

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EFFECTO DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN EL pH Y EN ALUMINIO  
INTERCAMBIABLE DEL SUELO EN PLANTACIONES DE EUCALIPTUS

por

Karen NOBLE

TESIS presentada como uno de  
los requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2008

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PAGINA DE APROBACION.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
1. <u>INTRODUCCION</u> .....	1
2. <u>REVISION BIBLIOGRAFICA</u> .....	3
2.1 <u>INTRODUCCION</u> .....	3
2.2.1 <u>Factores que afectan la nitrificación</u> .....	3
2.2 <u>CAMBIOS EN LA CONCENTRACIÓN DE NITRATO Y AMONIO POR EL AGREGADO DE NITROGENO</u> .....	4
2.2.1 <u>Experimentos de laboratorio</u> .....	4
2.2.2 <u>Experimentos de campo</u> .....	4
2.3 <u>VARIACIONES EN ACIDEZ DE LOS SUELOS POR EL AGREGADO DE NITROGENO</u> .....	4
2.3.1 <u>Cambios en el pH</u> .....	5
2.3.1.1 <u>Experimentos de laboratorio</u> .....	6
2.3.1.2 <u>Experimentos de campo</u> .....	7
2.3.2 <u>Cambios en la concentración de aluminio intercambiable y en la acidez intercambiable del suelo</u> .....	11
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	14
3.1 <u>LUGAR EXPERIMENTAL</u> .....	15
3.2 <u>INFORMACION DE SUELOS</u> .....	14
3.3 <u>MUESTREO DE SUELOS DE ENSAYOS PREVIAMENTE FERTILIZADOS</u> .....	15
3.4 <u>MUESTREO DE SUELOS PARA ENSAYOS DE INCUBACION</u> .....	15
3.5 <u>PROCEDIMIENTO PARA EL AJUSTE DE LA HUMEDAD A CAPACIDAD DE CAMPO</u> .....	15
3.6 <u>MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS EN LA INCUBACIÓN</u> .....	17
3.7 <u>CALCULO DE LO DOSIS POR BANDEJA Y PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE FERTILIZANTE</u> .....	17
3.8 <u>DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO</u> ...	18
3.9 <u>MEDICIONES Y ANÁLISIS QUÍMICO</u> .....	19

4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	21
4.1 SITIO 1.....	21
4.1.1 <u>Ensayo de incubación</u> .....	21
4.1.1.1 Variaciones en la concentración de N mineral con la dosis de N agregada.....	21
4.1.1.2 Variaciones en las formas de acidez del suelo....	22
4.1.2 <u>Ensayo de campo</u> .....	23
4.2 SITIO 2.....	25
4.2.1 <u>Ensayo de incubación</u> .....	25
4.2.1.1 Variaciones en la concentración de N mineral con la dosis de N agregada.....	25
4.2.1.2 Variaciones en las formas de acidez del suelo....	26
4.2.2 <u>Ensayo de campo</u> .....	27
4.3 SITIO 4.....	29
4.3.1 <u>Ensayo de incubación</u> .....	29
4.3.1.1 Variaciones en la concentración de N mineral con la dosis de N agregada.....	29
4.3.1.2 Variaciones en las formas de acidez del suelo....	29
4.3.2 <u>Ensayo de campo</u> .....	31
4.4 SITIO 6.....	32
4.4.1 <u>Ensayo de incubación</u> .....	32
4.4.1.1 Variaciones en la concentración de N mineral con la dosis de N agregada .....	32
4.4.1.2 Variaciones en las formas de acidez del suelo....	33
4.5 SITIO 8.....	35
4.5.1 <u>Ensayo de incubación</u> .....	35
4.5.1.1 Variaciones en la concentración de N mineral con la dosis de N agregada.....	35
4.5.1.2 Variaciones en las formas de acidez del suelo....	35
4.6 SITIO 5.....	37
4.6.1 <u>Ensayo de incubación</u> .....	37
4.6.1.1 Variaciones en la concentración de N mineral con la dosis de N agregada.....	37
4.6.1.2 Variaciones en las formas de acidez del suelo....	37
4.7 SITIO 9.....	39
4.7.1 <u>Ensayo de incubación</u> .....	39
4.7.1.1 Variaciones en la concentración de N mineral con la dosis de N agregada.....	39
4.6.1.2 Variaciones en las formas de acidez del suelo....	40
4.8 COMPARACION DE SITIOS.....	42
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	49

6. <u>RESUMEN</u> .....	51
7. <u>SUMMARY</u> .....	52
8. <u>BIBLIOGRAFIA</u> .....	53
9. <u>APENDICE</u> .....	56

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Ubicación y caracterización de los sitios estudiados.....	14
2. Datos analíticos de los suelos de los sitios experimentales.....	15
3. Porcentaje de humedad de los suelos y cantidad de agua Necesaria para llevar los mismos a capacidad de campo.....	16
4. Concentración de las soluciones de N utilizadas para fertilizar Las bandejas y cantidad de nitrógeno agregada por dosis.....	18
5. Concentraciones promedio de NH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , Ac Int, H Int y pH del sitio 1 para distintas dosis de N en el laboratorio.....	23
6. Concentraciones promedio de Ac Int, H Int y pH del sitio 1 para distintas dosis de N en el campo.....	25
7. Concentraciones promedio de NH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , Ac Int, H Int y pH del sitio 2 para distintas dosis de N en el laboratorio.....	27
8. Concentraciones promedio de Ac Int, H Int y pH del sitio 2 para distintas dosis de N en el campo.....	28
9. Concentraciones promedio de NH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , Ac Int, H Int y pH del sitio 4 para distintas dosis de N en el laboratorio.....	30
10. Concentraciones promedio de Ac Int, H Int y pH del sitio 4 para distintas dosis de N en el campo.....	32
11. Concentraciones promedio de NH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , Ac Int, H Int y pH del sitio 6 para distintas dosis de N en el laboratorio.....	34
12. Concentraciones promedio de NH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , Ac Int, H Int y pH del sitio 8 para distintas dosis de N en el laboratorio.....	36
13. Concentraciones promedio de NH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , Ac Int, H Int y pH del sitio 5 para distintas dosis de N en el laboratorio.....	39

14. Concentraciones promedio de NH <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , Ac Int, H Int y pH del sitio 9 para distintas dosis de N en el laboratorio.....	41
15. Correlaciones entre variables estudiadas.....	43
16. Análisis de Varianza de la regresión, y significación estadística de los parámetros del modelo hallado para predecir los cambios de pH por la fertilización .....	44
17. Características de los dos grupos de suelos identificados.....	45
18. Análisis de Varianza de la regresión, y significación estadística de los parámetros del modelo hallado para predecir los cambios de Al por la fertilización.....	46
Figura No.	
1. Concentración de formas minerales de N en el sitio 1.....	21
2. Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de laboratorio, para el sitio 1.....	22
3. Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de campo, para el sitio 1.....	24
4. Concentración de formas minerales de N en el sitio 2.....	26
5. Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de laboratorio, para el sitio 2.....	27
6. Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de campo, para el sitio 2.....	28
7. Concentración de formas minerales de N en el sitio 4.....	29
8. Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de laboratorio, para el sitio 4.....	30
9. Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de campo, para el sitio 4.....	31
10. Concentración de formas minerales de N en el sitio 6.....	33

11. Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de laboratorio, para el sitio 6.....	34
12. Concentración de formas minerales de N en el sitio 8.....	35
13. Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de laboratorio, para el sitio 8.....	36
14. Concentración de formas minerales de N en el sitio 5.....	37
15. Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de laboratorio, para el sitio 5.....	38
16. Concentración de formas minerales de N en el sitio 9.....	40
17. Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de laboratorio, para el sitio 9.....	41
18. Variación del pH de distintos suelos en función de la concentración de N-NO <sub>3</sub> .....	42
19. Pendiente observada versus pendiente estimada.....	44
20. Variación del Al Int de distintos suelos en función de la concentración de N-NO <sub>3</sub> .....	47
21. Pendiente observada versus pendiente estimada.....	48

## **1 INTRODUCCIÓN**

Como resultado de la actividad humana son particularmente probables las perturbaciones de los agroecosistemas, que pueden afectar la fertilidad y calidad del suelo, así como la calidad de otros recursos naturales.

En el Uruguay el área destinada a la producción forestal se ha incrementado, en los últimos años, existiendo actualmente una superficie forestada con *Eucaliptus* bajo proyecto de alrededor de 714000ha. De por sí este cambio puede ser considerado como una perturbación ya que se pasa en la mayoría de los casos de suelos bajo campo natural a plantaciones de bosque, los que generalmente están integrados por una sola especie. Esto significa que no solo se ve alterado el tapiz vegetal original que cubre el suelo, sino que también se producen cambios importantes en los primeros horizontes del suelo. Esto ocurre en primer lugar debido a la formación de un horizonte orgánico ( $H_o$ ) compuesto por hojas que van cubriendo la superficie y se desintegran paulatinamente, y además entre estos cambios se incluye por ejemplo el ingreso de nutrientes como nitrógeno (N) y fósforo (P), para aumentar la producción de biomasa.

La aplicación de fertilizantes durante los primeros años de plantación, se ha tornado en una práctica de manejo común en la producción forestal, para obtener mayores rendimientos en madera. El N es un macronutriente que, junto con el P comúnmente son factores limitantes en el crecimiento de las plantas. A esto se debe el que sean componentes primarios de muchos fertilizantes. Las dos fuentes de N históricamente más usadas en silvicultura, son la urea y el nitrato de amonio, sobre todo a causa de sus altos contenidos de N.

La aplicación de urea al suelo generalmente resulta en una rápida hidrólisis a amonio (por ureasas del suelo) y como consecuencia, en la conversión de amonio ( $NH_4$ ) a nitrato ( $NO_3$ ). Estas dos formas minerales son además las constituyentes del fertilizante nitrato de amonio ( $NH_4NO_3$ ). Independientemente de su origen, la nitrificación de  $NH_4$  a  $NO_3$  produce acidez en los suelos, y este efecto acidificante es igual para la urea y el  $NH_4NO_3$ .

La mayoría de los suelos utilizados para la producción forestal son naturalmente ácidos, son de poco poder buffer y poseen materia orgánica (MO) relativamente inestable, la que se puede mineralizar rápido y el  $NH_4$  producido ser fuente de acidez. Además los suelos con cubierta forestal se caracterizan por su gran dinamismo en cuanto a los ciclos de nutrientes, produciéndose la formación de ácidos orgánicos a partir de residuos en descomposición, los que también incide en la acidificación derivada de la forestación.

Además de los efectos anteriores, se puede sumar la aplicación de dosis altas de fertilizante nitrogenado en las refertilizaciones post-transplante practicadas actualmente por algunas empresas. Esto puede producir significativas reducciones de pH e incrementos de aluminio intercambiable (Al Int) en los suelos. Al bajar el pH el Al Int pasa a ocupar posiciones de intercambio; cuando se agrega N al suelo el mismo está como  $\text{NO}_3$  y se lava como tal, acentuándose de esta forma la acidez.

Este estudio busca determinar el efecto de la fertilización nitrogenada en el pH y la acidez intercambiable (Ac Int) de suelos ubicados dentro de plantaciones forestales de *Eucalyptus* en Uruguay. Para lograr los objetivos del mismo se llevaron a cabo dos experimentos uno en campo el cual consistió en fertilizar parcelas con diferentes dosis de N y otro en laboratorio donde se utilizaron muestras de suelos procedentes de los mismos sitios pero de zonas donde no se había aplicado nitrógeno.

## **2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 INTRODUCCIÓN**

Según Perdomo y Barbazan (1999), se llama nitrificación al pasaje de  $\text{NH}_4$  a  $\text{NO}_3$ , este proceso es realizado por un grupo reducido de microorganismos autótrofos especializados (Nitrobacterias), que obtienen energía de este proceso oxidativo. El proceso ocurre en dos etapas:

- 1) Pasaje de  $\text{NH}_4$  a  $\text{NO}_2$  donde intervienen bacterias del genero Nitrosomonas.
- 2) El  $\text{NO}_2$  es convertido a  $\text{NO}_3$  por bacterias del genero Nitrobacter.

La segunda transformación es más rápida que la primera, por lo que el  $\text{NO}_3$  es la forma de N mineral que normalmente se acumula en los suelos.

Durante el pasaje de  $\text{NH}_4$  a  $\text{NO}_3$  se liberan  $\text{H}^+$ , por lo que en determinadas condiciones la nitrificación puede acidificar los suelos.

#### **2.1.1. Factores que afectan la nitrificación.**

a) Presencia de oxígeno

Las nitrobacterias son microorganismos aerobios estrictos, por lo que en condiciones anaerobias este proceso se detiene, acumulándose  $\text{NH}_4$ .

b) Temperatura.

El valor óptimo de temperatura para que se produzca la nitrificación es cercano a los  $30^\circ \text{C}$ .

c) pH.

Las nitrobacterias requieren condiciones de pH de los suelos no muy extremas, con un rango óptimo de pH entre 5.5 y 7.5.

d) Concentración de  $\text{NH}_4$

Concentraciones de  $\text{NH}_4$  superiores a  $3000\text{mg N kg suelo}^{-1}$  pueden afectar el pasaje de  $\text{NH}_4$  a  $\text{NO}_2$ , esto puede ocurrir cuando se fertiliza con dosis altas de fertilizantes amoniacales.

e) Fumigación de los suelos.

Cuando se agrega a los suelos herbicidas, fungicidas, pesticidas e insecticidas, los mismos pueden afectar el desarrollo de las bacterias nitrificadoras (Perdomo y Barbazan, 1999).

Varios estudios han determinado que en contraste con lo que ocurre normalmente en suelos agrícolas, en muchos suelos forestales el  $\text{NH}_4$  está presente en concentraciones más altas que  $\text{NO}_3$ . Este resultado es esperado ya que el  $\text{NH}_4$  es considerado como la forma de N mineral predominante en los suelos bajo de eucalipto (Perdomo et al., 2003).

## **2.2 CAMBIOS EN CONCENTRACIÓN DE NITRATO Y AMONIO EN EL EN EL SUELO POR EL AGREGADO DE NITROGENO**

La fertilización nitrogenada produce cambios en la concentración de  $\text{NO}_3$  y de  $\text{NH}_4$  en los suelos. Existen numerosos estudios a cerca de este tema, dentro de los mismos se incluyen experimentos de laboratorio y de campo.

### **2.2.1 Experimentos de laboratorio**

Johnson et al. (1980) realizaron un experimento de laboratorio para determinar el efecto de la aplicación de urea en la nitrificación, mineralización e inmovilización de nitrógeno, en un suelo limoso (Ruptic-Ultic Dystrachrept), con pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 4.5 y 0.42% de carbono orgánico (Corg). Se observó que la mineralización comenzó inmediatamente luego de fertilizar el suelo con dosis equivalente a  $200\text{kg/ha}$  y de colocarlo a incubar en condiciones aerobias, durante 62 días a  $25^\circ$ . El  $\text{NH}_4$  fue la forma predominante de N mineral durante el primer periodo de incubación, pasando a predominar posteriormente el  $\text{NO}_3$  debido a que la nitrificación ocurrió rápidamente. El  $\text{NH}_4$  disminuyó de  $200\text{ppm}$ , 20 días después de la fertilización, a  $10\text{ppm}$  a los 160 días después de la misma.

### **2.2.2 Experimentos de campo**

Little (1997) realizó un experimento para determinar el destino de los fertilizantes nitrogenados agregado a los suelos rojos de Nueva Gales del Sur y su implicancia en la acidez del suelo. Al analizar las muestras de suelo donde previamente se aplicó N, en plantaciones forestales se detectó un aumento considerable de la cantidad de  $\text{NH}_4$  en la superficie del suelo (30cm), posterior a la fertilización. Algunas muestras analizadas en detalle mostraron que al inicio de la fertilización la cantidad de  $\text{NH}_4$  presente fue

equivalente a 362kg/ha, y que alrededor de la mitad del mismo había desaparecido 3 meses después de la fertilización, detectándose posteriormente una alta concentración de  $\text{NO}_3$  (200kg/ha) en la superficie. Estos resultados indicaron que gran parte del fertilizante aplicado fue transformado durante el proceso de nitrificación.

Otros estudios sobre temas similares en plantaciones de *Eucalyptus* en Tasmania indicaron que cuando se realizaron varias aplicaciones de N al suelo la concentración de  $\text{NH}_4$  aumentó luego de la primera aplicación. Una segunda aplicación de fertilizante tuvo el mismo efecto. Los experimentos se realizaron en 3 sitios diferentes Westfield, Nabowla y Middlesex, la cantidad de  $\text{NH}_4$  inicial para los mismos varía entre 0.005 y 0.42mM. Después de la primera aplicación de fertilizante aumentó a 5.5mM, 20.6mM y 7.5mM respectivamente. En cuanto a los cambios en la cantidad de  $\text{NO}_3$ , se observó que previo al agregado de fertilizante la misma estaba entre 0.005 y 8.4mM, y que luego de la fertilización la cantidad de  $\text{NO}_3$  disminuyó en el sitio de Westfield, mientras que para los sitios de Nabowla y Middlesex, aumentó 1.1 y 10.9mM respectivamente (Smethurst et al., 2001).

Chen et al. (2002) realizaron un experimento de campo para investigar el efecto de la fertilización nitrogenada en el pool de N en el suelo y su asociación con las propiedades microbianas del suelo. Los ensayos fueron instalados en una plantación de *Araucaria cunninghamii*, al sur-este de Queensland. Observaron que aplicaciones de 600kg/ha de N aumentaron significativamente la concentración de  $\text{NH}_4$  en la superficie del suelo (0-10cm), así como también la concentración de  $\text{NO}_3$ .

## **2.3 VARIACIONES EN ACIDEZ DE LOS SUELOS POR EL AGREGADO DE NITROGENO**

### **2.3.1 Cambios en el pH**

Los fertilizantes amoniacales generan acidez en el suelo ya que al nitrificarse se libera  $\text{H}^+$ . De acuerdo con la reacción:  $\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$ . Por cada molécula de  $\text{NH}_4$  que se transforma en  $\text{NO}_3$  se producen 2  $\text{H}^+$ . Cuando se agregan al suelo fertilizantes como la urea se genera un residuo ácido, para el cual se distingue, un valor máximo, un valor mínimo y un valor oficial. El valor máximo supone que toda la urea se nitrifica en el suelo. De acuerdo con la reacción:  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + 4\text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+ + \text{CO}_2$ . Por cada mol de urea se producen dos moles de  $\text{NO}_3$  y dos moles de  $\text{H}^+$ . (Bouman et al. 1995, Little 1997, Perdomo y Barbazan 1999).

