser explicado por la aplicación inicial de DAP o MAP. Tampoco se encontró ningún tipo de interacción entre las fuentes de P y N aplicadas. En todos los potes la concentración de P foliar fue alta, lo que es resultado de las dosis altas, como ya se mencionó anteriormente, para este cultivo.

Los micronutrientes Fe, Cu, Zn y Mn fueron mejorados con el uso de NA, seguido del NCa y con valores menores la Ur. Lo anterior comprueba los trabajos que han comparado la absorción de cationes con fuentes nítricas contra fuentes amoniacales, pues la urea tuvo menores valores de todos los micronutrientes (Cuadro 12).

La Figura 20 demuestra el efecto que ocasionó la fuente de N utilizada sobre la absorción de bases. Este efecto fue sólo significativo a los 5 dda, y mostró la misma tendencia a los 35 dda. Esto concuerda con encontrado por muchos autores quienes señalan que el uso de fuentes nítricas, usualmente, permite o mejora la absorción de los cationes (Marschner, 1995; Gerendás



y Ratcliffe, 2002; Yara International, 2002; Hageman, 1984; Bejarano, 2002). Esta tendencia también se encontró en la concentración de bases en las raíces (Cuadro 13).

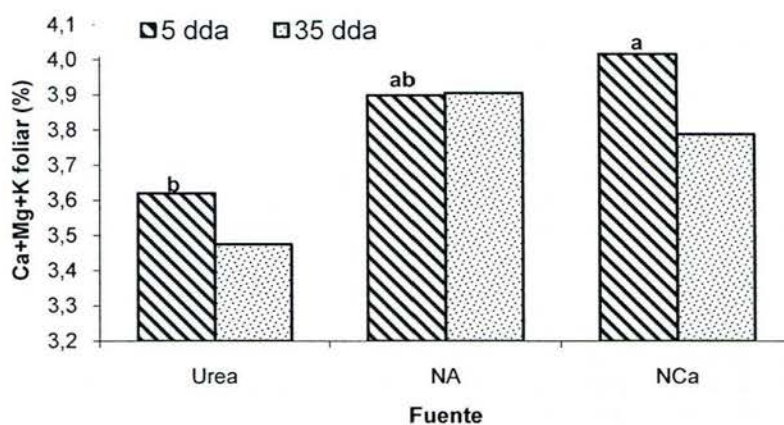


Figura 20. Comparación de absorción de bases por plantas de arroz 5 y 35 dda  $93 \text{ kg N ha}^{-1}$  con nitrato de amonio (NA), nitrato de calcio (NCa) y Urea (Ur), en invernadero.

#### *Variables de crecimiento radical*

Igual que para las variables de crecimiento aéreo se determinó el peso seco radical y contenido químico. En el Cuadro 13 se presenta el promedio, desviación estándar y coeficiente de variación ante las tres fuentes de N evaluadas.

Cuadro 13. Peso seco y análisis de tejido radical a los 55 dde, 35 dda 93 kg de N ha<sup>-1</sup> con nitrato de amonio, nitrato de calcio y Urea, en invernadero.

Fuente	Rep	g							%			mg/kg					
		PS	N	P	Ca	Mg	K	S	SCa	SMg	SK	Fe	Cu	Zn	Mn	B	
Nitrato Amonio	1	2,00	1,56	0,17	0,29	0,25	1,30	0,21	15,8	13,6	70,7	10435	63	112	396	24	
	2	2,50	1,52	0,13	0,28	0,20	0,93	0,18	19,9	14,2	66,0	11159	55	81	306	23	
	3	1,40	2,01	0,15	0,37	0,33	1,29	0,22	18,6	16,6	64,8	10516	64	105	460	24	
	Promedio	<b>1,97</b>	<b>1,70</b>	<b>0,15</b>	<b>0,31</b>	<b>0,26</b>	<b>1,17</b>	<b>0,20</b>	<b>18,1</b>	<b>14,8</b>	<b>67,1</b>	<b>10703</b>	<b>61</b>	<b>99</b>	<b>387</b>	<b>a</b>	<b>24</b>
	D.E.	0,6	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	2,1	1,6	3,1	397	5	16	77	1	
% C.V.	28	16	13	16	25	18	10	12	11	5	4	8	16	20	2		
Nitrato Calcio	1	1,85	1,88	0,17	0,37	0,26	1,37	0,25	18,5	13,0	68,5	10862	60	167	253	28	
	2	2,05	1,74	0,16	0,30	0,22	1,34	0,24	16,1	11,8	72,0	8172	58	116	192	24	
	3	0,85	1,91	0,15	0,34	0,28	1,17	0,22	19,0	15,6	65,4	6062	56	103	194	23	
	Promedio	<b>1,58</b>	<b>1,84</b>	<b>0,16</b>	<b>0,34</b>	<b>0,25</b>	<b>1,29</b>	<b>0,24</b>	<b>17,9</b>	<b>13,5</b>	<b>68,6</b>	<b>8365</b>	<b>58</b>	<b>129</b>	<b>213</b>	<b>b</b>	<b>25</b>
	D.E.	0,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	1,5	2,0	3,3	2406	2	34	35	3	
% C.V.	41	5	6	10	12	8	6	9	14	5	29	3	26	16	11		
Urea	1	2,65	1,29	0,14	0,35	0,20	0,93	0,17	23,6	13,5	62,8	14168	54	71	366	28	
	2	2,35	1,53	0,15	0,29	0,21	1,16	0,22	17,5	12,7	69,9	10215	58	81	234	23	
	3	1,60	1,56	0,15	0,31	0,26	1,26	0,25	16,9	14,2	68,9	10326	60	93	301	23	
	Promedio	<b>2,20</b>	<b>1,46</b>	<b>0,15</b>	<b>0,32</b>	<b>0,22</b>	<b>1,12</b>	<b>0,21</b>	<b>19,4</b>	<b>13,5</b>	<b>67,2</b>	<b>11570</b>	<b>57</b>	<b>82</b>	<b>300</b>	<b>ab</b>	<b>25</b>
	D.E.	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	3,7	0,8	3,8	2251	3	11	66	3	
% C.V.	25	10	4	10	14	15	19	19	6	6	19	5	13	22	12		

PS= peso seco; SCa= Saturación de calcio; SMg= saturación de magnesio; SK= saturación de potasio; D.E.= Desviación estándar; % C.V.= Coeficiente de variación  
Letras diferentes muestran diferencias a una probabilidad de p<0,05, LSD.