La magnitud del efecto acidificante de los fertilizantes nitrogenados depende de varios factores, entre ellos se encuentra el tipo de suelo. Los suelos de textura más arenosa tienden a acidificarse más rápido que los suelos arcillosos, debido fundamentalmente a que los primeros tienen menor poder buffer. El poder buffer es además función del contenido de MO y de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo. También influyen el tipo de fertilizante, la dosis, la frecuencia de aplicación y el pH inicial del suelo. En términos generales, los casos de descenso importante del pH se han observado en suelos arenosos, de pH ácido, y cuando se han agregado dosis altas de fertilizantes amoniacales durante muchos años (Perdomo y Barbazan, 1999).

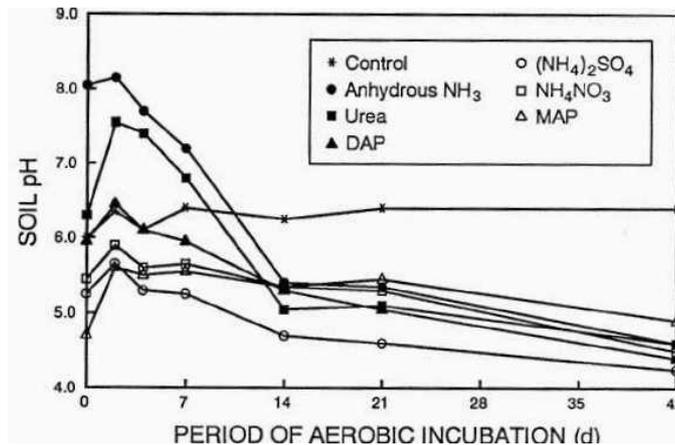
Según Hauch, citado por Garateguá (2002), el pH inicial bajo del suelo enlentece la tasa a la cual el N es nitrificado, probablemente porque solo una parte de la población microbiana tiene la habilidad de adaptarse a un ambiente más ácido. Los factores químicos del suelo responsable de inhibir la nitrificación, muy probablemente son una combinación de la toxicidad del  $H^+$  y aluminio ( $Al^{3+}$ ), juntos con una deficiencia de calcio ( $Ca^{2+}$ ).

La absorción del ion  $NO_3$  por las plantas puede disminuir este efecto acidificante, ya que estas al absorber  $NO_3$  absorben también  $H^+$ , contrabalanceando así las cargas eléctricas (Mengel y Kirby, 2001). Es por esto que el consumo de  $NO_3$  por las plantas está relacionado al aumento de  $OH^-$  en la zona de las raíces, resultando en un efecto neutralizador de la acidez producida por la nitrificación. Si el  $NO_3$  es absorbido durante el ciclo del N los iones  $H^+$  son neutralizados, pero si el  $NO_3$  se pierde por lixiviación los iones  $H^+$  permanecen acidificando el suelo. Generalmente se afirma que los efectos acidificantes importantes aparecen en los suelos donde las cantidades de N agregadas superan la capacidad de absorción de las plantas (Bouman et al., 1995).

### **2.3.1.1 Experimentos de laboratorio**

Mulvaney y Khan (1995) realizaron un experimento para un proyecto referente a los factores que afectan el uso eficiente de los fertilizantes nitrogenados en el suelo de Illinois. El mismo consistió en incubar muestras superficiales de suelo, las cuales eran traídas del campo, tamizadas y almacenadas en refrigerador hasta el momento de la incubación. La incubación fue realizada bajo condiciones aeróbicas a  $25^\circ C$ , y el suelo era mantenido con humedad a capacidad de campo (CC). Después de cada periodo de incubación se determinó pH y Corg, ellos observaron que con  $1000\text{mg N/kg}$  de suelo se produce una considerable reducción del pH del suelo, y que esta fue mucho más significativa que cuando se agregan  $200\text{mg N/kg}$ .

En la gráfica se pudo observar como evoluciono el pH de las muestras de suelo, con diferente tipo de fertilizantes y diferentes dosis de los mismos, durante el periodo de incubación (0 a 1000mg N/kg suelo)



Thind y Rowell (1999) realizaron un estudio en un suelo limo-arenoso, con un pH inicial de 5.9 y con 1.1% de Corg. Este suelo fue sometido a incubación, y se le aplicaron varios tratamientos de fertilización, estos autores observaron que el pH del mismo disminuyó a 5.8 antes de los 46 días de aplicado el fertilizante, cuando el tratamiento de fertilización aplicado fue 100µg NH<sub>4</sub>Cl /g de suelo.

### 2.3.1.2 Experimentos de campo

#### Cultivos forrajeros y cereales

Abruna et al., citados por Garategui (2002), estudiaron el efecto de la fertilización con (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en un suelo arcillo-limoso bien drenado de Puerto Rico por 3 años. Las dosis de N agregado estuvieron entre 185 y 846kg/ha; estos autores afirman que el pH del suelo en los primeros 15cm disminuyó de 7.0 a 4.1 con la dosis mas baja y a 3.6 en las parcelas que recibieron 846kg/ha de N.

Riley y Barber (1971) realizaron un estudio para determinar el efecto de la fertilización con NH<sub>4</sub> y NO<sub>3</sub> en el consumo de P por parte de las raíces de las plantas, en un cultivo de soja realizado en macetas en Indiana. Para el mismo se usó un suelo limo-arcilloso, que tenía 4.5% de MO y un pH (H<sub>2</sub>O) de 5.5 (Typic Argiaquoll). Los tratamientos consistieron en el agregado de dosis de N, al suelo de las macetas, 90ppm a

la siembra y 120ppm durante el periodo de crecimiento del cultivo. La fertilización con  $\text{NH}_4\text{-N}$  produjo una reducción del pH en la rizosfera. En el tratamiento donde se aplicó  $\text{NH}_4\text{-N}$  el pH bajó en promedio 0.15 unidades. Mientras que la fertilización con  $\text{N-NO}_3$  produjo un incremento del pH en la rizosfera. La diferencia en el pH del suelo entre agregar  $\text{NH}_4$  o  $\text{NO}_3$  fue de 1.9 unidades.

Bleviss et al. (1976) realizaron un estudio donde evaluó la influencia de no laboreo del suelo y de la fertilización con N en las propiedades del suelo y en la producción de granos. El experimento se hizo sobre un suelo limo-arcilloso, con un pH inicial próximo a 5.3, y 5.8% MO (Typic Paleudalfs), donde se aplicaron: 0, 84, 168, 336kg N/ha. Los análisis de suelo mostraron que el pH del suelo se redujo, en la capa superior (0-5cm.). La dosis de N mayor (336kg N/ha) acidificó rápidamente el suelo en la superficie, el pH alcanzó valores próximos a 4.0.

Jarvis y Robson (1983) estudiaron el efecto de agregar diferentes formas de N en la nutrición de trébol subterráneo y el desarrollo de acidez de los suelos. El experimento se llevó a cabo en dos sitios de Australia, Bodallin y Badgingarra, en el primer sitio el suelo presenta un pH=5.0 y 0.41% de Corg en el segundo sitio el suelo tiene un pH próximo a 4.6 y 0.90% de Corg, ambos suelos con bajo poder buffer. Los resultados de la fertilización mostraron cambios muy marcados en la acidez del suelo. El suministro de 116ppm de  $\text{N-NH}_4$  disminuyó el pH del suelo 0.9 unidades a causa de la nitrificación del mismo.

Los cambios en las propiedades de un Argiustoll limoso de Kansas (EE.UU) debido a la fertilización anual con  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  fueron estudiadas en parcelas experimentales establecidas en un cultivo de *Bromus inermis*. Los tratamientos consistieron en aplicar 0, 22, 67, 112, 157 y 224kg/ha de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ . Los resultados obtenidos mostraron que la acidificación del suelo puede resultar por la aplicación de altas cantidades de fertilizantes en base a  $\text{NH}_4$ . La continua fertilización de las parcelas también resultó en una disminución de las bases intercambiables ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$ ) y de CIC en la superficie. Se observó además una significativa disminución de pH, el cual varió de 6.7 en el control a 4.1 cuando se agregaron 224kg N/ha (Schwab et al., 1989).

Bolan et al. (1991) en un estudio del proceso de acidificación del suelo, durante el ciclo del N, en pasturas de leguminosas afirmaron que la acidificación del suelo se produjo como consecuencia de la nitrificación neta de fertilizantes amoniacales y de la urea. Además mencionó que la pérdida de  $\text{NO}_3$  desde el suelo, va acompañada con la pérdida de cationes básicos, esto también interviene en la acidificación de los suelos.

En un campo experimental en Vegreville, Canadá, se determinó el efecto residual de varias cantidades de fertilizantes N, en las propiedades químicas y biológicas de un Solonchic. Los tratamientos consistieron en aplicar cinco dosis de N (0, 76, 152, y 305kg/ha de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), a parcelas establecidas con *Bromus inermis*. Los resultados obtenidos de los análisis de suelo indican al igual que los trabajos ya mencionados que la fertilización con  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  disminuye el pH de las capas superiores del suelo. Esta reducción fue muy significativa, los valores de pH cambiaron de 5.7 en el tratamiento sin fertilizar a 4.2 cuando se aplicaron 305kg/ha de N. La biomasa microbiana también disminuyó con la fertilización (McAndrew y Malhi, 1992).

Bouman et al. (1995) realizaron un estudio en trigo y cebada con el objetivo de cuantificar el efecto de la fertilización nitrogenada sobre la acidez de los suelos. Los experimentos se llevaron a cabo en un suelo de textura media (Typic Haplodoll), moderadamente ácido (pH=5.5) de Canadá, al cual se le agregó fertilizante anualmente en valores de 0, 45, 90 y 180kg/ha. Estos autores aseveraron que la acidez del mismo aumentó con aplicaciones crecientes de N. El pH del suelo disminuyó por encima de una unidad, alcanzando valores de hasta 4.6, con las dosis más altas de N (180kg/ha). También observaron que el efecto acidificante se limitó a la capa superior del suelo, hasta los 15cm aproximadamente.

Bowman y Halvorson (1998), investigaron el efecto de 5 niveles de fertilizante amoniacal en los cambios físicos y químicos de los primeros 15cm de profundidad de un Platner limoso después de tres ciclos de cultivo de trigo y maíz. Los datos obtenidos mostraron una significativa reducción en el pH (de 6.5 a 5.1) de la superficie del suelo (0-5cm) cuando se agregaron 112kg/ha de N.

Un experimento, de campo, en Crossfield, Alberta, fue realizado para determinar el efecto de la fertilización nitrogenada, en la acidificación del suelo. Se utilizaron varias dosis de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (0, 56, 112, 168, 224, y 336kg/ha), para un cultivo de *Bromus inermis*; en un suelo cuyo pH original tenía un valor de 6.85. La fertilización resultó en una reducción significativa del pH cuando los niveles de N agregado fueron superiores a 168kg N/ha, el pH llegó a un valor mínimo de 4.1 en la capa superior de suelo (de 5 a 10cm). En la capa de 10 a 15cm el pH disminuyó solo para dosis más altas de 336kg N/ha (Malhi et al., 1998).

## **Plantaciones forestales**

Little (1997) realizó un experimento para determinar el destino del fertilizante nitrogenado agregado a los suelos rojos de Nueva Gales del Sur y su implicancia en la acidez del suelo. Al analizar las muestras de suelo donde previamente se aplicó  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  en plantaciones forestales, se detectó un aumento de la acidez del suelo. Cuando se agregaron entre 112 y 168kg N/ha la diferencia de pH ocurrida entre ambos tratamientos fue de 0.8 unidades.

Smethurst et al. (2001) en uno de sus trabajos estudiaron la aplicación de fertilizante, durante el primer año de plantación de montes de *Eucalyptus* en Australia, con dosis que fueron de 0 a 600kg N/ha (0, 75, 150, 300, 600kg/ha). Los ensayos fueron instalados en tres sitios: Westfield con un suelo de textura limo-arcillosa; pH ( $\text{H}_2\text{O}$ )=5.0 y un contenido de  $\text{C}_{\text{total}}$  de 68g/kg; en este sitio la vegetación previa a la instalación de *Eucalyptus* era *Pinus radiata*. El segundo sitio fue Nabowla con un suelo limo-arcilloso; contenido  $\text{C}_{\text{total}}$  de 23g/kg y pH=5.2 y Middlesex cuyo suelo era limo-arcilloso; con un contenido de  $\text{C}_{\text{total}}$  de 90g/kg y pH=4.8 ambos sin forestación. Los resultados del análisis de los suelos indicaron que algunos meses después de la aplicación del fertilizante, el pH del suelo se redujo más de 0.5 unidades en todos los sitios analizados.

Mitchell y Smethurst (2004) realizaron experimentos con el fin de cuantificar los cambios en algunas de las propiedades químicas del suelo, en plantaciones forestales para madera. Se fertilizaron siete suelos con N y P, posteriormente se efectuó un muestreo de las capas superficiales del suelo para determinar cambios en la solución del suelo, cambios en la concentración de cationes intercambiables, como resultado de la aplicación de fertilizante. Los sitios experimentales fueron Westfield con un suelo limo-arcilloso y pH=4.6, Tim Shea con un suelo limo-arcilloso y pH=5.0, Nunamara con un suelo limo arcilloso y pH=6.0, Penna con un suelo arenoso y pH=7.0, BFG con un suelo limo-arenoso y pH=5.7, Imbill con un suelo limo arenoso y pH=7.0, Nicholas con un suelo limoso y pH=4.2. El fertilizante nitrogenado fue aplicado como sulfato de amonio y como urea en cantidades que fueron de 0 a 1600kg/ha. Se observó una significativa reducción del pH del suelo, de 0.3 a 0.9 unidades en los primeros 10cm. El descenso más significativo de pH ocurrió cuando las dosis aplicadas estuvieron entre 600 y 1600kg N/ha. Aplicaciones de cantidades intermedias de fertilizante de 400 a 600kg/ha afectó el pH solo del suelo Nunamara, observándose una reducción de 0.2 unidades, mientras que para el resto de los sitios no se vieron cambios en el pH con estas dosis de fertilizante. Estos autores concluyeron que la aplicación de fertilizante particularmente en dosis altas (más de 600kg N/ha) ocasionó una disminución del pH y de la concentración de cationes intercambiables en la superficie del suelo forestal y acidificación en la parte superior del suelo como resultado de la nitrificación.

En un experimento, en plantaciones de Sitka spruce donde el N fue aportado como  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  se observó la disminución del pH del suelo (Ferric Stagnopodzol). Esto se debió al efecto del anión móvil  $\text{NO}_3$  por el cual las sales solubles se mueven hacia abajo en el perfil del suelo, provocando el empobrecimiento del suelo y aumentando la solubilidad de iones metálicos tóxicos como el  $\text{Al}^{3+}$  (Jonsson et al., citados por Sheppard, 2003).

Ringrose y Neilsen (2005), en Tasmania, realizaron un experimento para determinar el efecto de la fertilización periódica con N, en las características químicas del suelo, y en el crecimiento de los árboles. El experimento fue establecido en una plantación de *Eucalyptus regnans* de 5 años; en un suelo limo-arenoso (Hapludalf) y los tratamientos consistieron en la aplicación anual con N y P solos y en forma combinada. Como resultado de la fertilización observaron que el agregado de altas cantidades de N y/o P agregados anualmente (952kg/ha, 11:5:0 de superfosfato y sulfato de amonio) resultaron en una significativa caída de pH de 4.5 a 3.9. Estos autores también mencionan que en un suelo limo-arcilloso con mayor poder buffer se necesitó tres veces más fertilizante para producir el mismo efecto en el pH. Las aplicaciones anuales de urea en cantidades de 100kg N/ha/año en un Hapludalf no tuvieron un efecto significativo en el pH, sin embargo si se duplicaba la cantidad de urea agregada (200kg N/ha se producía una reducción de 0.3 unidades en el pH).

### **2.3.2 Cambios en la concentración de aluminio intercambiable y en la acidez intercambiable del suelo**

Otra de las consecuencias de aplicar fertilizante nitrogenado al suelo el aumento que se produce en el Al Int, y en Ac Int, la acidificación de los suelos, produce un desplazamiento de las bases intercambiables, y de esta forma el  $\text{Al}^{3+}$  ocupa los lugares vacíos. La mayoría de los estudios sobre la acidificación del suelo debido a la aplicación de fertilizante sobre todo amoniacal, mencionan la ocurrencia de un aumento de Al Int, y una reducción de las bases de intercambio en la superficie de los suelos.

Blevis et al., citados por Schwab et al. (1989) observaron un aumento en el Al Int cuando aplicaban N como  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  al suelo, un Paleudalf de textura limo arcillosa. Los tratamientos consistían en agregar 0, 84, 168 y 336kg/ha de N. El análisis de suelo mostró que el Al Int aumentó significativamente, pasando de 0.06meq/100g a 1.08meq/100g cuando la dosis de fertilizante fue 336kg/ha de N.

Jarvis y Robson (1983) realizaron estudios sobre el efecto de agregar diferentes formas de N en la nutrición de trébol subterráneo y el desarrollo de acidez de los suelo.

Los experimentos se llevaron a cabo en dos sitios similares, el sitio de Badgingarra, en cuyo suelo el contenido de Corg fue 0.66%, 2.7% de arcilla y CIC=3.6 meq/100g, en contraste con el sitio de Bodallin en el cual el nivel de Corg fue menor (0.57%), pero presentó mayores contenidos de arcilla (12.5%) y CIC (4.54 meq/100g) en los primeros horizontes de suelo. Los resultados obtenidos mostraron que los valores de Ac Int y la concentración de Al Int fueron sustancialmente altos en los primeros cm de suelo en el sitio de Bodallin, pero que no ocurrió lo mismo en Badgingarra. Estos autores concluyeron que las diferencias en los cambios de acidez de los sitios, se debió principalmente a las diferencias en el contenido de Corg que presenta y no al contenido de arcilla de los mismos. Otros estudios determinaron que la concentración de  $Al^{3+}$  fue mayor, cuando los valores de pH del suelo fueron menores; esto indica que el Al en la solución del suelo es dependiente del pH del mismo (Noble et al., 1988).

Schwab et al. (1989) afirmaron que aunque existe poca información acerca de aplicaciones de fertilizante nitrogenado en cuanto a su efecto a largo plazo, la acidificación del suelo puede resultar de aplicaciones de fertilizantes en cantidades altas. Estos autores llevaron a cabo un experimento que consistió en aplicar 0, 22, 67, 112, 157 y 224kg/ha de  $NH_4NO_3$ . Sus resultados arrojaron que Ac Int tiende a incrementarse significativamente en los primeros 10cm del suelo con el aumento de la cantidad de N agregado, el cambio que detectaron fue de 4.6cmol/kg en el control a 23.2cmol/kg cuando se aplicaron 224kg N/ha. En cuanto al Al Int los resultados mostraron que aumentó de 0cmol/kg en el control a 6.1cmol/kg cuando se agregaron 224kg/ha.

Bouman et al. (1995), estudiaron el efecto a largo plazo del uso de fertilizantes amoniacales, en la acidez del suelo en cultivos de cereales. El fertilizante fue aplicado anualmente en cantidades que fueron 0, 45,90 y 180kg N/ha en un suelo de textura media (Typic Haplodoll), moderadamente ácido. El análisis de las muestras de suelo manifestó que la concentración de Al Int aumentó en los primeros cm de suelo, este aumento fue de 0.1mg/L en el control a 0.5mg/L cuando se agregaron 180kg/ha.

Attiwill y Adams (1996) en uno de sus estudios llegaron a la conclusión de que los bajos valores de pH en los suelos fueron la causa del aumento de  $Al^{3+}$  en la solución del suelo. Sin embargo, aunque estas condiciones no son favorables para la mayoría de las especies plantadas, no afectan a los eucaliptos, y la información disponible sugiere que este genero sería altamente adaptable a las altas concentraciones de  $Al^{3+}$  que existe en algunas instancias.

Barak et al. (1997) realizaron un ensayo de fertilización con cuatro niveles de fertilizante (0, 56, 112, 168kg/ha), como urea o como  $NH_4NO_3$  durante un largo periodo

en Arlington, en un Plano limo arcilloso (Typic Argioll). Los resultados obtenidos confirmaron su hipótesis, de la existencia de un significativo efecto de la fertilización nitrogenada en la acidificación del suelo. Observaron que la Ac Int depende de los niveles de fertilizante agregado. En ausencia de fertilización la Ac Int promedio era 0.12cmol/kg; cuando se agregaron 112 y 168kg N/ha/año, la Ac Int varió 0.48 y 1.58cmol/kg respectivamente. Cuando analizaron los efectos de la fertilización en la concentración de bases intercambiables y en la CIC vieron que el incremento de la acidez estaba relacionado con la disminución de las mismas, y que dicha reducción fue muy significativa en el caso del  $\text{Ca}^{2+}$ .

Se estudio el efecto de la fertilización con N en la acidificación del suelo y en la concentración de micronutrientes en *Bomus inermes*. Para esto se llevo a cabo un experimento de campo, en Crossfield, Alberta. Los resultados del análisis de las muestras de suelo indicaron que el Al Int aumentó en el suelo, y que este aumento estuvo correlacionado con la disminución del pH cuando se agregó fertilizante. La concentración de Al Int en este suelo paso de 0.26mg/kg en el control a casi 34mg/kg cuando se agregaron 336kg N/ha (Malhi et al., 1998).

Estudios realizados por Bouman et al. (1995) sugieren que el  $\text{Al}^{3+}$  aumenta en la superficie cuando se fertilizan los suelos con N y que debido a esto la acidificación de los suelo se debe a estos dos componentes  $\text{H}^+$  y  $\text{Al}^{3+}$ .

Bowman y Halvorson (1998), investigaron el efecto de 5 niveles de fertilizante amoniacal en los cambios físicos y químicos de los primeros 15cm de profundidad de un Platner limoso, después de tres ciclos de cultivo de trigo y maíz. La aplicación del fertilizante resultó en un importante aumento del Al en la superficie del suelo.

Mitchell y Smethurst (2004) en un experimento realizado en Australia, donde se fertilizaron siete suelos con N y P, observaron un aumento en la concentración de  $\text{Al}^{3+}$  en la solución del suelo de plantaciones forestales.

Jentschke y Godbold, citados por Sheppard et al. (2004) en un experimento en Nueva Gales donde se agregó N al suelo, observó cual era el efecto del anión móvil  $\text{NO}_3^-$ . Llegó a la conclusión que por medio de este anión los cationes móviles, se mueven hacia abajo en el perfil del suelo, provocando el empobrecimiento del suelo y aumentando la solubilidad de iones metálicos tóxicos como el  $\text{Al}^{3+}$ . El análisis químico del suelo mostró una predominancia del Al Int en los primeros centímetros de suelo luego de la fertilización

### 3 MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 SITIO EXPERIMENTAL

Los ensayos se llevaron a cabo en plantaciones de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus globulus*.

Cuadro N° 1: Ubicación y caracterización de los sitios estudiados

Sitio	Nombre	Dep.	Empresa	GPS	Especie	Fert. siembra	Marc o Plantación
1	La Redonda	Rivera	Colonvade	31°25'20.20" S 55°42'27.50" W	E. grandis	Por planta	4 x 2.5
2	La Gruta	Rivera	Colonvade	31°20'43.00" S 55°42'19.70" W	E. grandis	Por planta	4 x 2.5
4	M <sup>a</sup> Elvira 4	Paysandú	Colonvade	31°45'29.10" S 57°35'47.20" W	E. grandis	Por planta	4 x 2.5
5	M <sup>a</sup> Elvira 5	Paysandú	Colonvade	31°45'38.10" S 57°35'54.50" W	E. grandis	Por planta	4 x 2.5
6	El Refugio 6	Paysandú	F. Oriental	32°22'36.00" S 57°26'57.60" W	E. grandis	Por planta	4 x 1.8
8	El Refugio 8	Paysandú	F. Oriental	32°21'37.00" S 57°26'12.30" W	E. grandis	Por planta	4 x 1.8
9	Doña Inés	Rocha	Redalco	34°10'53.90" S 54° 3'6.70"W	E. globulus	Por planta	2 x 3.5

### 3.2 INFORMACIÓN DE SUELOS

En el siguiente cuadro se muestra datos analíticos de los suelos correspondientes a los ensayos, para los siete sitios.

Cuadro N° 2: Datos analíticos de los suelos de los sitios experimentales

Sitio	Asoc. de suelo	pH inicial antes de incubación	K	Na	Ca	Mg	MO	Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural
1	Tb.	4,2	0,51	0,32	0,59	0,30	1,85	88,4	0	12	ArF
2	Tb.	4,1	0,72	0,42	0,59	0,41	1,55	86,5	1,4	12,1	ArF
4	Ch	4,6	0,65	0,35	3,30	1,00	2,13	83,3	3,9	12,8	ArF-FAr
5	Ch	4,6	0,99	0,29	5,40	1,81	3,44	75,9	7,4	16,7	FAr
6	Alg	4,2	0,22	0,32	1,30	0,50	1,63	80,7	5,1	14,2	FAr
8	Alg	4,2	0,29	0,34	1,89	0,69	1,37	73,2	10,6	16,2	FAr
9	SP	4,5	0,78	0,48	5,90	3,00	5,70	22,9	40,3	36,8	FAr

### 3.3 MUESTREO DE SUELOS DE ENSAYOS PREVIAMENTE FERTILIZADOS

En los sitios 1,2 y 4 se extrajeron muestras de suelos en ensayos que habían sido instalados dentro de plantaciones comerciales. Los tratamientos consistieron en tres niveles de N agregado (0, 50 y 100 kg /ha) 6 meses antes del muestreo, cuando la plantación tenía aproximadamente 2 años de edad. Se utilizó como fertilizante  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ . El muestreo de suelos se realizó con calador, sacando de cada parcela una muestra compuesta (8 tomas) de los 0-20cm de suelo de la entrefila. De cada sitio se extrajeron nueve muestras (una muestra por dosis y por bloque). En estas muestras se determinó luego pH, Al int., H Int y Ac Int.

### 3.4 MUESTREO DE SUELOS PARA ENSAYOS DE INCUBACIÓN

De todos los sitios se extrajeron muestras de suelo con pala de los 0-20cm de toda el área del cultivo pero exterior al ensayo, es decir que el área muestreada no había recibido fertilización nitrogenada post-siembra. Estas muestras fueron luego utilizadas para realizar el ensayo de incubación.

### 3.5 PROCEDIMIENTO PARA EL AJUSTE DE LA HUMEDAD DE SUELO A CAPACIDAD DE CAMPO

Luego de que las muestras fueron traídas al galpón de Suelos de Montevideo (FAGRO), se procedió a tamizar las mismas utilizando una zaranda de malla de 4mm. Posteriormente se determinó el contenido de humedad de las mismas. El contenido de humedad del suelo se determinó de la siguiente manera: se pesaron 150gr. (peso de suelo+ peso de lata), tomándose dos muestras de cada uno de los suelos la cual se colocó en latas, estas cuatro muestras se llevaron a estufa a 105 °C durante 24 horas. Luego se dejó enfriar el suelo y se procedió a pesar las latas conteniendo el suelo. El contenido inicial de agua se calculó con la siguiente fórmula:

$$\%H_2O \text{ Suelo} = (PL + PS \text{ hum.} - PL + PS \text{ seco}) / (PL + PS \text{ seco} - PL)$$

Donde: PL = peso de lata, PS hum= peso de suelo húmedo y PS seco = peso de suelo seco

El contenido inicial de agua de los suelos aparece en el cuadro 3.

Posteriormente se determinó la cantidad de agua necesaria que se debía agregar a las muestras de suelo para llevarlas a la humedad a CC. El procedimiento utilizado fue el siguiente: se colocaron 100g de suelo con la humedad inicial luego de tamizado en una malla, se agregó agua hasta saturarlo, se dejó el suelo durante 24 horas hasta que drenara totalmente (solo microporos con agua), posteriormente se pesó el suelo. La diferencia de peso entre suelo húmedo y suelo con la humedad inicial se tomó como el agua a agregar para llevar la humedad del suelo a CC. (Cuadro 3).

El cálculo para ajustar la humedad del suelo a CC fue el siguiente (ejemplo para Sitios 1 y 2): si 100g de suelo con la humedad como estaba en galpón, o sea antes de instalar el ensayo de incubación, contenía 6.60% de agua y el contenido de humedad del suelo a CC para estos dos suelos fue de 11.3%, lo cual indica que para llevar el suelo a CC se debieron agregar 4.70% de agua en esos 100gr de suelo.

Cuadro N° 3: Porcentaje de humedad de los suelos y cantidad de agua necesaria para llevar los mismos a capacidad de campo

Sitio	Humedad. Inicial del suelo	Humedad del suelo a CC	Agua necesaria para llevar al suelo a CC	Agua agregada por bandeja
	%		g H <sub>2</sub> O/100g de suelo	g H <sub>2</sub> O / 250 g de suelo
1	6,40	11.3	4,70	12
2	6,70	11.3	4,70	12
6	2,00	13.5	11,6	29
8	1,94	13.5	11,6	29
4	2,30	13.5	10,5	26
5	3,60	13.5	10,5	26

El ajuste de humedad del suelo a CC se realizó en muestras de 250g de suelo previamente tamizadas, las que fueron colocadas en bandejas de plástico con tapa a la cual se les realizó algunas ranuras en los costados para permitir el intercambio gaseoso. Las dimensiones de las mismas era de aproximadamente 20cm de largo; 10cm de ancho y una altura de 8cm (Cuadro 3).

### 3.6. MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS EN LA INCUBACIÓN

Las bandejas con suelo fueron las unidades experimentales a las que luego se les aplicó los tratamientos, que consistieron en cinco niveles de N equivalentes a 0, 50, 100, 200 y 400kg/ha utilizando como fertilizante urea. El fertilizante nitrogenado se agregó en forma de solución. Posteriormente, las bandejas fueron sometidas a incubación aerobia, a una temperatura de 24°C durante 3 meses aproximadamente. Durante el periodo de incubación se fue controlando la humedad de las muestras semanalmente en un inicio, y luego cada quince días. Además, mensualmente se realizaron controles de pH y al mes de incubación determinaciones de NH<sub>4</sub> y NO<sub>3</sub>.

### 3.7 CALCULO DE DOSIS DE FERTILIZANTE POR BANDEJA Y PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE FERTILIZANTE NITROGENADO

Se preparó una solución madre de 4000ppm de N a partir de urea (CO (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>) que contiene 46% de N.

1000ppm de N-----2.174 g de Urea por litro de agua destilada  
 4000ppm de N-----X= **8.696g de urea**

Se disolvió 8.696g de urea en agua destilada y se llevó a un volumen final de un litro.

Para aplicar la dosis equivalente a 400kg/ha, se agregó a cada bandeja 10mL de la solución de 4000ppm de N, agregando en total 40mg de N por bandeja:

$$10\text{mL} \times 4000 \text{ mg N/L.} = 10\text{mL} \times 4000\mu\text{g/mL.} = 40000 \mu\text{g} = 40\text{mg N/bandeja}$$

Esta cantidad equivale a 400 kg/ha de N. Comprobación:

$$40\text{mg N} \text{-----} 250\text{g} \\
 X \text{-----} 2.5 \times 10^6 \text{ kg (peso de una ha en kg)} \times 10^3 \text{ g/kg} = 2.5 \times 10^9 \text{ g (peso de una ha en g)}$$

$$X = 40\text{mg N} \times 2.5 \times 10^9 \text{ g} / 250\text{g} = 40 \times 2.5 \times 10^9 / 2.5 \times 10^2 \\
 = 40\text{mg N} \times 1.0 \times 10^7 = 4.0 \times 10^8 \text{ mg N} = 4.0 \times 10^8 / 1.0 \times 10^6 = 4.0 \times 10^2 = \mathbf{400\text{Kg N /ha}}$$

Luego, se agregó el resto de agua requerida para llevar el suelo a CC según el Cuadro 3.

Para aplicar la dosis de 200kg/ha de N se diluyó la solución de 4000ppm a la mitad, obteniendo así una solución de 2000ppm de N y se agregó 10mL de esta solución a cada bandeja. Se continuó con estas diluciones sucesivas para las dosis restantes de 100 y 50kg /ha de N. Para la dosis de 0kg/ha de N se agregó solamente agua destilada (Cuadro 4).

Cuadro N° 4: Concentración de las soluciones de N utilizadas para fertilizar las bandejas y cantidad de nitrógeno agregada por dosis

Dosis de N equivalente a campo	Concentración de Solución	Volumen de solución por maceta	Cantidad de N agregado
Kg./ha	(ppm)	mL /250 g suelo	mg /250 g suelo
0	0	10	0
50	500	10	5
100	1000	10	10
200	2000	10	20
400	4000	10	40

Por lo tanto, para mantener los suelos a de CC, en los sitios 1 y 2 se agregó a los 10mL de la solución de urea (cuadro 4) 2mL de agua destilada para llevarlo a un contenido de agua a CC. En los sitios 6 y 8 se agregó a la solución de fertilizante 19ml de agua destilada, y en los sitios 4 y 5 16mL. Luego se agregó ese volumen total a cada bandeja.

### 3.8 DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En los ensayos de campo, el modelo estadístico utilizado fue el Diseño en Bloques Completamente al Azar, con tres repeticiones por tratamiento:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_i + \gamma_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

$Y_{ijk}$ : es la variable de respuesta.

$\mu$ : es la media general.

$\beta_i$ : es el efecto del i-ésimo bloque.

$\gamma_j$ : es el efecto del j-ésimo tratamiento de fertilización.

$\varepsilon_{ij}$ : es el error experimental.

Con este diseño se analizaron los datos de pH, Ac Int, y Al Int.

En el laboratorio, se utilizó el Diseño Completamente al Azar con tres repeticiones por tratamiento. Con este diseño se analizaron los datos de pH,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , Ac Int, y Al Int.

$$Y_{ij} = \mu + \gamma_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

$Y_{ij}$ : es la variable de respuesta.

$\mu$ : es la media general.

$\gamma_i$ : es el efecto del i-ésimo tratamiento de fertilización.

$\varepsilon_{ij}$ : es el error experimental.

Para los análisis de los modelos planteados se usó el programa INFOSTAT.

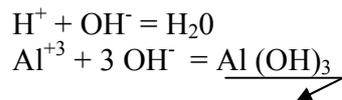
### 3.9 MEDICIONES Y ANÁLISIS QUÍMICO

Previo a su análisis, las muestras de suelo procedentes del campo y del ensayo de incubación fueron secadas en estufa durante 48 horas a 40°C y luego molidas hasta pasar por una malla de 2mm. Los análisis de suelo se realizaron en el laboratorio de Fertilidad

de Suelos y las técnicas analíticas utilizadas fueron las descriptas en el Manual de Laboratorio de uso interno.

En las muestras procedentes del campo y del ensayo de incubación se determinó pH en agua (relación suelo/agua: 1:2.5) con un electrodo de vidrio sensible a la actividad de  $H^+$ . Se determinó además Ac Int previa extracción con KCl 1M y determinación por el método de titulación con fenoftaleina y NaOH (Thomas, 1982). Luego se determinó Al Int agregando FNa para complejar el Al y liberar el  $OH^-$  retenido por este, titulándose luego por retroceso con HCl. El H Int se determinó por diferencia entre Ac. Int y Al int. Más detalles sobre estas determinaciones se adjuntan a continuación.