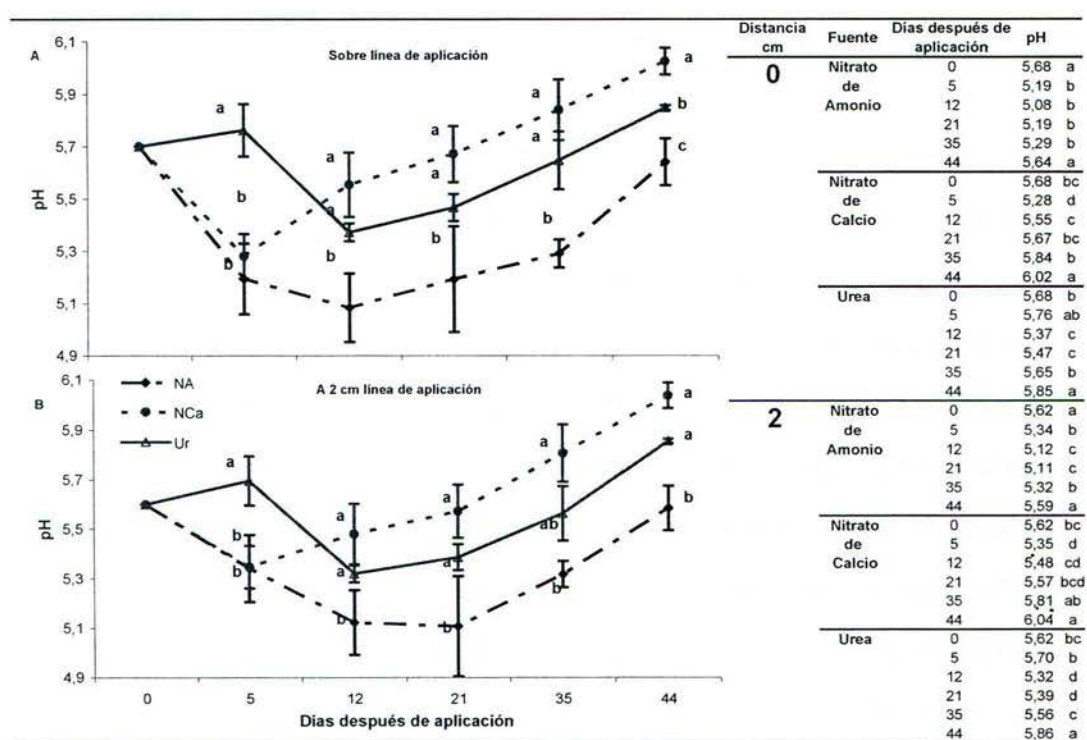
El crecimiento radical de las plantas de arroz no fue afectado ni en peso seco ni en su composición química, al no existir diferencias significativas entre las variables. La única variable que mostró diferencias significativas fue el Mn, sin embargo esto no ocasionó ningún efecto positivo o negativo sobre la producción de raíces (Cuadro 14).

### 3.2.2 Efecto de las fuentes de N en el suelo

#### 3.2.2.1 Efecto sobre el pH del suelo

Para determinar el efecto de las fuentes nitrogenadas sobre el pH del suelo se tomaron muestras a 0 y 2 cm de la banda de fertilización. Además se aprovechó la corta de plantas realizada, al día siguiente de la aplicación de las fuentes nitrogenadas, así como a los 5 y 35 dda para lavar el suelo inmediato a las raíces y valorarlo como representante de la rizosfera de las plantas. Primero se presentarán los datos a 0 y 2 cm de la línea de aplicación de las fuentes (Figura 22) y posteriormente se tratará el efecto en el suelo rizosférico (Figura 23).

En la Figura 21A y 21B, se presenta a la izquierda el promedio del pH del suelo para cada fuente de N mostrando las diferencias significativas entre fuentes para cada día de muestreo, esto a 0 cm y 2 cm de la línea de aplicación, respectivamente. En la tabla de la derecha se presentan las diferencias entre los días de muestreo (5, 12, 21, 35 y 44 dda) para cada fuente, por separado a 0 y 2 cm de la banda de aplicación.



Letras diferentes muestran diferencias a una probabilidad de  $p < 0,05$ , LSD.

**Figura 21.** Variación del pH del suelo, sobre la línea de aplicación, de 0 a 44 dda  $93 \text{ kg de N ha}^{-1}$  con nitrato de amonio (NA), nitrato de calcio (NCa) y Urea (Ur), en invernadero.

El uso de las fuentes nitrogenadas tuvo un claro impacto en el pH del suelo, (Figura 21). Se pueden apreciar tres efectos: 1) en todas las evaluaciones hubo diferencias significativas entre las fuentes. 2) todas las fuentes mostraron variación en el tiempo; y 3) el comportamiento de las fuentes es el mismo tanto sobre la línea de aplicación como a 2 cm de ésta.



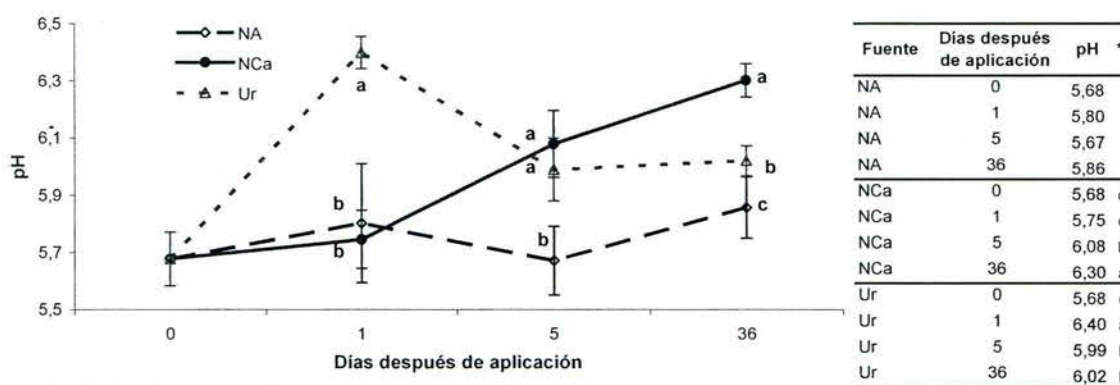
Para los dos sitios de muestreo el comportamiento de cada producto en el tiempo fue similar. Todas las fuentes incluyeron un proceso de acidificación seguido por uno de alcalinización, con valores mínimos y máximos diferentes, definidos por las características de cada producto en el suelo. El NA presentó los valores más bajos, mientras que el NCa los más altos. El aumento de pH que ocasionó el uso del NCa era esperable; Finck (1988) indica que esto ocurre porque las plantas absorben nitrato más fácilmente que el Ca, y se produce  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  por los aniones liberados por las raíces. La principal diferencia en el comportamiento entre las fuentes, radica en que la Ur mantuvo el pH constante en la primera semana, por lo que su efecto se presentó en forma retardada.

Para la Ur se esperaba que ocurrieran dos eventos normalmente reportados en la literatura. 1) un efecto inicial alcalinizante; respecto al cual Creamer y Fox (1980) encontraron un aumento de 2,3 unidades de pH con el uso de  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$ . A pesar de que esto no ocurrió, la Ur tampoco acidificó el suelo (aspecto que se pudo deber, como se verá más adelante, al largo periodo entre aplicación y muestreo). La Ur fue el único fertilizante nitrogenado de los evaluados, que no disminuyó al inicio el pH del suelo. 2) un efecto residual ácido fuerte, que tampoco ocurrió. Dicho evento puede asociarse con la habilidad de plantas como el arroz (C4) para utilizar el amonio (Criddle *et al.*, 1988). Al haber mayor absorción como amonio se disminuye la nitrificación, y por lo tanto la acidez residual producida por el fertilizante. Esta absorción de amonio por las plantas concuerda con el mayor valor de N foliar observado en las plantas que recibieron Ur como fuente de N (Cuadro 11).

En ambos sitios de muestreo el pH final con el NCa llegó a ser 0,38 mayor al inicial; para la Ur 0,20 y para el NA -0,04 (valor sin variación). Esto refuerza el efecto alcalino del NCa, así como una baja acidificación final con el uso de una dosis baja de N.



El efecto de las fuentes nitrogenadas sobre la zona inmediata a las raíces se presente en la Figura 22, en donde se muestran las diferencias entre las fuentes en el gráfico, las diferencias entre los días de evaluación en la tabla de la derecha.



\*= Letras diferentes para cada distancia muestran diferencias a una probabilidad de  $p < 0,05$ , LSD

**Figura 22.** Variación del pH de la rizosfera a 1, 5 y 35 dda 93 kg de N ha<sup>-1</sup> con nitrato de amonio (NA), nitrato de calcio (NCa) y Urea (Ur), en invernadero.

Al observar los datos en rizosfera queda demostrado que los efectos que ocasionan los fertilizantes en el suelo ocurren en tiempos muy cortos y en las zonas muy cercanas a la raíz. En esta zona se encuentran otros dos efectos claros; el primero, es que hay un impacto de las fuentes de N sobre el pH del suelo; y el segundo, es que tanto el NCa como la Ur presentan una variación en su comportamiento durante el tiempo, factor que no ocurre con el NA.

Específicamente, para la Ur, en la rizosfera y a un día de su aplicación, el efecto alcalinizante señalado por Creamer y Fox (1980) se apreció con claridad (Figura 22).

Al comparar los efectos en el suelo tanto a 0 como a 2 cm con el observado en la rizosfera (Figura 21) es importante resaltar, como ejemplo, que el NCa en la zona inmediata a la raíz no tiene la disminución en el pH que se presentó en el suelo a los 5 dda, mientras que a los 35 dda no hubo diferencias en el suelo pero sí las hubo en la vecindad de las raíces. Esto lo que indica es que las reacciones que están ocurriendo ante la aplicación de los fertilizantes en la zona inmediatamente cercana a la raíz puede ser totalmente diferentes a las que ocurren en el suelo

(Glass, 2002; Gerendás y Ratcliffe, 2002). En la rizosfera estarán involucradas todas las reacciones de intercambio de protones ante el ingreso de amonio y de  $\text{OH}^-$  ante la entrada de nitrato (Claassen, 2007a, 2007b; Marschner, 1995).

### **3.2.2.2 Efecto sobre el contenido de nutrientes en el suelo**

En el Cuadró 14, se presenta el promedio para los parámetros de la composición química del suelo, así como la relación de bases en términos de saturación, tanto sobre la banda de aplicación de los fertilizantes y a 2 cm de ella.

Se pueden destacar tres aspectos: 1) las fuentes ocasionan variaciones en la disponibilidad de nutrientes en el suelo; 2) no hay diferencias entre las dos distancias evaluadas; 3) con el transcurrir de los días hubo variaciones en los contenidos (Cuadro 14).

En los tratamientos que recibieron NCa se obtuvieron mayores valores de Ca y K, y menores de Mg. Sólo el Ca presentó inicialmente mayores valores ante la aplicación del NCa, luego de los 21 días los valores disminuyen por debajo del valor inicial del suelo. Esto refleja un efecto temporal de las aplicaciones de este producto que se manifestó en los contenidos foliares (Cuadros 11 y 12). Los otros dos nutrientes también mostraron valores menores a su contenido inicial, lo que puede deberse al efecto de extracción por el cultivo.

Cuadro 14. Análisis de suelo, sobre la línea de aplicación, desde 0 a 44 dda 93 kg de N ha<sup>-1</sup> con nitrato de amonio (NA), nitrato de calcio (NCa) y Urea (Ur).