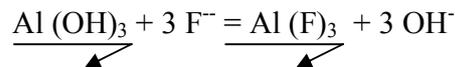
Determinación de Acidez Intercambiable: Esta integrada por  $Al^{3+}$  y  $H^+$ . El H y Al adsorbidos a las partículas de suelo se liberan a la solución del mismo cuando se agrega KCl a la muestra de suelo (relación suelo/solución 5/50).



$$\text{meq Acidez Int. / 100gr suelo} = (\text{ml. NaOH muestra} - \text{ml NaOH PB}) \times \text{Ne-NaOH} \times \frac{100}{10\text{gr de suelo.}}$$

- $\text{Ne-NaOH} = N * \text{Factor de N} = \text{Normalidad exacta de NaOH}$

Determinación de Aluminio Intercambiable: Se agregó FNa a la solución que se terminó de titular en 1) y luego de 30 minutos se tituló con HCl



$$\text{meq. Al. Inter. / 100gr de suelo} = \text{ml. de HCl} * \text{Ne-HCl} * \frac{100}{10\text{gr de suelo.}}$$

- $\text{Ne-HCl} = N * \text{Factor de N} = \text{Normalidad exacta de HCl}$

#### Determinacion de Hidrogeno Intercambiable

El H. Intercambiable se estimó por diferencia.

$$\text{Meq H Int / 100gr suelo} = \text{Meq Acidez Inter. / 100gr suelo} - \text{Meq. Al. Inter. / 100gr de suelo.}$$

En las muestras de incubación se determinó además de pH, Al Int, Ac Int, e H Int,  $NO_3$  y  $NH_4$ , previa extracción con KCl 2M (relación suelo/solución 20/100). Las

determinaciones de N-NO<sub>3</sub> se hicieron por colorimetría luego del pasaje del extracto de suelo por una columna conteniendo cadmio metálico para realizar la reducción de NO<sub>3</sub> a NO<sub>2</sub> (Bundy y Meisinger, 1994). Para la determinación de N-NH<sub>4</sub> también por colorimetría se basó en la reacción de indofenol de Berthelot (Rhine et al.,1998).

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 SITIO 1

#### 4.1.1 Ensayo de incubación

##### 4.1.1.1 Variaciones en la concentración de nitrógeno mineral con la dosis de nitrógeno agregada

El agregado de nitrógeno (N) produjo un aumento significativo de la concentración de  $\text{NH}_4$  en el suelo, este aumento fue de  $0.1274\text{mg}/100\text{g}$  suelo por  $\text{kg}/\text{ha}$  de N agregado (Cuadro 1). El  $\text{NH}_4$  aumentó  $48\text{ppm}$  como consecuencia del agregado de N, considerando que se agregaron  $160\text{ppm}$  de N al suelo se puede decir que el 30% del N total agregado como urea fue transformado a este catión, y el resto pasó a  $\text{NO}_3$  o en su forma original.

La figura 1-B muestra que la concentración de  $\text{NO}_3$  también aumentó, aproximadamente  $0.06\text{mg}/100\text{g}$  suelo por cada  $\text{kg}/\text{ha}$  de N aplicado, pero el coeficiente lineal fue apenas significativo (Cuadro 5). Cuando en cambio el efecto de la dosis de N se analizó como una variable clasificatoria, el ANOVA no resultó significativo. El aumento total de  $\text{NO}_3$  fue de solo  $14\text{ppm}$ , representando solo el 8.8% de la cantidad total de N agregada como urea. En total, luego de 3 meses de incubación menos de la mitad (38.8%) del N agregado fue encontrado en forma de  $\text{NH}_4$  ó  $\text{NO}_3$ .

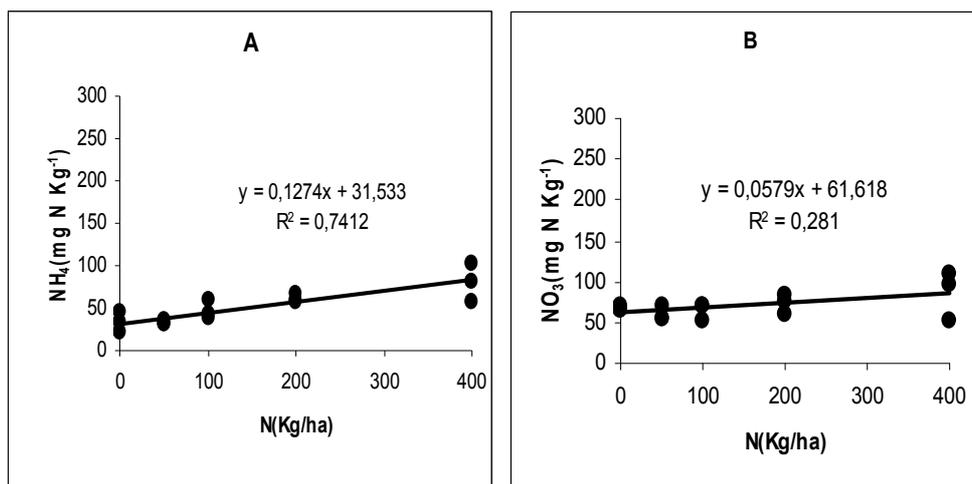


Figura 1: Concentración de formas minerales de N en el sitio 1: (A)  $\text{NH}_4$  y (B)  $\text{NO}_3$ .

#### 4.1.1.2 Variaciones en las formas de acidez del suelo

Con el aumento de la dosis de N se observó un incremento significativo de pH mientras que ocurrió un cambio muy leve en Al Int (Fig. 2 a y b y Cuadro 5), las dos variables más importantes relacionadas a la acidez del suelo. Sin embargo, en este trabajo la nitrificación se vio afectada por el tratamiento del suelo previo al agregado de N en el ensayo de incubación. El suelo fue dejado 3 o 4 días, en bolsas a temperatura ambiente, lo cual produjo una rápida mineralización y nitrificación del N nativo, el pH descendió por debajo del límite al cual las nitrobacterias pueden actuar. La nitrificación previa al agregado de nitrógeno limitó la actividad microbiana del suelo, disminuyendo de esta forma la nitrificación de la urea y como consecuencia el pH del suelo aumentó. Los suelos de textura arenosa tienden a acidificarse más rápido que los suelos arcillosos, debido a que los primeros tienen menos poder buffer, el cual es función del contenido de MO y de la CIC del suelo.

Las dosis de 50 y 100 kg/ha de N no produjeron un cambio de pH para el sitio 1; mientras que las dosis más altas agregadas (200 y 400 kg/ha) sí ocasionaron un aumento en el pH de 0.1 y 0.2 unidades respectivamente.

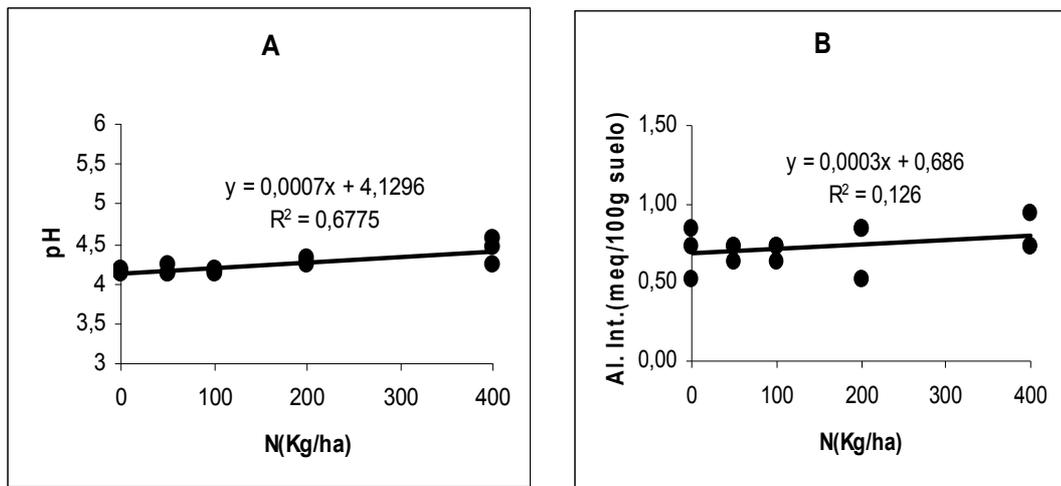


Figura 2: Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de laboratorio, para el sitio 1: (A) pH y (B) Al Int.

Cuadro N° 5 Concentraciones promedio de NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, Ac Int, H Int y pH del sitio 1 para distintas dosis de N en el laboratorio

Dosis	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub> .	pH	Ac. Int.	Al Int.	H Int.
Kg/h de N	mg N kg <sup>-1</sup> suelo			meq/100 g suelo <sup>-1</sup>		
0	33	67	4,2	0,88	0,70	0,18
50	32	60	4,2	0,98	0,70	0,28
100	47	65	4,2	0,88	0,70	0,17
200	61	73	4,3	0,78	0,74	0,04
400	81	81	4,4	0,98	0,81	0,18
Media	51	69	4,26	0,90	0,73	0,17
Desv. Est.	21	8	0,09	0,08	0,05	0,09
C.V.	41	12	2,1	9,30	6,57	50,3
ANOVA N (P)						
	0.0031***	NS	0.0095***	NS	NS	NS
Coeficiente b Regresión (P)						
	0.00003**	0,042**	0,000163**	0.72	0.194	0.37

Nota: NS: no significativo= P>0.05

La Ac Int en promedio, no tuvo una tendencia a aumentar con la dosis de N sino que varió con las dosis de forma indefinida.

#### 4.1.2 Ensayo de campo

Como muestran los resultados de los ensayos de campo para el sitio 1 (Figura 3a y 4b), el pH disminuyó al aumentar la dosis de fertilizante a diferencia de lo ocurrido en las incubaciones de laboratorio, esta disminución fue de 0.004 unidades por kg de N agregado. Con la dosis mayor (100kg/ha), el pH disminuyó 0.5 unidades (Cuadro 6).

El Al Int aumentó con el aumento de la dosis de N, este aumento resultó significativo y fue de 0.0018meq/100g suelo por kg de N/ha agregado. La Ac Int también se incrementó. La regresión mostró diferencias significativas en el pH del suelo y en el H Int (Cuadro6). El ANOVA no detectó un cambio significativo en ninguna de las variables estudiadas.

A diferencia de lo ocurrido en las incubaciones de laboratorio, en los ensayos de campo del sitio 1 el pH disminuyó significativamente al aumentar la dosis de fertilizante (Figura 3 A y B). Esta disminución fue de 0.004 unidades por kg de N agregado. Con la dosis mayor (100kg/ha), el pH disminuyó 0.5 unidades (Cuadro 6).

Esto fue debido posiblemente a que en el campo si se dieron las condiciones necesarias para que ocurriera la nitrificación en forma normal, ya que el pH sin agregado de N fue mayor (4.6) que en el ensayo de incubación (4.3). Los fertilizantes amoniacales generan acidez en el suelo ya que al nitrificarse se liberan  $H^+$  y la magnitud de este efecto acidificante depende de varios factores: uno de ellos es el tipo de suelo, como fue mencionado anteriormente.

La Ac Int y el H Int también aumentaron significativamente, pero el Al Int en cambio no varió en forma significativa (Cuadro6). Estos resultados de significación estadística se obtuvieron del análisis de la regresión, pero el ANOVA que consideró las dosis como variables clasificatorias no detectó un cambio significativo en ninguna de las variables estudiadas.

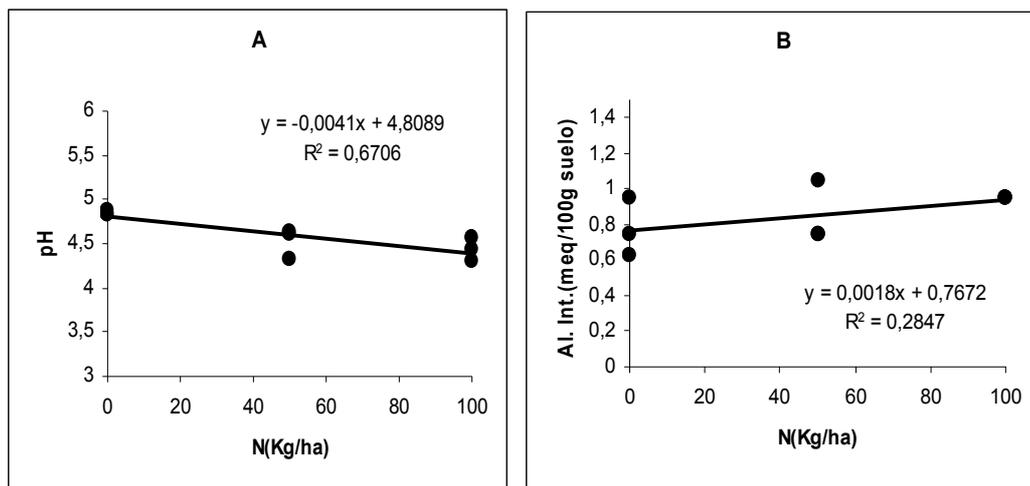


Figura 3: Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de campo, para el sitio 1: (A) pH y (B) Al Int.

Cuadro N° 6: Concentraciones promedio de Ac Int, H Int y pH del sitio 1 para distintas dosis de N en el campo

<b>N</b>	<b>pH</b>	<b>Ac. Int</b>	<b>Al Int</b>	<b>H. Int</b>
<b>kg/ha</b>		<b>meq/100 g</b>		
0	4,9	0,89	0,77	0,12
50	4,5	1,16	0,84	0,32
100	4,4	1,35	0,95	0,41
Media	4,6	1,13	0,86	0,28
Desv. Est.	0,2	0,23	0,09	0,14
C.V.	4,7	20,3	10,4	51,3
ANOVA		N(P)		
	NS	NS	NS	NS
Coeficiente		Regresión (P)		
	0.0069	0.080	0.14	0.087

Nota: NS: no significativo=  $P > 0.1$

## 4.2 SITIO 2

### 4.2.1 Ensayo de incubación

#### 4.2.1.1 Variaciones en la concentración de N mineral con la dosis de N agregada

La concentración de  $\text{NH}_4$  aumentó al aumentar la cantidad de N agregado (Fig. 4A), se pudo observar que este aumento fue de 0.2118ppm/ 100g suelo por kg N/ha (Fig. 5). El  $\text{NH}_4$  aumento 81ppm por el agregado de fertilizante (Cuadro 7), lo cual significa que en este suelo cuando se agregaron 40ppm de N en la bandeja conteniendo 250g de suelo, (160ppm de N por kg de suelo), el 50% de la urea agregada pasó a esta forma de N mineral.

En cuanto al  $\text{NO}_3$  también aumentó con el agregado de fertilizante nitrogenado y dicho aumento fue de 0.1197ppm/100g suelo por kg N (Fig. 4B). El mismo aumentó 45ppm en el suelo, esto indica que del total de N agregado el 28% paso a  $\text{NO}_3$ , o sea el 78% de la urea aportada a este suelo fue transformada a alguna de estas formas de N.

Como lo muestra el cuadro 7 ambos análisis de datos (ANOVA y Regresión) arrojaron que el incremento en la concentración de  $\text{NH}_4$  y  $\text{NO}_3$  en el suelo fue altamente significativo.

#### 4.2.1.2 Variaciones en las formas de acidez del suelo

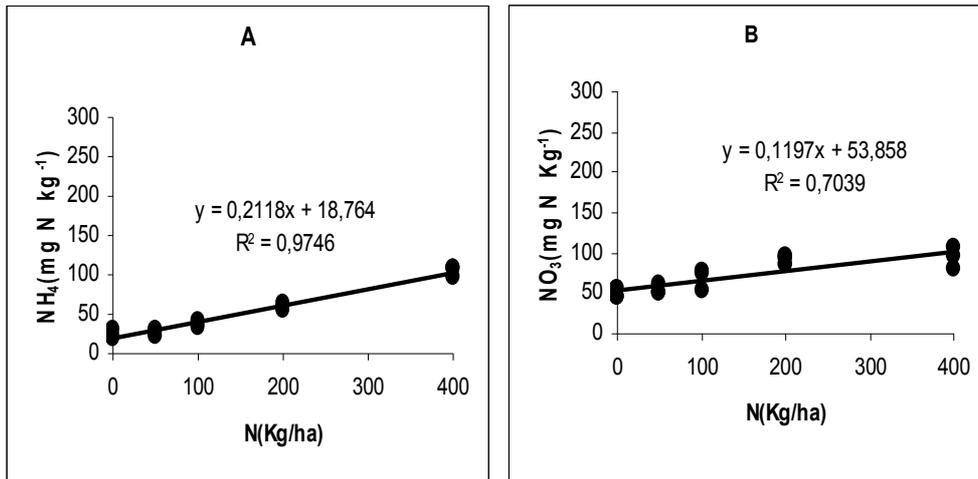


Figura 4: Concentración de formas minerales de N en el sitio 2: (A) NH<sub>4</sub> y (B) NO<sub>3</sub>.

Al igual que el sitio anterior, el pH del suelo para este sitio aumentó, por el agregado de dosis crecientes de N, dicho aumento fue de 0.0003 unidades por cada kg de N aportado (Fig.5A). Siendo el mismo no significativo según el análisis de la varianza, mientras que el análisis de la regresión dio que fue altamente significativo. Para la dosis mas alta el pH se incrementó 0.2 unidades con respecto al testigo, esto probablemente se debió a que la nitrificación fue inhibida, por las condiciones antes mencionadas, y como consecuencia se produjo la acumulación de NH<sub>4</sub>. (Cuadro 7).

En cuanto al Al Int el mismo permaneció casi sin variación, si bien se produjo un aumento este fue muy pequeño, de aproximadamente 0.00007meq/kg N agregado (Fig. 5B). Este aumento no fue significativo para ninguno de los análisis estadísticos (Cuadro 7).

Para Ac Int se observó que la misma se debió sobre todo Al Int y además no aumentó con el agregado de cantidades mayores de N, si bien tubo algún cambio para las diferentes dosis de N agregado, al igual que para el sitio anterior esta variación no tuvo un patrón definido.

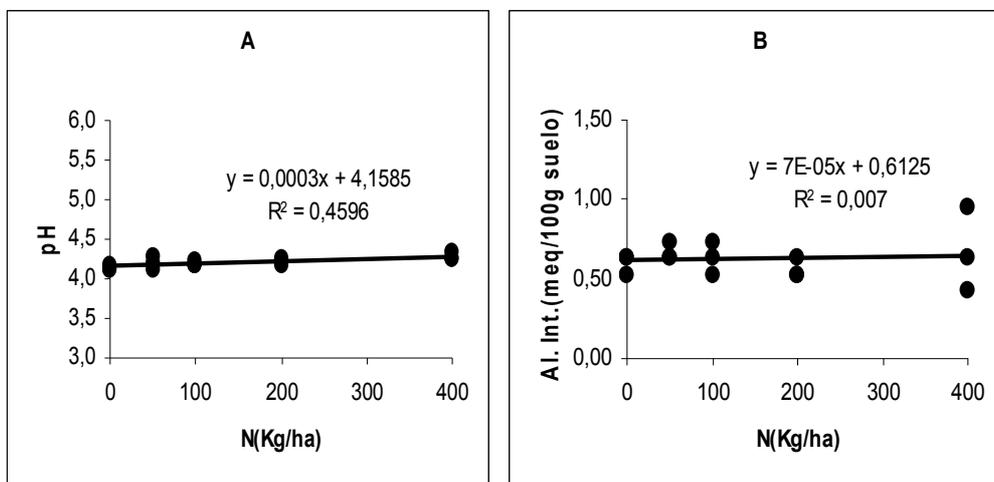


Figura 5: Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de laboratorio, para el sitio 2: (A) pH y (B) Al Int.

Cuadro N° 7: Concentraciones promedio de  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , Ac Int, H Int y pH del sitio 2 para distintas dosis de N en el laboratorio

Dosis	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_3^-$	pH	Ac. Int.	Al Int.	H Int.
Kg/h de N	mg N $\text{kg}^{-1}$ suelo			meq 100 g suelo <sup>-1</sup>		
0	24	49	4,1	0,69	0,6	0,09
50	26	55	4,2	0,83	0,67	0,16
100	38	68	4,2	0,81	0,63	0,18
200	60	92	4,2	0,63	0,56	0,07
400	105	94	4,3	0,77	0,67	0,10
Media	51	72	4,2	0,75	0,63	0,12
Desv. Est.	34	21	0,1	0,08	0,05	0,05
C.V.	66	29	1,7	11,3	7,54	39,5
ANOVA N (P)						
	<0.0001	0.0003	NS	NS	NS	NS
Coeficiente b Regresión.						
	0.0055	0.00009		$9.4 \times 10^{-12}$	0.92	0.77
					0.56	

Nota: NS: no significativo=  $P > 0.1$

#### 4.2.2 Ensayo de campo

En el experimento de campo se observó que el pH disminuyó, 0.0025 unidades por kg de N agregado (Fig. 8). Esta disminución no fue significativa según el ANOVA, y según la regresión, aunque el valor de P fue menor a 0,1 (0,061) y por lo tanto cercano al nivel de significación. Cuando fueron comparados los datos de las dosis de fertilizante agregado con el testigo sin fertilizar fue observado que cuando se agregaron 100kg/ha de N el pH disminuyó 0.3 unidades.

El Al Int aumentó con el agregado de N al suelo, este aumento fue de 0.0011meq/100g suelo por kg de N/ha (Fig. 9), según el análisis estadístico este aumento no resultó significativo. Aunque se vio que el cambio en Ac Int si fue muy significativo.

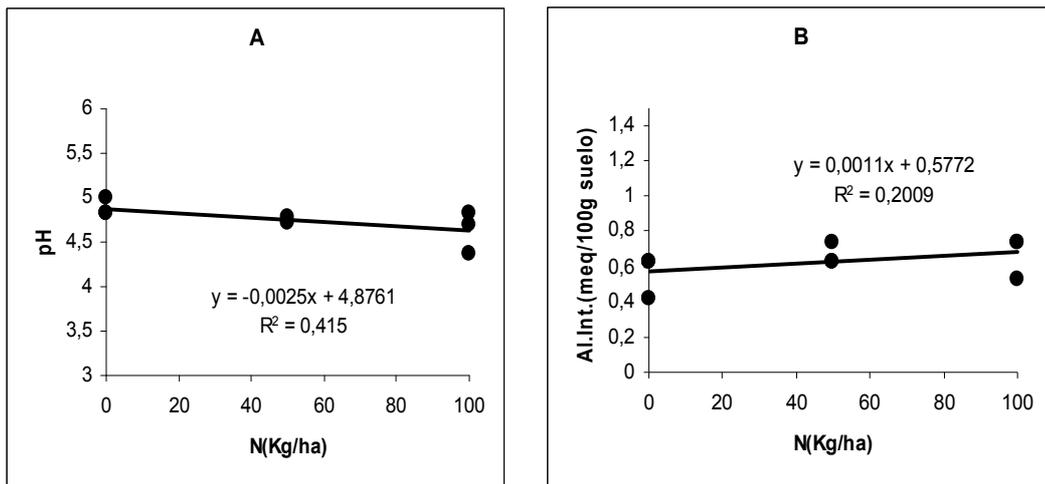


Figura 6: Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de campo, para el sitio 2: (A) pH y (B) Al Int.

Cuadro N° 8: Concentraciones promedio de Ac Int, H Int y pH del sitio 2 para distintas dosis de N en el campo

<b>N</b>	<b>pH</b>	<b>Ac. Int</b>	<b>Al Int</b>	<b>H. Int</b>
<b>kg/ha</b>		<b>meq/100 g</b>		
0	4,9	0,60	0,56	0,04
50	4,7	0,77	0,67	0,11
100	4,6	0,99	0,67	0,32
Media	4,8	0,79	0,63	0,16
Desv. Est.	0,1	0,19	0,06	0,15
C.V.	2,6	24,4	9,90	93,1
ANOVA		N(P)		
	NS	0.0033	NS	NS
Coeficiente		Regresión (P)		
	0.061	0.00044	0.226	0.018

Nota: NS: no significativo=  $P > 0.1$

### 4.3 SITIO 4

#### 4.3.1 Ensayo de incubación

##### 4.3.1.1 Variaciones en la concentración de N mineral con la dosis de N agregada

La figura 7(A) muestra que la concentración de  $\text{NH}_4$  aumentó levemente, 0.03ppm/100g suelo por kg de N/ha. Dicho aumento fue estadísticamente significativo (Cuadro 9). La baja concentración en  $\text{NH}_4$  observada para el sitio 4 se debe a que la mayor parte del mismo se nitrificó y por lo tanto se transformó en  $\text{NO}_3$ .

Como se puede ver en la figura 7(B) la concentración de  $\text{NO}_3$  aumentó significativamente 0.3218ppm/100g suelo por kg de N/ha, este aumento fue de 131ppm, lo cual significó que el 82% del N agregado como urea pasó a  $\text{NO}_3$ .

Este suelo a diferencia de los anteriores posee mayor poder buffer (mayor contenido de MO), esto le permitió mantener el pH en un valor similar al de campo y no sufrir el descenso, debido al pre-tratamiento que recibió, y de esta forma mantener las condiciones para que se produjera la nitrificación.

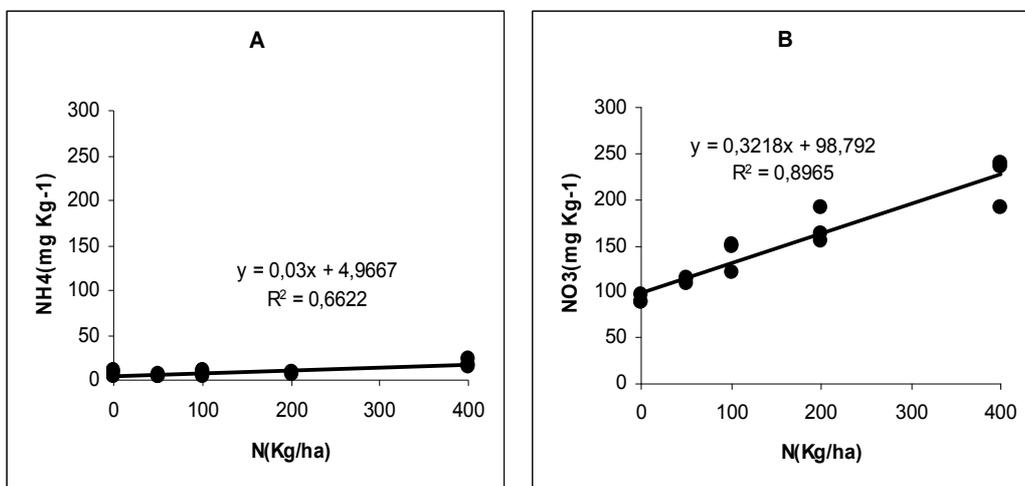


Figura 7: Concentración de formas minerales de N en el sitio 4: (A) NH<sub>4</sub> y (B) NO<sub>3</sub>.

#### 4.3.1.2 Variaciones en las formas de acidez del suelo

En el sitio 4 se produjo una disminución del pH, cuando se agregaron dosis crecientes de N, por cada kg de N agregado el pH bajo 0.0017 unidades (Fig.8A); la mayor reducción ocurrió para la dosis más alta de N, donde cayó 0.7 unidades (Cuadro 5). Sin embargo esta reducción no fue significativa para el ANOVA, pero si lo fue para el análisis de la regresión.

En cuanto al Al Int el mismo aumentó significativamente, 0.001meq/100g suelo por kg de N/ha agregado, tal como se esperaba, debido al agregado de fertilizante. La Ac Int promedio aumentó al aumentar la dosis de N, de 0.18meq en el control, a 0.67meq/100g suelo cuando se agregaron 400kg/ha de N y fue debida en su mayoría al contenido de Al Int.

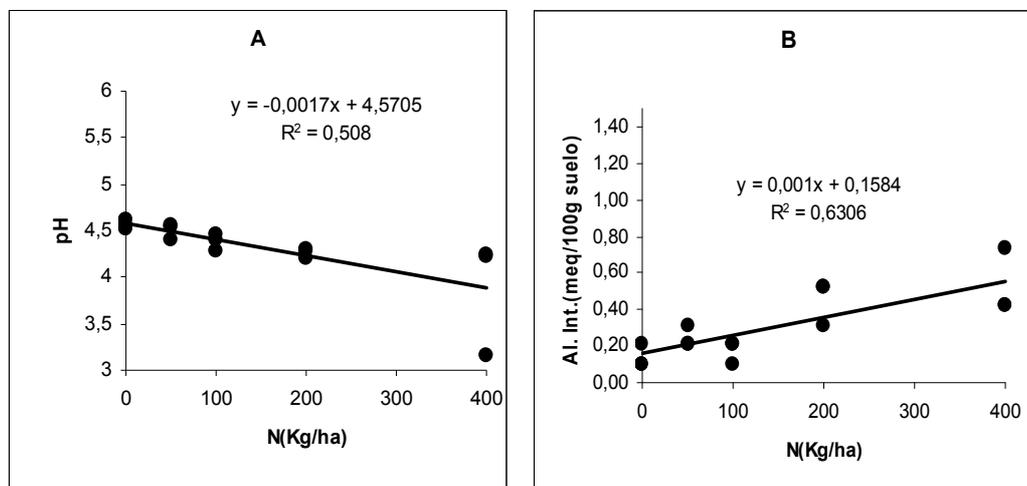


Figura 8: Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de laboratorio, para el sitio 4: (A) pH y (B) Al Int.

Cuadro N° 9: Concentraciones promedio de NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, Ac Int, H Int y pH del sitio 4 para distintas dosis de N en el laboratorio

Dosis	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	pH	Ac Int.	Al. Int.	H. Int.
kg/h de N	mg N kg <sup>-1</sup> suelo			meq 100 g suelo <sup>-1</sup>		
0	8	91	4,6	0,18	0,14	0,04
50	5	112	4,5	0,29	0,25	0,04
100	8	140	4,4	0,37	0,18	0,19
200	8	170	4,3	0,52	0,46	0,07
400	19	222	3,9	0,67	0,53	0,14
Media	10	147	4,3	0,41	0,31	0,10
Desv. Est.	5	51	0,3	0,19	0,17	0,07
C.V.	56	35	6,2	47,5	55,6	69,3
ANOVA N (P)						
	<0.0012	0.0001	NS	0.0019	0.0045	NS
Coeficiente b Regresión.						
	0.00023	9.007x10 <sup>-8</sup>	0.0028	2.44x10 <sup>-5</sup>	0.00041	0.38

Nota: NS: no significativo= P>0.1

#### 4.3.2 Ensayo de campo

Los resultados de campo mostraron que el pH disminuyó, 0.0014 unidades por kg de N aportado al suelo y que ese descenso, se traduce en un aumento del Al Int, de 0.0028meq/100g suelo por kg de N/ha agregado (Fig. 9 A y B). La reducción del pH no fue significativa para los análisis estadísticos (aunque la P es cercana a 0,1); mientras

que el cambio en el Al Int no fue significativo para el ANOVA, pero si lo fue para el análisis de la regresión (Cuadro 10).

La Ac Int aumentó por el agregado de N al suelo, y que este aumento estuvo estrechamente relacionado al aumento de Al Int.

Cabe destacar en este sitio que la caída de pH en el ensayo de laboratorio fue similar a la observada en el campo, lo que implica que los ensayos de laboratorio serian buenos predictores de lo que ocurre frecuentemente en el campo.

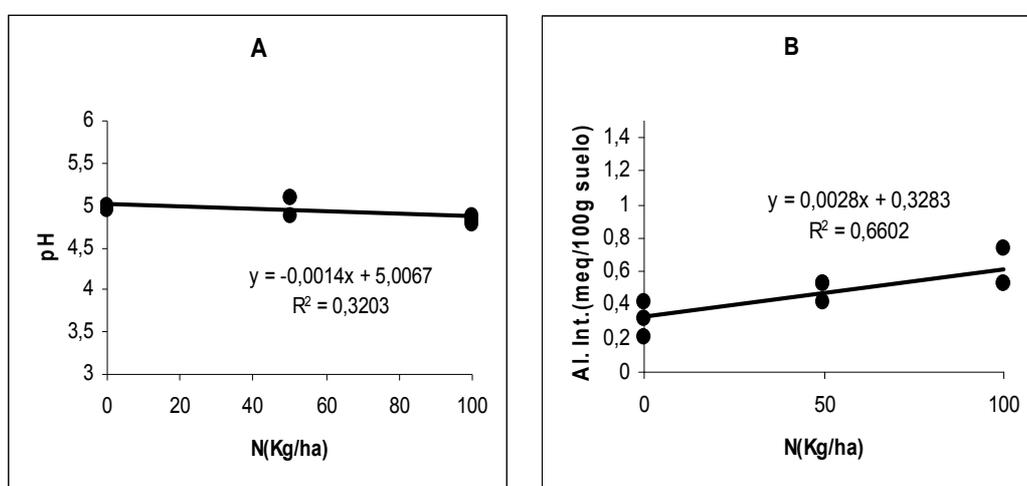


Figura 9: Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de campo, para el sitio 4: (A) pH y (B) Al Int.

Cuadro N° 10: Concentraciones promedio de Ac Int, H Int y pH del sitio 4 para distintas dosis de N en el campo

N	pH	Ac. Int	Al Int	H. Int
kg/ha		meq/100 g		
0	5,0	0,32	0,32	0,01
50	5,0	0,58	0,49	0,09
100	4,8	0,70	0,60	0,11
Media	4,9	0,54	0,47	0,07
Desv. Est.	0,1	0,19	0,14	0,05
C.V.	2,0	36,0	30,4	75,0
ANOVA		N(P)		
	NS	NS	NS	NS
Coeficiente		Regresión (P)		
	NS (0.112)	0.0011	0.0078	0.123

Nota: NS: no significativo=  $P > 0$ .

En estos tres sitios donde se tuvo información de los ensayos de campo, se puede ver que en todos se produjo una reducción de pH del suelo al agregar N y que cuando las dosis agregadas aumentaron las reducciones se hicieron más acentuadas, también se observó un aumento de Ac Int y del Al Int.

#### **4.4 SITIO 6**

##### **4.4.1 Ensayo de incubación**

###### **4.4.1.1 Variaciones en la concentración de N mineral con la dosis de N agregada**

La concentración de  $\text{NH}_4$  aumentó, cuando se incrementó la dosis de N agregado al suelo, este incremento fue cercano a los 0.23ppm/100g suelo por kg de N/ha (Fig. 10A). El  $\text{NH}_4$ , aumentó 93ppm en el suelo debido al agregado de N, esto significa que el 58% de la urea, pasó a  $\text{NH}_4$ , este aumento en la concentración de  $\text{NH}_4$  resultó altamente significativo (Cuadro 11).

La concentración de  $\text{NO}_3$  se incrementó, con el agregado de N, este aumento fue de 0.103ppm/100g suelo por kg de N/ha (Fig. 10B). El  $\text{NO}_3$  aumentó en total 44ppm, esto representa 27.5% de el total de urea agregada. Dicho aumento fue muy significativo (Cuadro 11).

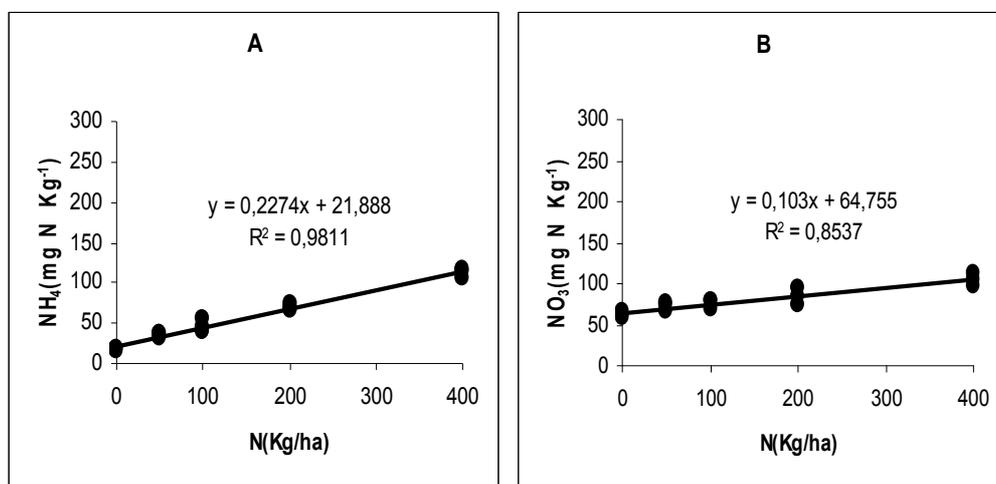


Figura 10: Concentración de formas minerales de N en el sitio 6: (A) NH<sub>4</sub> y (B) NO<sub>3</sub>.