Día	Fuente	cmol(+)/L						%				mg/Kg				
		pH	K	Ca	Mg	Acidez	CICE	SK	SCa	SMg	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn
<b>Sobre línea de aplicación</b>																
0		5,68	0,74	9,16	3,96	0,19	14,04	5,2	65,2	28,2	1,3	300	22	33	186	132
5	NA	5,19	b 0,45	7,85	c 2,74	b 0,30	a 11,34	b 4,0	69,2	b 24,2	b 2,7	a 255	15	27	206	146
	NCa	5,28	b 0,52	10,03	a 2,30	c 0,20	b 13,04	a 4,0	76,9	a 17,6	c 1,5	b 286	18	30	201	152
	Ur	5,76	a 0,53	8,48	b 3,58	a 0,21	ab 12,80	a 4,1	66,3	c 27,9	a 1,7	b 268	16	27	191	140
12	NA	5,08	b 0,43	b 8,56	b 3,19	a 0,24	a 12,41	b 3,4	b 69,0	b 25,6	a 1,9	a 228	b 17	33	206	a 163
	NCa	5,55	a 0,54	a 10,19	a 2,50	b 0,19	b 13,42	a 4,0	a 75,9	a 18,6	b 1,4	b 273	a 16	30	189	b 151
	Ur	5,37	a 0,48	ab 8,93	b 3,44	a 0,20	b 13,04	ab 3,6	ab 68,6	b 26,3	a 1,5	b 240	ab 16	31	194	ab 157
21	NA	5,19	b 0,42	b 8,43	b 3,05	b 0,25	12,15	b 3,5	b 69,5	b 25,0	a 2,0	a 257	14	27	215	a 155
	NCa	5,67	a 0,54	a 9,73	a 2,56	c 0,21	13,03	a 4,2	a 74,5	a 19,7	b 1,6	b 255	14	25	187	b 143
	Ur	5,47	a 0,47	ab 9,08	ab 3,62	a 0,24	13,41	a 3,5	b 67,7	b 27,0	a 1,8	ab 260	14	30	201	ab 152
35	NA	5,29	c 0,39	b 7,37	b 2,88	a 0,19	10,82	b 3,6	68,1	b 26,6	a 1,7	204	17	31	200	216
	NCa	5,84	a 0,50	a 8,91	a 2,36	b 0,19	11,97	a 4,2	74,5	a 19,7	b 1,6	234	16	27	186	205
	Ur	5,65	b 0,44	ab 7,73	b 2,98	a 0,19	11,34	ab 3,9	68,2	b 26,3	a 1,7	209	16	31	198	228
44	NA	5,64	c 0,42	b 7,51	b 2,73	a 0,19	10,85	b 3,8	b 69,2	b 25,2	a 1,8	127	b 15	28	170	159
	NCa	6,02	a 0,54	a 8,61	a 2,38	b 0,19	11,72	a 4,6	a 73,5	a 20,3	b 1,6	173	a 16	28	159	149
	Ur	5,85	b 0,48	ab 7,64	b 2,84	a 0,19	11,14	ab 4,3	ab 68,5	b 25,5	a 1,7	148	ab 15	29	165	152
<b>A 2 cm de línea de aplicación</b>																
0		5,62	0,77	7,80	2,92	0,17	11,65	6,9	66,6	24,9	1,5	20	15	31	102	135
5	NA	5,34	b 0,59	7,18	b 2,57	0,18	ab 10,52	b 6,0	67,9	b 24,3	a 1,8	29	15	32	a 123	146
	NCa	5,35	b 0,61	8,84	a 2,71	0,15	b 12,31	a 4,9	71,8	a 22,0	b 1,2	31	17	27	a 118	155
	Ur	5,70	a 0,60	8,14	ab 3,02	0,20	a 11,95	ab 5,0	68,1	b 25,2	a 1,7	36	11	23	a 114	145
12	NA	5,12	b 0,54	b 7,30	b 2,67	0,16	10,66	b 5,6	68,0	b 24,8	a 1,6	29	17	37	a 137	a 159
	NCa	5,48	a 0,64	a 9,34	a 2,75	0,15	12,88	a 5,0	72,5	a 21,4	b 1,1	32	17	33	a 117	b 157
	Ur	5,32	ab 0,55	b 8,38	ab 3,30	0,16	12,39	ab 4,4	67,7	b 26,6	a 1,3	30	14	33	a 128	ab 163
21	NA	5,11	b 0,52	b 7,46	2,52	0,21	10,71	5,7	68,7	23,5	ab 2,1	72	12	27	a 156	a 155
	NCa	5,57	a 0,63	a 9,06	2,69	0,19	12,57	5,0	72,1	21,4	b 1,5	32	13	26	a 120	b 141
	Ur	5,39	ab 0,54	ab 8,33	3,09	0,20	12,15	4,4	68,6	25,3	a 1,7	27	11	28	a 130	b 146
35	NA	5,32	b 0,48	b 6,02	b 2,70	0,16	9,36	b 5,4	63,3	29,4	a 1,9	60	16	34	a 150	a 193
	NCa	5,81	a 0,62	a 7,98	a 2,65	0,15	11,40	a 5,4	70,0	23,2	b 1,3	25	15	29	a 109	b 161
	Ur	5,56	ab 0,50	b 7,47	a 2,93	0,17	11,07	a 4,5	67,5	26,5	ab 1,5	35	15	34	a 131	ab 200
44	NA	5,59	c 0,45	b 6,79	b 2,50	0,16	ab 9,90	4,9	68,3	b 25,0	a 1,7	a 23	12	27	a 131	a 158
	NCa	6,04	a 0,59	a 8,32	a 2,60	0,19	a 11,70	5,1	71,1	a 22,2	b 1,6	ab 25	15	27	a 107	b 149
	Ur	5,86	b 0,49	b 7,69	ab 2,87	0,14	b 11,19	4,4	68,7	b 25,6	a 1,3	b 22	12	27	a 117	b 158

CICE: Capacidad de intercambio catiónico efectiva; SK: Saturación de potasio; SCa: saturación de calcio; SMg: saturación de magnesio; SA: saturación de acidez

Letras diferentes muestran diferencias a una probabilidad de  $p < 0,05$ , LSD.