#### 4.4.1.2 Variaciones en las formas de acidez del suelo

El pH del suelo en el sitio 6 aumentó al aumentar la dosis de N, esto se dio como consecuencia de la acumulación de NH<sub>4</sub>, como ya fue mencionado para los sitios anteriores. Dicho incremento fue de 0.0003 unidades por kg de N/ha agregado (Fig.11A). Este aumento fue de 0.1 unidades para aquellas dosis de fertilizante mas altas (200 y 400kg/ha N). El mismo no resultó significativo, según el ANOVA, pero si lo fue para el análisis de regresión.

En la figura 11(B) se puede observar como cambió la concentración de Al Int, el mismo disminuyó 0.0003meq por kg de N/ha agregado, pero esta disminución resultó ser no significativa.

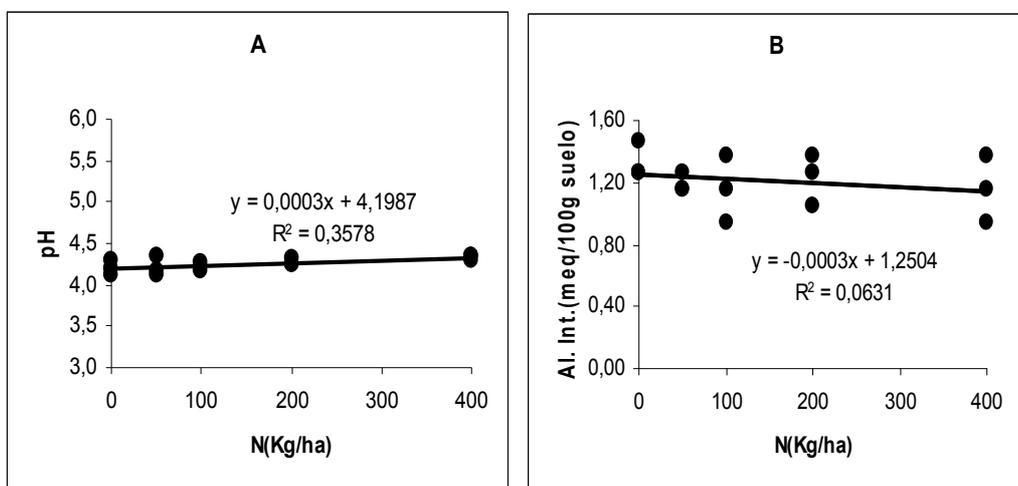


Figura 11: Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de laboratorio, para el sitio 6: (A) pH y (B) Al Int.

Cuadro N° 11: Concentraciones promedio de  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ , Ac Int, H Int y pH del sitio 6 para distintas dosis de N en el laboratorio

Dosis	$\text{NH}_4^+$	$\text{NO}_3^-$	pH	Ac. Int.	Al Int	H Int.
kg/h de N	mg N $\text{kg}^{-1}$ suelo			meq 100 g suelo <sup>-1</sup>		
0	18	62	4.2	1,52	1,33	0,19
50	35	72	4.2	1,34	1,19	0,15
100	47	76	4.2	1,17	1,16	0,01
200	69	85	4.3	1,29	1,23	0,06
400	111	106	4.3	1,27	1,16	0,12
Media	56	80	4,2	1,32	1,21	0,11
Desv. Est.	36	17	0,1	0,13	0,07	0,07
C.V.	64	21	1,2	9,8	5,84	67,6
ANOVA N (P)						
	<0.0001	0.0002	NS	NS	NS	NS
Coeficiente b Regresión.						
	$1.39 \times 10^{-12}$	$8.7 \times 10^{-7}$	0.0185	0.34	0.37	0.56

Nota: NS: no significativo=  $P > 0.1$

## 4.5 SITIO 8

### 4.5.1 Ensayo de incubación

#### 4.5.1.1 Variaciones en la concentración de N mineral con la dosis de N agregada

La concentración de  $\text{NH}_4$  en el suelo del sitio 8 aumentó significativamente 0.2336ppm/100g suelo por kg N/ha incorporado al mismo (Fig. 12 A). Si se tiene en cuenta el total de N agregado, el  $\text{NH}_4$  aumentó 95ppm, este aumento significa que el 59% del N agregado pasó a  $\text{NH}_4$  en este suelo.

La concentración de  $\text{NO}_3$  aumentó 0.1098ppm/100g suelo por kg de N/ha agregado al suelo (Fig. 12 B), 46ppm en total, esto es que el 29% del N agregado pasó a  $\text{NO}_3$ . El aumento del  $\text{NO}_3$  fue muy significativo para ambos análisis estadísticos.

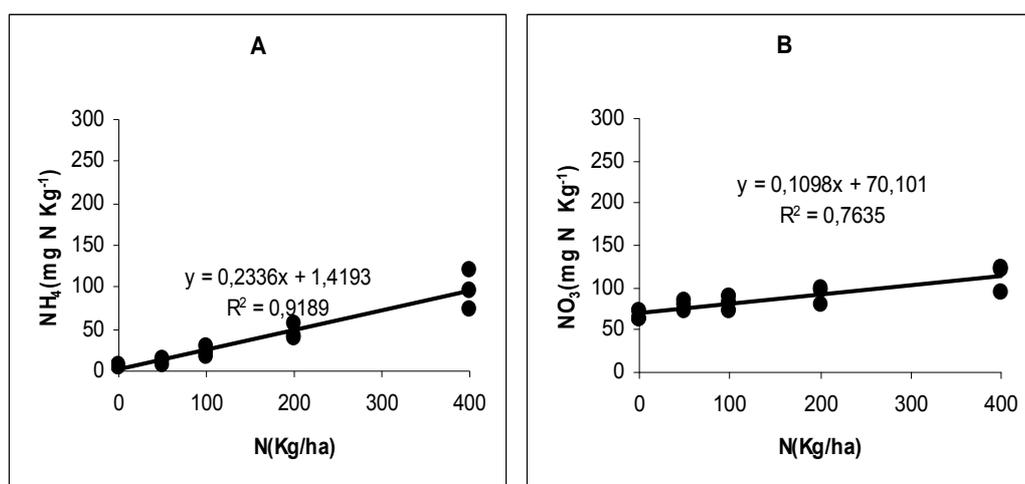


Figura 12: Concentración de formas minerales de N en el sitio 8: (A)  $\text{NH}_4$  y (B)  $\text{NO}_3$ .

#### 4.5.1.2 Variaciones en las formas de acidez del suelo

El responsable de que el pH del suelo aumente (Fig.15a), es el aumento del  $\text{NH}_4$  que se produjo, como ya se menciona anteriormente. El pH en el suelo del sitio 8 aumentó 0.0003 unidades por kg N/ha agregado. En el cuadro 8 se observa que el aumento de 0.1 unidades para los tratamientos de 200 y 400kg/ha, no resultó significativo. El Al Int disminuyó, 0.0003meq por kg N agregado, al igual que en el sitio 6, esta reducción en el Al Int no fue significativa, para los análisis estadísticos.

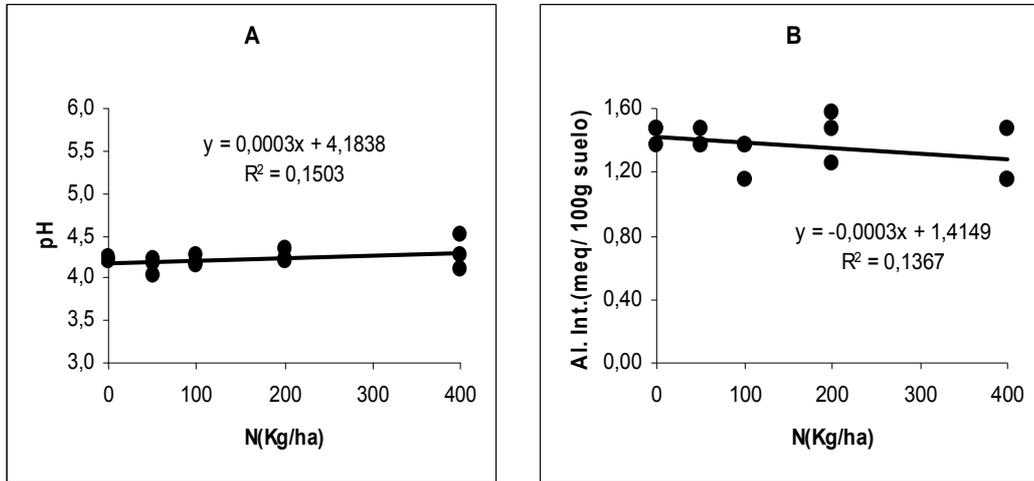


Figura 13: Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de laboratorio, para el sitio 8: (A) pH y (B) Al Int.

Cuadro N° 12: Concentraciones promedio de NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, Ac Int, H Int y pH del sitio 8 para distintas dosis de N en el laboratorio

Dosis	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	pH	Ac Int.	Al. Int.	H. Int.
kg/h de N	mg N kg <sup>-1</sup> suelo			meq 100 g suelo <sup>-1</sup>		
0	5	67	4,2	1,63	1,44	0,19
50	11	79	4,1	1,54	1,4	0,14
100	23	82	4,2	1,58	1,3	0,29
200	47	92	4,3	1,48	1,44	0,05
400	96	113	4,3	1,47	1,26	0,21
Media	36	87	4,2	1,54	1,37	0,18
Desv. Est.	37	17	0,1	0,07	0,08	0,09
C.V.	102	20	2,0	4,38	6,08	50,4
ANOVA N (P)						
	<0.0001	0.0026	NS	NS	NS	NS
Coeficiente b Regresión.						
	1.83x10 <sup>-8</sup>	2.07x10 <sup>-5</sup>	0.153	0.254	0.175	0.934

Nota: NS: no significativo= P>0.1

## 4.6 SITIO 5

### 4.6.1 Ensayo de incubación

#### 4.6.1.1 Variaciones en la concentración de N mineral con la dosis de N agregada

En el sitio 5 la concentración de  $\text{NH}_4$  aumentó 0.1705ppm/100g suelo por kg de N/ha agregado (Fig. 14 A). El  $\text{NH}_4$ , se incrementó 91ppm, lo cual representa el 57% del total de la urea agregada, este aumento fue muy significativo, y alcanzó su mayor valor con la dosis más alta de fertilizante (Cuadro 13).

En la figura 14(B) se puede observar que la concentración de  $\text{NO}_3$  tuvo un marcado aumento en este suelo, 0.3811ppm/100g suelo por kg de N/ha. El  $\text{NO}_3$  pasó a 155ppm, siendo esto el 97% del N total agregado. Como también se observa en el cuadro 9 estos cambios en la concentración de esta forma de N fue muy significativo. Se puede decir que esto fue consecuencia de la normal nitrificación del fertilizante agregado. Este sitio como el sitio 4 posee mayor poder buffer lo cual le permitió amortiguar los cambios, y de esta forma llegar a la etapa de incubación con pH mayor, produciéndose nitrificación.

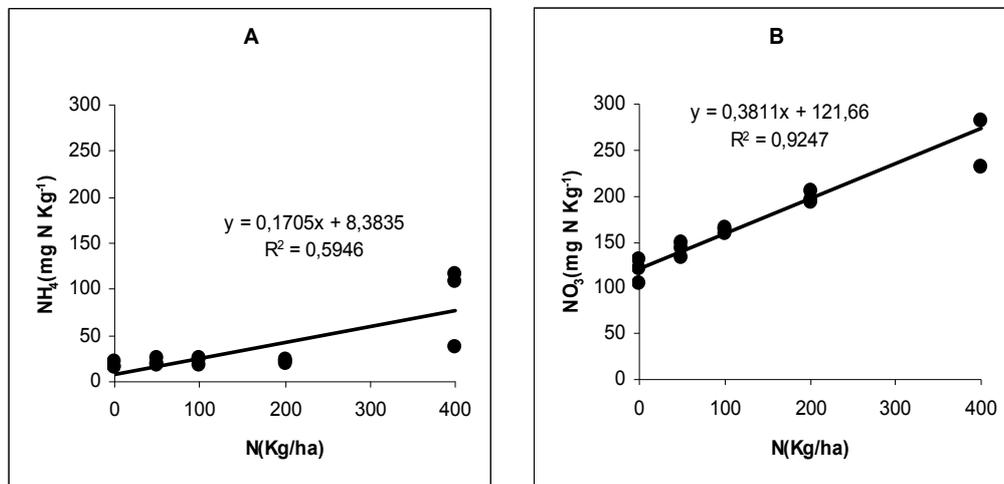


Figura 14: Concentración de formas minerales de N en el sitio 5: (A)  $\text{NH}_4$  y (B)  $\text{NO}_3$ .

#### 4.6.1.2 Variaciones en las formas de acidez del suelo

El pH descendió 0.0006 unidades por kg de N/ha agregado en este suelo (Fig. 15 A). El pH mas bajo se dio cuando se agregaron 400kg/ha de N, el mismo disminuyo 0.3 unidades, dichas reducciones fueron muy significativas (Cuadro 13).

En cuanto a la otra forma de acidez que presentan los suelo, el mismo aumentó con el agregado de N como era de esperar, dicho aumento fue de 0.0011meq por kg/ha de fertilizante (Fig.14B). El mayor incremento se produce en los tratamientos donde se agregó la dosis más alta, y el mismo resultado ser muy significativo (Cuadro13).

En cuanto a la Ac Int se observó que esta aumentó con el agregado de N, y que el mayor incremento de la misma se produjo con las dosis mayores, este aumento fue muy significativo (Cuadro 13).

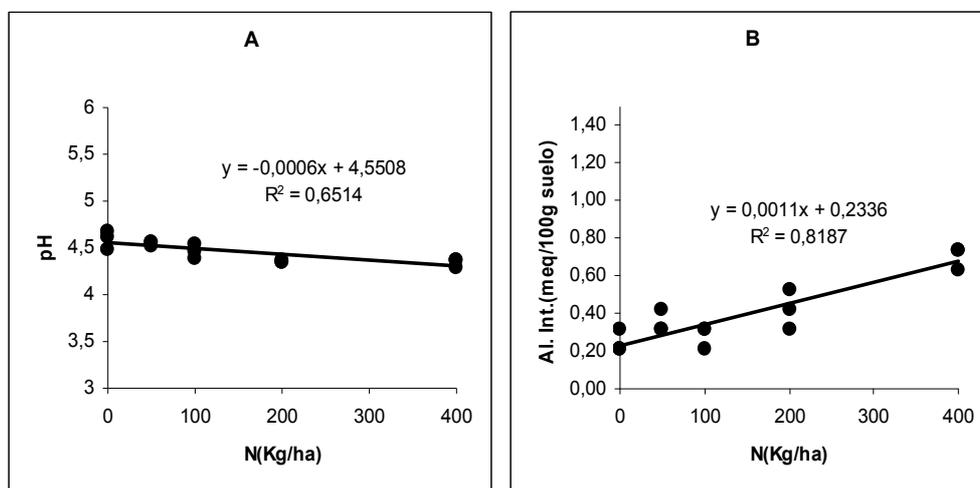


Figura 15: Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de campo, para el sitio 5: (A) pH y (B) Al Int.

Cuadro N° 13: Concentraciones promedio de NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, Ac Int, H Int y pH del sitio 5 para distintas dosis de N en el laboratorio

Dosis	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	pH	Ac. Inter.	Al. Int.	H Int.
kg/h de N	mg N kg <sup>-1</sup> suelo			meq 100 g suelo <sup>-1</sup>		
0	18	119	4.6	0,32	0,25	0,17
50	21	142	4.5	0,42	0,35	0,07
100	22	162	4.5	0,34	0,28	0,06
200	21	197	4.4	0,52	0,42	0,1
400	109	274	4.3	1,00	0,70	0,30
Media	38	179	4,5	0,52	0,40	0,14
Desv. Est.	40	60	0,1	0,28	0,18	0,10
C.V.	104	34	2,2	53,8	45,0	70,9
ANOVA N (P)						
	0.0062	<0.0001	0.0009	0.0005	0.0001	NS
Coeficiente b Regresión.						
	0.00076	1.12x10 <sup>-8</sup>	0.00027	1.53x10 <sup>-5</sup>	3.58x10 <sup>-6</sup>	0.0049

Nota: NS: no significativo= P>0.1

## 4.7 SITIO 9

### 4.7.1 Ensayo de incubación

#### 4.7.1.1 Variaciones en la concentración de N mineral con la dosis de N agregada

La concentración de NH<sub>4</sub> para el sitio 9 aumentó 0.0792ppm/100g suelo por kg/ha de fertilizante agregado (Fig. 16 A). En el cuadro 14 se observa que el NH<sub>4</sub> aumentó significativamente, 30ppm, este aumento representa 19% de la todo el N aportado al suelo.

La figura 16 (B) muestra el aumento de la concentración del NO<sub>3</sub> el mismo fue de 0.2884ppm/100g suelo por kg/ha de fertilizante agregado. En el cuadro 14 se observa que este aumento fue significativo, de 139ppm, o sea de 87% del total de urea agregada. Otra de las cosas que se desprenden del mismo cuadro es que el contenido de NO<sub>3</sub> era alto en este suelo antes de fertilizarlo.

La alta concentración de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$  también indica que la urea agregada fue transformada casi en su totalidad, pasando a  $\text{NO}_3^-$  ( $87 + 19$ )=106%. Este suelo se caracterizó por tener un mayor contenido de arcilla, y de MO que los suelos anteriores, lo que le confiere un mayor poder buffer, esto hace que la nitrificación ocurra con normalidad.