Los cambios mencionados anteriormente ocasionaron diferencias significativas en la saturación de K, Ca, Mg y acidez, a pesar de que éste último parámetro no fue afectado de manera importante por las fuentes (Cuadro 14).

El contenido de los micronutrientes no fue afectado de forma importante por las fuentes nitrogenadas; en algunos muestreos el Mn y el Fe fueron mayores en las parcelas donde se aplicó el NA, efecto que puede estar relacionado a los menores valores de pH que tenían estas parcelas (Cuadro 14).



## 4. CONCLUSIONES

### 4.1 GENERALES

El efecto de los fertilizantes fosforados sobre el pH del suelo es de mayor magnitud, menor duración y proximidad que el de los fertilizantes nitrogenados.

Las aplicaciones de diferentes fuentes de fertilizante pueden causar grandes cambios químicos en el suelo, de duración y extensión variable que son difíciles de generalizar bajo las metodologías de muestreo utilizadas.

Ante aplicaciones de fuentes fertilizantes el área rizosférica sufre cambios más fuertes en tiempos más cortos y de características diferentes al compararlos con los del "suelo".

Para detectar efectos de fuentes sobre el pH de los suelos es importante utilizar condiciones más controladas, intervalos más cortos y sitios de muestreo más cercanos al lugar de aplicación.

Bajo condiciones controladas de laboratorio, sin lixiviación ni planta los efectos son más claros, mientras que ante condiciones de invernadero los efectos fluctúan.

La interpretación de los resultados de análisis de suelos y foliares mediante el uso de los porcentajes de saturación de bases, constituye una alternativa que permite detectar cambios de menores magnitudes en las bases.

## 4.2 FUENTES FOSFORADAS

### SOBRE EL pH DEL SUELO

Los efectos alcalinizante del DAP y acidificante del MAP que ocurren en los 5 días posteriores a la aplicación, se confirmaron mediante la medición de pH en: la disolución de las fuentes en agua; en el suelo en bandejas de laboratorio; y sobre la línea de aplicación en cultivo en invernadero.

Bajo condiciones controladas de laboratorio los efectos de las fuentes de P se mantuvieron hasta por 18 días. Las aplicaciones de DAP aumentaron el pH en 0,8 unidades mientras que las de MAP lo disminuyeron en 0,4 unidades.

Bajo condiciones de invernadero el proceso de acidificación ocasionado por el componente amoniacal de las fuentes de P queda claramente establecido a partir de los 12 dda, y fue mayor con el DAP por su mayor aporte de N.

Para las fuentes fosforadas el incremento en la dosis representó un aumento en la magnitud del efecto.

### SOBRE DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES

La aplicación de las dos fuentes de P estudiadas ocasionó un fuerte incremento en la disponibilidad de este nutriente sobre la línea de aplicación, que no se repite a tan sólo 2 cm de dicha línea. Este efecto se mantuvo incluso hasta los 75 días después de aplicar las fuentes de P.

El aumento de la dosis de las dos fuentes de P magnifica la disponibilidad sobre la línea de aplicación, y ocasiona un leve incremento a los 2 cm. Y permite observar claramente la disminución en la disponibilidad de Ca por la precipitación de fosfatos de Ca.

La aplicación de las fuentes de P incidió sobre el contenido de bases, más claramente sobre los porcentajes de saturación de cada una de ellas.

Bajo condiciones controladas las interacciones entre las bases y el P son más acentuadas.

Los contenidos de amonio en el suelo son mayores a los de nitrato. Para el amonio, la fuente con más aporte de N, la mayor dosis y sobre la línea de aplicación se obtuvieron mayores valores, mientras que el nitrato no varió con la dosis, fuente y sitio de muestreo.

## **SOBRE COMPORTAMIENTO DE UNA PLANTA INDICADORA**

La germinación y el crecimiento de la planta de arroz no fueron afectados por las fuentes de P aplicadas en invernadero.

La concentración de P mostró altos niveles tanto a nivel foliar como radical, sin importar la fuente utilizada.

Las plantas que recibieron DAP como fuente de P mostraron mayores valores de N, debido al mayor aporte de este nutriente que se produce con esta fuente.

## **4.3 FUENTES NITROGENADAS**

### **SOBRE EL pH DEL SUELO**

Las fuentes nitrogenadas variaron el pH del suelo en forma significativa tanto sobre la línea de aplicación como a 2 cm de ella, lo que demuestra la movilidad de las fuentes de N.

Las tendencias de los tres productos fue la misma, causando una disminución inicial del pH seguida por una alcalinización.

El nitrato de amonio presentó el menor valor de pH final, mientras que el nitrato de Ca el mayor.

Las únicas combinaciones de fertilizantes fosforados + nitrogenados que mantuvieron el pH en el largo plazo fueron las que tuvieron nitrato de Ca como fuente de nitrógeno.

El impacto de las fuentes de N sobre el pH de la rizosfera es mayor que en el suelo. La urea mostró un incremento inicial de 0,6 unidades en la rizosfera que no fue posible detectar en el suelo sobre la línea de aplicación en las fechas evaluadas.

En el área rizosférica el nitrato de calcio no mostró una disminución en el pH, como ocurrió en la parte más externa del suelo.

### **SOBRE DISPONIBILIDAD DE NUTRIENTES**

El uso del nitrato de Ca como fuente de N ocasionó un incremento en la disponibilidad de Ca que perduró hasta cerca de los 35 días después de la aplicación.



Los cambios causados por el nitrato de Ca sobre las bases ocasionaron un cambio en los porcentajes de saturación de bases.

## **SOBRE COMPORTAMIENTO DE UNA PLANTA INDICADORA**

El crecimiento de la planta de arroz tampoco fue afectado por las fuentes de N aplicadas en invernadero.

El uso de urea ocasionó un incremento de N inmediatamente después de la aplicación, efecto que no se mantuvo hacia el final del experimento.

El uso del nitrato de calcio incrementó los contenidos de Ca y B en forma sostenida, ya que son constituyentes de la fuente y no fueron compensados en las otras fuentes.

El cambio en los contenidos de Ca en las plantas que recibieron el nitrato de calcio ocasionó una variación en los porcentajes de saturación de bases.

**LITERATURA CITADA**

ADAMS F, MARTIN J. 1984. Living effects on nitrogen use and efficiency. In: Roland Hauck, ed. Nitrogen in crop production. American Society of Agronomy, Inc. pp 417-426.

ALCANTAR, G; TREJO-TELLEZ, L. 2007. Nutrición de cultivos. Primera edición. Mundi-Prensa, México. 454p.

BARROW, N. J. 1980. Evaluation and utilization of residual phosphorus in soils. In E. Khasawneh, E. Sample y E Kamprath, ed. The role of phosphorus in agriculture. American Society of Agronomy, Inc. pp 333-359.

BEEGLE, D. 2007. Agronomy Facts 6: Comparing fertilizer materials. Department of crop and soil sciences. The Pennsylvania State University. Pennsylvania, USA.

BEJARANO J. 2002. Efecto de la proporción de N nítrico y amoniacal, sobre el desarrollo y producción de melón. In: Carlos Rodríguez, ed. Informe de investigación Productos Especiales Del Monte, temporada: 2001-2002. Datos privados sin publicar.

BERTSCH, F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. Asociación costarricense de la ciencia del suelo. San José, Costa Rica. 157p.

BERTSCH, F; ALVARADO, A; HENRIQUEZ, C; MATA, R. Properties, geographic distribution, and management of major soil orders of Costa Rica. In Charles Hall, Carlos Leon Perez y Gregoire Leclerc, ed. Quantifying sustainable development the future of tropical economies. Academic Press. pp 265-294.

BLACK, C. 1993. Soil fertility evaluation and control. Lewis Publishers. Florida, USA. 746p.

BLACKMER, A. M. 2000. Bioavailability of major essential nutrients: Bioavailability of nitrogen. In Malcolm E. Summer, ed. Handbook of soil science. CRC Press. pp D3-D18.

BLAMEY, F. P; OSTATEK-BOCZYNSKI, Z; KERVEN, G. L. 1997. Ligand effect on aluminium sorption by calcium pectate. Plant and Soil 192: 269-275.

BLOOM, P. R. 2000. Soil pH and pH buffering. In: Malcolm E. Summer, ed. Handbook of soil science. CRC Press. pp B333-B352

CABRERA, M, L; VAIO, N; KISSEL, D. E; REMA, J. A; NEWSOME, J. F; CALVERT II, V. H. 2008. Ammonia volatilization from urea-based fertilizers applied to tall fescue pastures in Georgia, USA. Soil Science Society American Journal. 72:1665-1671.

CHIEN, S. H; GEARHART, M. M; COLLAMER, D. J. 2008. Acidez generada por los fertilizantes nitrogenados: nueva evaluación de los requerimientos de cal. Informaciones agrónomicas 41: 16-17. Para mayor información [www.ipni.net/lasc](http://www.ipni.net/lasc)

CLAASSEN, N. 2007a. La rizosfera en la nutrición de plantas. En memorias: V Congreso nacional de suelos: el suelo soporte de vida. Heredia del 29 al 31 de agosto.

CLAASSEN, N. 2007b. La rizosfera en sus consecuencias para la práctica agronómica. En memorias: V Congreso nacional de suelos: el suelo soporte de vida. Heredia del 29 al 31 de agosto.

CLARK, R. B; BALIGAR, V. C. 2000. Acidic and alkaline soil constraints on plant mineral nutrition. In: Robert E. Wilkinson, ed. Plant-Environment interactions. Second edition. Marcel Dekker, Inc. New York. pp 133- 177.

CONARROZ. 2009. Informe estadístico periodo 2008/2009. Unidad de inteligencia de mercados. [www.conarroz.com](http://www.conarroz.com)

CORRALES, M; BERTSCH, F; BEJARANO, J. A. 2005. Los laboratorios de análisis de suelos y foliares en Costa Rica: Informe del comité de laboratorios de análisis, suelos y aguas. *Agronomía Costarricense* 29 (3): 125-135.

CREAMER, F. L; FOX, R. H. 1980. The toxicity of banded urea or diammonium phosphate to corn as influenced by soil temperature, moisture and pH. *Soil Science Society American Journal*. 44:296-300.

CRIDDLE, R. S; WARD, M. R; HUFFAKER, R. C. 1988. Nitrogen uptake by wheat seedlings, interactive effects of four nitrogen sources:  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , and Urea. *Plant Physiology* 86, 166-175.

DOWLING, C. W. 2001. Comparing effects of TSP, MAP and DAP applied on bands on some key soil chemical properties in a black Vertisol. *Proceedings of the Australian Agronomy Conference*, Australian Society of Agronomy.

DUNCAN, R. R. 2000. Plant tolerance to acid soil constraints: Genetic resources, breeding methodology and plant improvement. In: Robert E. Wilkinson, ed. Plant-Environment interactions. Second edition. Marcel Dekker, Inc. New York. pp 1- 38.



EGHBALL, B; SANDER, D. H. 1990. Distance and distribution effects of phosphorus fertilizer on corn. *Soil Science Society American Journal* 53:282-287.

EGHBALL, B; SANDER, D. H; SKOPP, J. 1989. Diffusion, adsorption and predicted longevity of banded phosphorus fertilizer in three soils. *Soil Science Society American Journal* 54:1161-1165.

ENGELSTAD, O; TERMAN, G. 1980. Agronomic effectiveness of phosphate fertilizers. In E. Khasawneh, E. Sample y E Kamprath, ed. *The role of phosphorus in agriculture*. American Society of Agronomy, Inc. pp 311-332.

FASSBENDER, H; BORNEMISZA, E. 1994. *Química de suelos con énfasis en suelos de America Latina*. Edit. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica. 400p

FINCK, A. 1988. *Fertilizantes y fertilización*. Editorial Reverté, S.A. España. 411p.