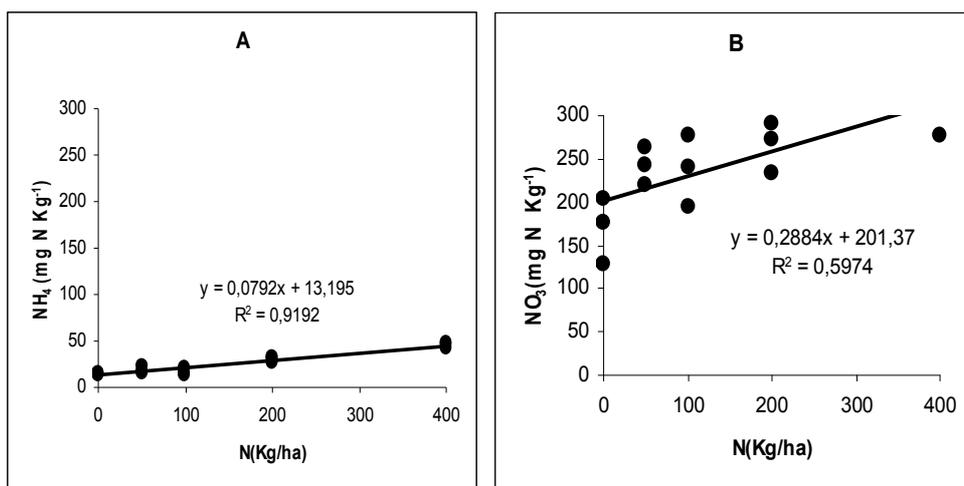


Figura 16: Concentración de formas minerales de N en el sitio 9: (A)  $\text{NH}_4^+$  y (B)  $\text{NO}_3^-$ .

#### 4.7.1.2 Variaciones en las formas de acidez del suelo

La figura 17A muestra la reducción que se produjo en el pH, como consecuencia del agregado de N. El mismo bajó 0.0008 unidades por kg de N/ha agregado. Del cuadro 10 se desprende que el pH disminuyó 0.3 unidades cuando se agregaron 400kg/ha de N y que este descenso fue significativo.

El Al Int aumentó 0.0001meq/100g suelo por kg de N/ha aportado al suelo, este aumento no resultó significativo según los análisis estadísticos. Aunque si fue significativo el aumento en Ac Int, si se compara el testigo con la dosis mas alta de N se vio que esta pasó de 0.67meq a 1.0meq respectivamente.

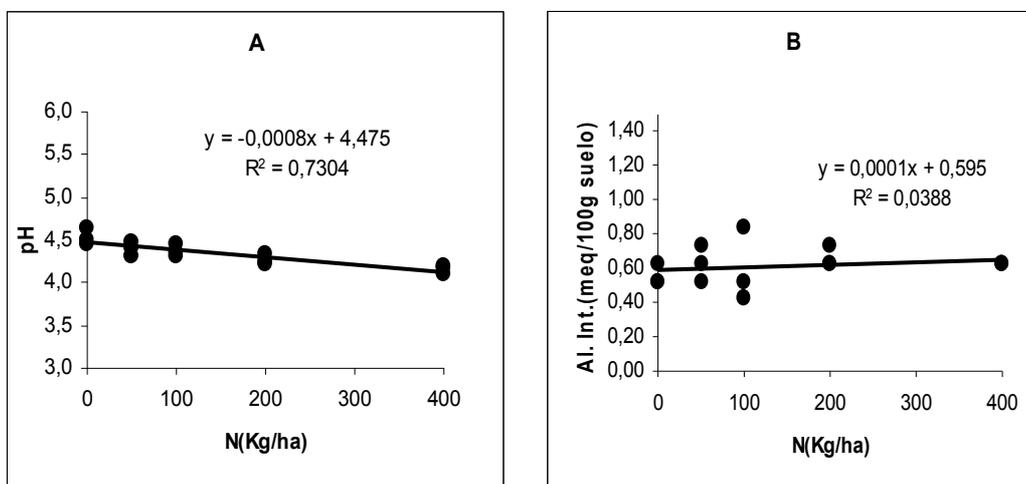


Figura 17: Variación en las formas de acidez del suelo en el ensayo de campo, para el sitio 9: (A) pH y (B) Al Int.

Cuadro N° 14: Concentraciones promedio de  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ , Ac Int, H Int y pH del sitio 9 para distintas dosis de N en el laboratorio

N	$\text{NH}_4$	$\text{NO}_3$	pH	Ac Inter.	Al Inter.	H Inter.
kg/h	mg N $\text{kg}^{-1}$ suelo			meq 100 g suelo $^{-1}$		
0	15	170	4.5	0,67	0,56	0,11
50	18	242	4.4	0,77	0,63	0,14
100	17	237	4.4	0,76	0,60	0,16
200	30	265	4.3	0,90	0,67	0,23
400	45	309	4.2	1,00	0,63	0,37
Media	25	245	4,4	0,82	0,62	0,20
Desv. Est.	13	50	0,1	0,13	0,04	0,10
C.V.	51	21	2,3	15,8	6,6	51,4
ANOVA N (P)						
	<0.0001	0.007	0.0013	NS	NS	NS
Coeficiente b Regresión.						
	$1.78 \times 10^{-8}$	0.0007	$4.95 \times 10^{-5}$	0.00024	0.48	0.0023

Nota: NS: no significativo=  $P > 0.1$

#### 4.8 COMPARACION DE SITIOS

Se realizó una comparación de los cambios de pH ocurridos por la fertilización nitrogenada en los distintos sitios. En este análisis se incluyó además de los datos del ensayo de incubación los valores de pH y  $\text{NO}_3^-$  del suelo en el muestreo de campo, cuando se recolectaron las muestras para su incubación. Se observó que, tal como se esperaba, en todos los sitios el pH disminuyó al aumentar la concentración de  $\text{NO}_3^-$  (producto de la fertilización), pero esta caída fue diferente para cada sitio (Figura 18).

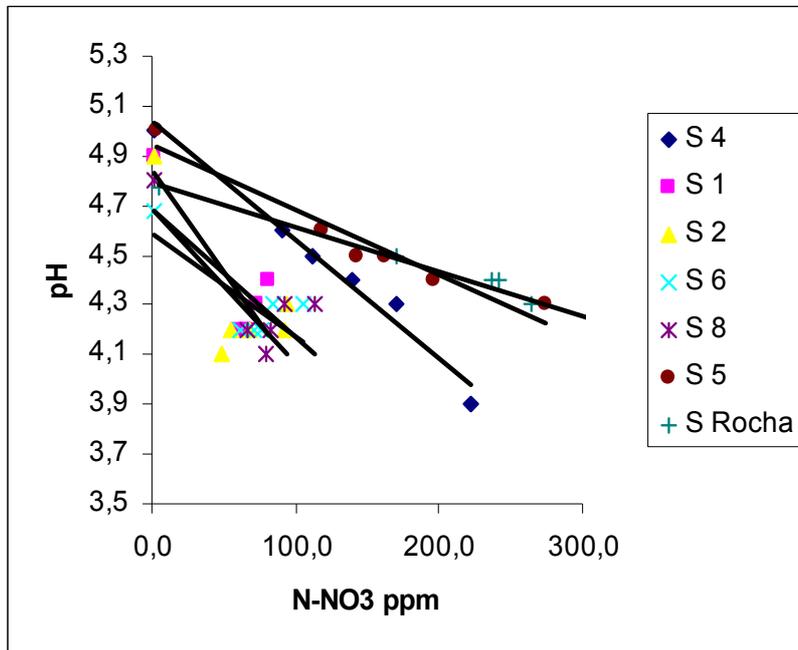


Figura 18: Variación del pH de distintos suelos en función de la concentración de  $\text{N-NO}_3$ .

Este comportamiento diferencial llevó a que se evaluaran variables que pudieran explicar estas diferencias de pendientes entre sitios (Cuadro 15). Un análisis de correlación simple entre ellas identificó que la variable calcio (Ca) fue la más correlacionada con la pendiente. En base a este análisis se identificó un modelo, que incluyó además de Ca, la variable pH inicial, que fue una de las menos relacionada con el Ca (Cuadro 15).

El modelo resultante incorporó ambas variables en forma significativa ( $P$  de pH inicial fue apenas superior al límite de 0,1), y el alto coeficiente de correlación ( $R^2$ ) evidencia que casi el 90% de la variación está explicado por estas dos variables (Cuadro 16 y Fig. 19). La línea 1:1 muestra que los valores estimados son muy similares a los observados.

Estos resultados concuerdan en general con lo observado por otros autores, que indican que las variables que mejor explican los cambios de pH del suelo son el pH original del mismo, la dosis de N aplicada y la frecuencia de aplicación. Y que en términos generales, los casos de descenso importante del pH se han observado en suelos arenosos, de pH original ácido, y cuando se han agregado dosis altas de fertilizantes amoniacales (Perdomo y Barbazan, 1999).

Pendiente	Arcilla	Limo	Arena	MO	Ca/BT	BT-Ca	BT	Ca	Ini c	
-0,168	-0,357	-0,383	0,3735	-0,043	-0,255	0,4709	0,4749	0,1917	1	pH Inic
0,8751	0,7295	0,7141	-0,7224	0,8713	0,6804	0,0641	0,6445	1		Ca
0,5341	0,3929	0,4107	-0,4076	0,4961	-0,085	0,8044	1			BT
0,01711	-0,054	-0,0189	0,02935	-0,0296	-0,6396	1				BT- Ca
0,716594	0,515086	0,483842	-0,49645	0,606019	1					Ca/B T
0,74426	0,91811	0,88362	-0,89762	1						MO
-0,716	-0,9978	-0,9993	1							Arena
0,7129	0,9948	1								Limo
0,70998	1									Arcilla

Cuadro N°: 15: Correlación entre las variables estudiadas

Cuadro N° 16: Análisis de Varianza de la regresión, y significación estadística de los parámetros del modelo hallado para predecir los cambios de pH por la fertilización.

	<i>Gl.</i>	<i>S.C.</i>	<i>C.M.</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	2,4672E-05	1,2336E-05	15,0108409	0,013823195
Residuos	4	3,2872E-06	8,2181E-07		
Total	6	2,7959E-05			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>
Intercepción	0,02326869	0,0152101	1,529821467	0,20080089
pH Inic	-	0,0031429	-	0,11711285
Ca	0,00091827	0,0001703	5,391357408	0,00572508

Coefficiente de determinación $R^2$	0,88242792
-------------------------------------	------------

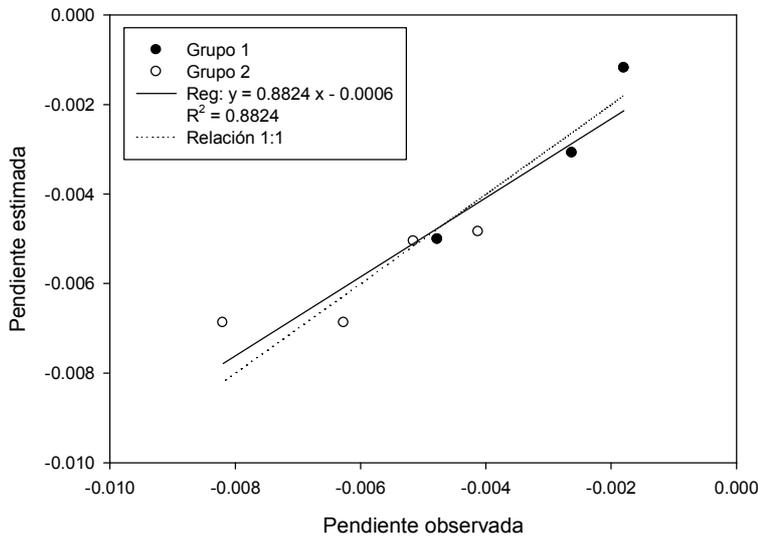


Figura 19: Pendiente observada versus pendiente estimada (línea llena) y relación 1:1 (línea punteada) para el modelo de regresión entre pH observado (y) versus pH inicial (x1) y Ca (x2). Los coeficientes del modelo y la significación estadística se presentan en el Cuadro 16.

Un análisis más detallado de estos resultados sugiere que los sitios evaluados se pueden agrupar en dos grupos. El grupo 1 integrado por los sitios 4, 5 y 9, que partiendo de un pH mayor tuvieron una caída más lenta del mismo por la fertilización, y un aumento relativamente mayor de Ac y Al Int. El resto de los sitios tuvo en común que el pH descendió a valores cercanos a 4.2 previo al agregado del fertilizante nitrogenado, solamente por efecto del  $\text{NO}_3$  producido durante la preparación de los suelos antes de la incubación. En este grupo el agregado de fertilizante nitrogenado no resultó en un incremento importante de la concentración de  $\text{NO}_3$ , debido a que el pH ya estaba por debajo del límite en el cual podían actuar las nitrosomonas. De hecho, en estos sitios se dio un pequeño incremento del pH por la fertilización, como consecuencia de la hidrólisis de la urea a  $\text{NH}_4$ . En estos sitios los cambios no fueron los esperados, ya que la aplicación de fertilizante nitrogenado generalmente acidifica los suelos, decreciendo el pH y disminuyendo conjuntamente el nivel de  $\text{Ca}^{2+}$  y aumentando el Al Int. Little (1997) obtuvo resultados similares cuando estudio el efecto de la fertilización con N en los suelos de Nueva Gales. Existió además cierta diferencia entre los sitios de este segundo grupo, ya que en algunos (Sitios 6 y 8) la fertilización produjo una disminución de la Ac y del Al Int, mientras que otros (Sitios 1 y 2) se dio un aumento de estas formas de acidez (Cuadro 17).

Este agrupamiento de sitios también se relacionó a diferencias de características físico-químicas entre ellos. Los sitios del grupo 1 eran suelos de textura franco-arenosa y presentan mayor contenido de MO que los demás (Cuadro 17). Estos suelos tendrían un mayor poder buffer, lo que les permitió mantener el pH en valores adecuados para que se produjera la nitrificación del fertilizante agregado. Los sitios del grupo 2 son de menor poder buffer, ya que poseen mayor porcentaje de arena y menor contenido de MO, por lo que en general presentaron, en valores absolutos, mayores pendientes (Figs. 17 y 18). En este agrupamiento existió solo una pequeña discrepancia, ya que la pendiente del sitio 4 (grupo 1) fue similar a la del Sitio 6 (grupo 2). Cabe señalar, sin embargo, que el Sitio 4 fue el que presentó los menores valores de MO y Arcilla de su grupo (dato no mostrado).

Cuadro N° 17: Valores promedio de las características de los dos grupos de suelos identificados

	<b>Grupo 1</b>	<b>Grupo 2</b>
<b>Ca</b>	4.9	1.1
<b>pH Inic</b>	4.9	4.8
<b>Ac. Int.</b>	0.6	1.1
<b>Al. Int.</b>	0.4	1.0
<b>BT</b>	9.9	4.7
<b>Ca/BT</b>	0.5	0.3
<b>BT-Ca</b>	3.8	1.6
<b>MO</b>	3.8	1.6
<b>Arena</b>	61	82
<b>Limo</b>	17.2	4.3
<b>Arcilla</b>	22.1	13.7
<b>Clase Textural</b>	FACAr	FAr

Un análisis similar se realizó para la relación Al Int y NO<sub>3</sub>, observándose que al considerar estas variables los sitios se pudieron agruparon en 3 grupos (Fig. 19). Aquellos donde ocurrió una notable reducción del Al Int por el agregado de N (sitios 6 y 8). Los sitios 1 y 2 forman otro grupo donde prácticamente no existió variación en la concentración de Al Int, y por último los sitios 4, 5 y 9 donde se dio un aumento en la concentración de Al Int.

Se identificó además un modelo muy similar al anterior (Fig. 18 y Cuadro 18), el que también incluyó como variables dependientes el pH inicial y el Ca, aunque en este caso el orden de significación se invirtió, siendo más significativo el pH inicial y no el Ca. Este resultado implica que las características de suelo que explican los cambios de pH son similares a las que explican la variación de Al int.

Según Hauch, citado por Garateguí (2002) pH inicial bajo del suelo enlentecen la tasa a la cual el nitrógeno es nitrificado, probablemente porque solo una parte de la población microbiana tiene la habilidad de adaptarse a un ambiente más ácido y que los factores químicos del suelo responsables de inhibir la nitrificación, muy probablemente son una combinación de la toxicidad del hidrógeno (H<sup>+</sup>) y aluminio (Al<sup>3+</sup>), juntos con una deficiencia de calcio.

Cuadro N° 18: Análisis de Varianza de la regresión, y significación estadística de los parámetros del modelo hallado para predecir los cambios de Al por la fertilización.

	Gl.	S.C.	C.M.	F	Valor crítico de F
Regresión	2	2.99547E-05	1.49774E-05	10.16182078	0.027043493
Residuos	4	5.89554E-06	1.47388E-06		
Total	6	3.58502E-05			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	0.076393621	0.020369336	3.750422674	0.019939765
pH Inic	0.015499961	0.004208966	3.682605119	0.02115552
Ca	0.000421129	0.000228095	1.846287791	0.138584421

Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.83555094
--	------------

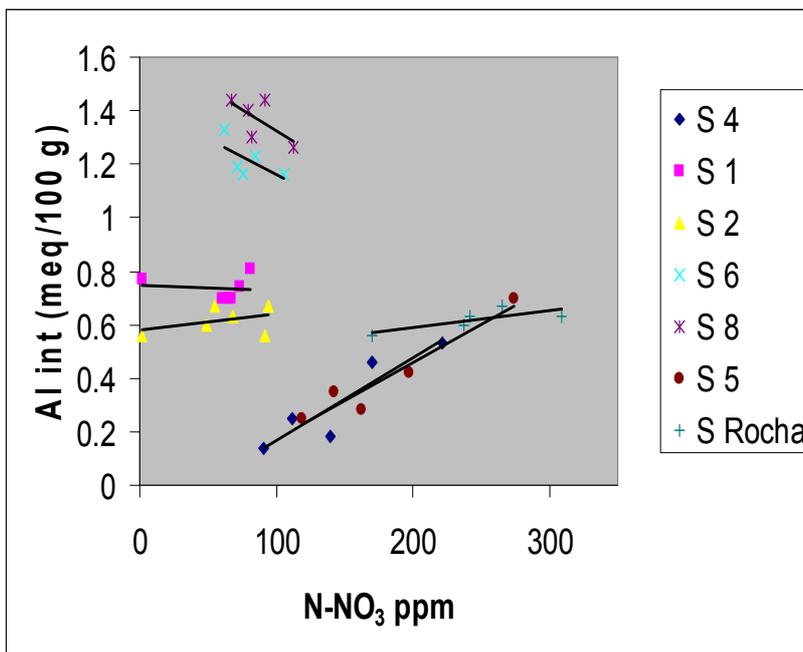


Figura 20: Variación del Al Int de distintos suelos en función de la concentración de N-NO<sub>3</sub>

Estudios realizados por Barak et al. (1997) mostraron la existencia de un significativo efecto de la fertilización nitrogenada en la acidificación del suelo. Observaron que la Ac Int depende de los niveles de fertilizante agregado. En ausencia de fertilización la Ac Int promedio era 0.12cmol/kg; cuando se agregaron 112 y 168kg N/ha/año, la Ac Int varió

0.48 y 1.58cmol/kg respectivamente. Cuando analizaron los efectos de la fertilización en la concentración de bases intercambiables y en la CIC vieron que el incremento de la acidez estaba relacionado con la disminución de las mismas, y que dicha reducción fue muy significativa en el caso del  $\text{Ca}^{2+}$ .