FIXEN, P. 1989. Agronomic evaluations of MAP and DAP. Potash and phosphate institute. Prepared for the 1989 North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference, St Louis, MO. 22p.

FMB Consultants Ltd. 2007a. FMB Weekly fertilizer report 4 January 2007. 20p.

FMB Consultants Ltd. 2007b. FMB Weekly fertilizer report 13 December 2007. 20p.

FMB Consultants Ltd. 2009. FMB Weekly fertilizer report 24 September 2009.

GERENDAS, J; RATCLIFFE, R. G. 2002. Root pH regulation. In: Waisel Yoav, Eshel Amram and Kafkafi Uzi, ed. *Plant roots: the hidden half*. Third edition. Marcel Dekker, Inc. pp 553-570

GLASS, D. M. 2002. Nutrient absorption by plant roots: regulation of uptake to match plant demand. In: Waisel Yoav, Eshel Amram and Kafkafi Uzi, ed. Plant roots: the hidden half. Third edition. Marcel Dekker, Inc. pp 571-586

GUERRERO, R. 1981. Características físico-químicas de los fertilizantes. Monomeros, colombo venezolanos S.A. Bogota, Colombia. 46 p.

HAGEMAN, R. 1984. Ammonium versus nitrate nutrition of higher plants. In: Roland Hauck, ed. Nitrogen in crop production. American Society of Agronomy, Inc. pp 67-85.

HAMMOND, J. P; BROADLEY, M. R; WHITE, P. J. 2004. Genetic responses of phosphorus deficiency. *Annals of Botany*, 94: 323-332.

HENRIQUEZ, C. 2005. Sorción y desorción de fósforo en un Andisol de Costa Rica dedicado al cultivo de café, caña de azúcar y bosque. *Agronomía Costarricense* 29 (3):97-105.

HENRIQUEZ, C; CABALCETA, G. 1999. Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola. Asociación costarricense de la ciencia del suelo. San José, Costa Rica. pp 84-86.

IFA. 2009. Statistics: Fertilizer supply statistics. In <http://www.fertilizer.org/ifa/Home-Page/STATISTICS/Fertilizer-supply-statistics>.

JAGENDORF, A. T. 1973. The role of phosphate if phtosynthesis. In: Edward Griffith; Alfred Beeton; Jean Spencer y Dee Mitchell, ed. Environmental phosphorus handbook. John Wiley and Sons. New York, USA. 381-392.

JUNGK, A. O. 2002. Dynamics of nutrient movement at the soil-root interface. In: Waisel Yoav, Eshel Amram and Kafkafi Uzi, ed. Plant roots: the hidden half. Third edition. Marcel Dekker, Inc. pp 587-616

KAPULNIK, Y; OKON, Y. 2002. Plant growth promotion by rhizosphere bacteria. In: Waisel Yoav, Eshel Amram and Kafkafi Uzi, ed. Plant roots: the hidden half. Third edition. Marcel Dekker, Inc. pp 869-885.

KASS, D. C. 1996. Fertilidad de suelos. Editorial UNED. San José, Costa Rica. 233 p.

KENNEDY, A. C. 1999. The rizosphere and Spermosphere. In David Sylvia; Jeffry Fuhrmann; Peter Hatal y David Zuberer, ed. Principles and applications of soil microbiology. Prentice Hall, Inc. New Jersey. pp 389-407.

KINRAIDE, T. B. 1991. Identity of the rhizotoxic aluminium species. In Robert Wright, V. Baligar y R. Paul Murrmann, ed. Plant-soil interactions at low pH. Kluwer Academic Publishers. pp 717-728.

KINSEY, N. 1993. Hands-on Agronomy. Acres, USA. Metairie, Lousiana. pp 352.

KIRKBY, E. A; ARMSTRONG, M. J. 1980. Nitrate uptake by roots as regulated by nitrate assimilation in the shoot of castor oil plants. *Plant Physiology* 65, 286-290.

KISSEL, D. E; SANDER, D. H.; ELLIS, R. 1985. Fertilizer-Plant interactions in alkaline soils. In O. P. Engelstad, ed. Fertilizer technology and use. Soil Science of America, Inc. Wisconsin, USA. pp 153-196.

KLEINMAN, P. J; SHARPLEY, A. N; MOYER, B. G; ELWINGER, G. F. 2002. Effect of mineral and manure phosphorus sources on runoff phosphorus. *Journal of Environmental Quality*, 31:2026-2033.

KOOPMANS, G. F; CHARDON, W. J; WILLIGEN, P; RIEMSDIJK, W. H. 2004. Phosphorus desorption dynamics in soil and the link to a dynamic concept of bioavailability. *Journal Environment Quality* 33:1393-1402.

KOTTKE, I. 2002. Mycorrhizae-rhizosphere determinants of plant communities. In: Waisel Yoav, Eshel Amram and Kafkafi Uzi, ed. *Plant roots: the hidden half*. Third edition. Marcel Dekker, Inc. pp 919-932.

LEA, P. J. 1997. Primary nitrogen metabolism. In: Dey P. M. and Harborne J. B., ed. *Plant biochemistry*. Academic Press, London. pp 273-313.

LOMBI, E; MCLAUGHLIN, M. J; JOHNSTON, C; ARMSTRONG, R. D; HOLLOWAY, R. E. 2004. Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in a calcareous soil. *Soil Science Society American Journal*. 68:682-689.

LOPEZ, M. A; GONZALEZ, M. A. 1987. Efecto de dos fuentes de calcio sobre la fertilidad de tres suelos ácidos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 11 (1): 1-15.

MARSCHNER, H. 1991. Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. In Robert Wright, V. Baligar y R. Paul Murrmann, ed. *Plant-soil interactions at low pH*. Kluwer Academic Publishers. pp 683-702.

MARSCHNER, H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. Academic Press. London. 860 p.



MASCLAUX-DAUBRESSE, C; REISDORF-CREN, M; ORSEL, M. 2008. Leaf nitrogen remobilisation for plant development and grain filling. *Plant biology*, 10 (Suppl. 1):23-36.

MATSUMOTO, H. 2002. Plant roots under aluminum stress: toxicity and tolerance. In: Waisel Yoav, Eshel Amram and Kafkafi Uzi, ed. *Plant roots: the hidden half*. Third edition. Marcel Dekker, Inc. pp 821-838

MENGEL, K. 1996. Turnover of organic nitrogen in soils and its availability to crops. *Plant and soil*. 181:83-93.

MENGEL, D; REHM, G. 2000. Fundamentals of fertilizer application. In: Malcolm E. Summer, ed. *Handbook of soil science*. CRC Press. pp D155-D174.

MOLINA, E. 1998. Encalado para la corrección de la acidez del suelo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 45p.

MOODY, P. W; EDWARDS, D. G; BELL, L. C. 1995. Effect of banded fertilizers on soil solution composition and short-term root growth. II: Mono- and Di-ammonium phosphates. *Australian Journal of soil Research* 33: 689-707.

MULLINS, G. L; SIKORA, F. J. 1995. Effect of soil pH on the requirement for water-soluble phosphorus in triple superphosphate fertilizers. *Fertilizer research*, 40:207-214.

NEUMANN, G; ROMHELD, V. 2002. Root-induced changes in the availability of nutrients in the rizosphere. In: Waisel Yoav, Eshel Amram and Kafkafi Uzi, ed. *Plant roots: the hidden half*. Third edition. Marcel Dekker, Inc. pp 617-649.

PHILLIPS, R. P; FAHEY, T. J. 2008. The influence of soil fertility on rhizosphere effects in northern hardwood forest soils. *Soil Science Society American Journal*. 72:453-461.

PRASAD, R; POWER, J. 1997. *Soil fertility management for sustainable agriculture*. Lewis Publishers, New York. 347p.

PROCHNOW, L. I; CHIEN, S. H; CARMONA, G; DILLARD, E. F; HENAO, J; AUSTIN, E. R. 2008. Plant availability of phosphorus in four superphosphate fertilizers varying in water-insoluble phosphate compounds. *Soil Science Society American Journal*, 72:462-470.

QUAGGIO, J. 2000. *Acidez e calagem em solos tropicais*. Instituto Agronômico de Campinas. SP, Brasil. 111p.

RAJARAM, S; KOHLI, M. M; LOPEZ-CESATI, J. 1991. Breeding for tolerance to aluminium toxicity in wheat. In Robert Wrigth, V. Baligar y Paul Murrmann, ed. *Plant-Soil interactions at low pH*. Kluwer Academic Publishers. pp 1019-1028.

REDDY, G. B; REINERT, R. A; EASON, G. 1991. Effect of acid rain and ozone on soil and secondary needle nutrients of loblolly pine. In Robert Wrigth, V. Baligar y Paul Murrmann, ed. *Plant-Soil interactions at low pH*. Kluwer Academic Publishers. pp 139-145.

REHM, G; SCHMITT, M; LAMB, J; RANDALL, G; BUSMAN, L. 2002. Understanding phosphorus fertilizers. College of agriculture, Food, and Environmental Sciences. In: <http://www.extension.umn.edu/distribution/cropsystems/DC6288.html>

RENGEL, Z. 2003. Preface. In: Zdenko Rengel, ed. *Handbook of soil acidity*. Marcel Dekker, Inc. p iii.

SAMPLE, E; SOPER, R. RACZ, G. 1980. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In E. Khasawneh, E, Sample y E Kamprath, ed. The role of phosphorus in agriculture. American Society of Agronomy, Inc. pp 263-310.

SCHACHTMAN, D. P; REID, R. J; AYLING, S. M. 1998. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. *Plant physiology* 116: 447-453.

SHARPLEY, A. 2000. Bioavailability of major essential nutrients: Phosphorus Availability. In Malcolm E. Summer, ed. *Handbook of soil science*. CRC Press. pp D18-D38.

SHUMAN, L. M. 2000. Mineral nutrition. In: Robert E. Wilkinson, ed. *Plant-Environment interactions*. Second edition. Marcel Dekker, Inc. New York. pp 65-109.

SUMNER, M; NOBLE, A. 2003. Soil Acidification: The World Story. In: Zdenko Rengel, ed. *Handbook of soil acidity*. Marcel Dekker, Inc. pp 1-28.

TANG C, RENGEL Z. 2003. Role of plant cation/anion uptake ratio in soil acidification. In: Zdenko Rengel, ed. *Handbook of soil acidity*. Marcel Dekker, Inc. pp 57-81.

TEUSCHER, H; ADLER, R. 1984. *El suelo y su fertilidad*. Compañía editorial continental, S.A. Mexico. 510p.

THE MARKET. 2007. Fertilizer news and analysis from ICIS. Vol 10, No 45: 13 December, 2007.

TISDALE, S, NELSON. W, BEATON. J. 1985. *Soil fertility and fertilizers*. Macmillan publishing company. New York, New York. Fourth edition. 732 p.

VALENCIA, G. 1998. Manual de nutrición y fertilización del café. Instituto de la Potasa y el P (INPOFOS). Quito, Ecuador. 60p.

VAN BEUSICHEM, M. L; KIRKBY, E; BAAS, R. 1998. Influence of nitrate and ammonium nutrition on the uptake, assimilation, and distribution of nutrients in *Ricinus communis*. Plant Physiology 86, 914-921.

YARA INTERNATIONAL. 2002. Datos sin publicar, experimentos en invernadero, Hanninghof. Presentados en YARA Latin America Seminar, Nov 27-30, 2006. Cartagena, Colombia.

YOUNG, R. D; WETFALL, D. G; COLLIVER, G. W. 1985. Productoin, marketing and use of phosphorus fertilizers. In O. P. Engelstad, ed. Fertilizer technology and use. Soil Science of America, Inc. Wisconsin, USA. pp 323-376.

ZAPATA, R. 2004. Química de la acidez del suelo. Cargraphics, Impresión Digital. Cali, Colombia. 198p.