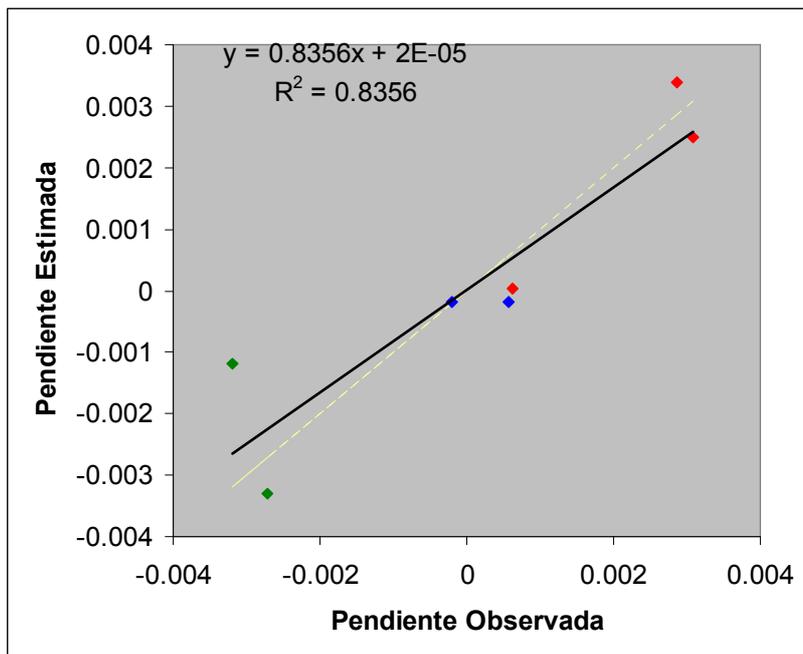


Figura 21: Pendiente observada versus pendiente estimada (línea llena) y relación 1:1 (línea punteada) para el modelo de regresión entre Al Int (y) versus pH inicial (x1) y Ca (x2). Los coeficientes del modelo y la significación estadística se presentan en el Cuadro 18.

## **5. CONCLUSIONES**

La variación en el pH del suelo depende del tipo de suelo y del tratamiento que recibieron los mismos, previo a la incubación en el laboratorio.

En aquellos suelos con mayor poder buffer no se produjo una reducción significativa del pH inicial, esto llevó a que los microorganismos del suelo pudieran nitrificar el fertilizante agregado, y como consecuencia se produjo una reducción de pH. La reducción de pH fue más acentuada cuando las dosis de N agregado fueron mayores (400kg/ha).

Los suelos con un contenido menor de MO, y textura arenosa sufrieron una caída muy significativa en el pH debido al pretratamiento, lo cual hizo que al momento de la incubación no existieran las condiciones necesarias para que se produjera la nitrificación del N agregado, esto llevó a una acumulación del mismo bajo la forma de  $\text{NH}_4$ , y el consecuente aumento del pH. En estos suelos cuanto mayor fue la dosis de N agregado mayor fue el aumento en el pH de los mismos.

En los ensayos de campo realizados para algunos de los sitios, se tuvo como resultado que la incorporación de N produjo una significativa reducción de pH en todos los sitios experimentales.

En los suelos donde el pH aumentó, la concentración de  $\text{NH}_4$  aumentó, los análisis de suelo mostraron que la mayor parte del N agregado quedó como  $\text{NH}_4$ . En los suelos donde se produjo reducción del pH, la urea agregada pasó en su mayoría a  $\text{NO}_3$ , por lo tanto se observó en estos una concentración mayor del mismo.

Para los sitios 6 y 8 en los cuales el pH aumentó debido al tratamiento realizado el Al Int, al igual que la Ac Int disminuyó como consecuencia del agregado de N. Mientras que para los sitios 1 y 2, en los cuales también se dio un incremento de pH; el Al Int y la Ac Int aumentó. Aunque en general se vio que estos cambios fueron muy leves.

En los suelos donde ocurrió reducción en el pH, la concentración de Al Int y de Ac Int aumentó. Contribuyendo esto a la acidificación del suelo.

La comparación de los siete sitios permitió diferenciar claramente dos grupos, según su comportamiento ante el agregado de N. En esta comparación se vio que al graficar el pH, considerando el pH inicial, en función de la concentración de  $\text{NO}_3$  el pH disminuyó en todos los sitios. Pero también se vio que esta reducción no es igual en todos los sitios.

En los suelos con menor poder buffer, se produjo una reducción muy rápida, esto hizo que fueran a la incubación con pH muy bajos, como fue dicho antes. (Sitios 1, 2, 6 y 8). Los suelos con un poder buffer mayor, sufrieron una caída paulatina en pH (Sitios 4, 5 y 9).

## **6. RESUMEN**

En el Uruguay el área destinada a la producción forestal se ha incrementado y la aplicación de fertilizantes durante los primeros años de plantación, se ha tornado en una práctica de manejo común en la producción. Las dos fuentes de N más usadas en silvicultura, son la urea y el nitrato de amonio, sobre todo a causa de sus altos contenidos de N. La aplicación de urea al suelo generalmente resulta en una rápida hidrólisis a amonio ( $\text{NH}_4$ ) (por ureasas del suelo) y como consecuencia, en la conversión de  $\text{NH}_4$  a nitrato ( $\text{NO}_3$ ). Independientemente de su origen, la nitrificación de  $\text{NH}_4$  a  $\text{NO}_3$  produce acidez en los suelos. Este estudio busca determinar el efecto de la fertilización nitrogenada en el pH y la acidez intercambiable (Ac Int) de suelos ubicados dentro de plantaciones forestales de *Eucalyptus* en Uruguay. Para lograr los objetivos del mismo se llevaron a cabo dos experimentos uno en campo y otro en laboratorio. En los ensayos de campo se aplicaron tres niveles de N como  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (0, 50 y 100 kg/ha) 6 meses antes de extraer las muestras para el análisis. En las muestras se determinó luego pH, Al int., H Int y Ac Int. Para los ensayos de incubación, se extrajeron muestras de suelo, de todos los sitios y de toda el área del cultivo pero exterior al ensayo, es decir que el área muestreada no había recibido fertilización nitrogenada post-siembra. Luego de que las muestras fueron traídas al galpón de Suelos de Montevideo (FAGRO), se procedió a tamizar las mismas utilizando una zaranda de malla de 4mm. Posteriormente se determinó el contenido de humedad de las mismas y la cantidad de agua necesaria que se debía agregar a las muestras de suelo para llevarlas a la humedad a CC. Las muestras de suelo se colocaron en bandejas a las que luego se les aplicó los tratamientos, que consistieron en cinco niveles de N equivalentes a 0, 50, 100, 200 y 400kg/ha utilizando como fertilizante urea. El fertilizante nitrogenado se agregó en forma de solución. Posteriormente, las bandejas fueron sometidas a incubación aerobia, durante 3 meses. Previo a su análisis, las muestras de suelo procedentes del campo y del ensayo de incubación fueron secadas. Finalmente se determinó  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ , pH, Al Int, y Ac Int. Los análisis de suelo de los ensayos de campo mostraron que la incorporación de N produjo una significativa reducción de pH en todos los sitios experimentales. Además de un aumento en Al Int y en Ac Int. Los resultados de los análisis de las muestras de suelo de la incubación indicaron que en aquellos suelos con mayor poder buffer, se produjo una significativa reducción del pH, como consecuencia del agregado de N, sobretodo para las dosis mas altas. Y también un significativo aumento de Ac Int y de Al Int. Mientras que en los suelos con un contenido menor de MO, y textura arenosa sufrieron una caída muy significativa en el pH debido al pretratamiento, lo cual hizo que al momento de la incubación no existieran las condiciones necesarias para que se produjera la nitrificación del N agregado, esto llevó a una acumulación del mismo bajo la forma de  $\text{NH}_4$ , aumentando el pH, y disminuyendo el Al Int y la Ac Int.

Palabras clave: pH; Nitrógeno; Aluminio intercambiable; Acidez intercambiable.

## 7. SUMMARY

In Uruguay, the area destination for forest plantation has been increased, and the application of fertilizing, during the plantation has turned into a practice of common dealing, in this production. The two N sources most used in forest plantation are urea and ammonium nitrate, due to the high amount of N. The urea application to the soil, generally, results in a quick ammonium hydrolysis, and as a consequence of this, the change of ammonium into nitrate. Independently of its origin, ammonium and nitrate nitrification produces acidity to the soil. This research tries to determine the effect of fertilization nitrogen in the pH and the interchangeable acidity of the *Eucalyptus* forest plantations soil in Uruguay. To achieve these aims, two experiments were done, one in the fields and the other in the laboratory. In the fields essays, 3 N levels were applied, such as ammonium and nitrate (0, 50, 100 kg N/ha), 6 months before extracting the sample, to the analysis. In the soil samples, pH, interchangeable aluminium, interchangeable hydrogen and interchangeable acidity were determined. For the incubation essays, soil samples from different parts of the field were extracted. It was extracted from the farming area, too, but exterior of the essay, it means that the samples taken in this area hadn't been fertilized after the harvest. After that, the samples were sieved with sifts. The levee of humidity was determined and the amount of water that must be added to reach the field capacity was established. The soil samples were put onto trays, and treatments were applied in them, that consisted on 5 levels of N, equivalent to 0, 50, 100, 200 and 400 kg N/ha, using urea as fertilizing. It was added as a solution. After that trays were submitted under aerobian incubation, for period of 3 months. Finally ammonium, nitrate, pH, interchangeable aluminium and interchangeable acidity were determined. The analysis of the field essays soil samples showed that N incorporation, produce a significant pH reduction in all the samples that were submitted under experiment. There was a considerable increasing in interchangeable aluminium and interchangeable acidity. The soil samples analysis results of the incubation showed that in those soils with more buffer power, a significant pH reduction was determined, as a consequence of the adding of N, over all in that samples were the doses was mayor. Interchangeable aluminium and interchangeable acidity had are considerable increasing too. In those soils with less content of organic matter and sandy texture suffered a significant pH decreasing due to the pre-treatment, that made that the incubation moment didn't have the necessary conditions for the nitrification of the N adding, this brought a N accumulation under the form of ammonium, increasing pH and decreasing interchangeable aluminium and interchangeable acidity.

Key words: pH; Nitrogen; Interchangeable acidity; Interchangeable aluminium

## **8. BIBLIOGRAFIA**

1. ATTIWILL, M.P.; ADAMS, A.M. 1996. Nutrition of Eucalypts. Melbourne, CSIRO. pp. 335-355.
2. BARACK, P.; JOBE O.B.; KRUEGER R.A.; PETERSON A.L.; LOIRD A.D. 1997. Effects of long- term soil acidification due to nitrogen fertilizer inputs in Wisconsin. Plant and Soil. 197: 61-69.
3. BLEVINS, R.L.; THOMAS, G.W.; CORNELIUSP, L. 1976. Influence of no tillage and nitrogen fertilization on certain soil properties after 5 years of continuous corn. Agronomy Journal. 69: 1488-1494.
4. BOLAN, N.S.; HEDLEY, M.J.; WHITE, R.E. 1991. Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis on legume based pastures. Plant and Soil. 134: 53-63.
5. BOUMAN, O.T.; CURTIN, D.; CAMPBELL, C.A.; BIEDERBECKV, O.; UKRAINETZ, H. 1995. Soil acidification from long- term use of anhydrous ammonia and urea. . Soil Science Society of American Journal. 59: 1488-1494.
6. BOWMAN, R.A.; HALVORSON, A.D. 1998. Soil chemical changes after nine years of differential N fertilization in no till dry land wheat corn fallow rotation. Soil Science. 163: 241-247.
7. BUNDY, L.G.; MEINSINGER, J.J. 1994 Nitrogen availability indices. In: s.e. Methods of soil analysis; chemical methods. s.n.t. cap. 51, pp. 951-984.
8. CHEN, C.; XU, Z.; HUGHES, J. 2002. Effects of nitrogen fertilization on soil nitrogen pools and microbial properties in a hoop pine (*Araucaria cunninghamii*) plantation in southeast Queensland, Australia. Journal Biology and Fertility of Soil. 36: 276-283.
9. GARATEGUI, A.L. 2002. Estudio de la respuesta al nitrogeno en *Eucaliptus dunii* Maiden, para la producción de biomasa. Tesis.Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 95p.
10. HELLING, C.S.; CHESTERS, G.; COREY, R.B. 1963. Contribution of organic matter and clay to soil cation exchange capacity as affected by the pH of the saturating solution. Soil Science Society of American Proceedings. 28: 517-520.

11. JARVIS, S.C.; ROBSON, A.D. 1983. The effects of nitrogen nutrition of plants on the development of acidity in Western Australia soil. Effects with subterranean clover grown under leaching conditions. *Australian Journal Research*. 34: 341-353.
12. JOHNSON, D.W.; EDWARDS, N.T.; TODD, D.E. 1980. Nitrogen mineralization, immobilization, and nitrification following urea fertilization of forest soil under field and laboratory conditions. *Soil Science Society of American Journal*. 44: 610-616.
13. LITTLE, I.P. 1997. The fate of nitrogen fertilisers added to red gradational soil at Batlow, New South Wales, and its implications with respect to soil acidity. *Australian Journal of Soil Research*. 35: 863-880.
14. MALHI, S.S.; NYBORG, M.; HARAPIAK, J.T. 1998. Effects of long- term N fertilizer induced acidification and liming on micronutrients in soil and in bromegrass hay. *Soil and Tillage Research*. 48:91-101.
15. MCANDREW, D.W.; MALHI, S.S. 1992. Long term N fertilization of a solonchic soil effects on chemical and biological properties. *Soil Biologic Biochemistry*. 24: 619-623.
16. MENGEL, K.; KIRBY E. 2001. *Principles of Plant Nutrition*. 5<sup>a</sup> ed. Bern Switzerland, International Potash Institute. pp. 397-431.
17. MITCHELL, A.D.; SMETHURST, P.J. 2004. Surface soil changes in base cation concentrations in fertilised hardwood and softwood plantations in Australia. *Forest Ecology and Management*. 191: 253-265.
18. MOCHOGE, B.O.; BEESE, F. 1986. Leaching of plant nutrients from an acid forest soil often nitrogen fertilizer application. *Plant and Soil*. 91:17-29.
19. MULVANEY, R.L.; KHAN, S.A. 1995. Nitrification of different nitrogen fertilizers. *In: Illinois Fertilizer Conference (5a., 1994 Illinois). Proceedings*. s.n.t. pp. 83-86
20. NOBLE, A.D.; SUMNER, E.; ALBA, A.K. 1988. The pH dependency of aluminium phytotoxicity alleviation by calcium sulphate. *Soil Science Society of American Journal*. 52: 1398-1402.

21. PERDOMO, C.; BARBAZAN, M. 1999. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 69p.
22. \_\_\_\_\_.; DURAN, J.; LLOVET, P. 2006. Soil and plant indices for predicting eucalipt response to nitrogen in Uruguay. *Soil Science Society of American Journal*. 71(5):111.
23. RHINE, E.D.; SIMS, G.H.; MULVANEY, R.L.; PRATT, E.J., 1998. Improving the Berthelot reaction for determining ammonium in soil extracts and water. *Soil Science Society of American Journal*. 62:473-480.
24. RILEY, D.; BARBER, S.A. 1971. Effect of ammonium and nitrate fertilization on phosphorus uptake as related to root induced pH changes at the root soil interface. *Soil Science Society of American Proceedings*. 35:302-306.
25. RINGROSE, C.; NEILSEN, W.A. 2005. Growth response of *Eucalyptus regnans* and soil changes following periodic fertilization. *Soil Science Society of American Journal*. 69: 1806-1812.
26. SCHWAB, A.P.; RAMSON, M.D.; OWENSBY, C.E. 1989. Exchange properties of Argiustoll effects of long term ammonium nitrate fertilizer. *Soil Science Society of American Journal*. 53: 1412-1417.
27. SHEPPARD, J.L.; CLOSSLEY, A.; HARVEY, J.F.; SKIBA, U.; COWARD, P.; INGLEBY, K. 2004. Effects of five years of frequent N additions, with or without acidity, on the growth and below ground dynamics of a young Sitka spruce stand growing on acid peat implications for sustainability. *Hydrology and Earth System Sciences*. 8: 377-391.
28. SMETHURST, P.J.; HERBERT, A.M.; BALLARD, L.M. 2001. Fertilization Effects on soil solution chemistry in three Eucalypt plantations. *Soil Science Society of American Journal*. 65: 795-804.
29. THINDH, S.; ROWELL, D.L. 1999. Effects of algae and fertilizer nitrogen on pH, eh and depth of aerobic soil in laboratory columns of a flooded sandy loam. *Journal Biology and Fertility of Soil*. 28: 162-168.

30. TOLEDO, S. 2007. Guía para la presentación de trabajos finales. ( en linea).  
Montevideo,Biblioteca de la Facultad de Agronomía. 23p.  
Consultado 20 sep.2007. Disponible en  
<http://biblioteca.fagro.edu.uy/files/Guia.pdf>

## 9. ANEXOS

### SITIO 1

**Cuadro 1**

SITIO	N(Kg./ha)	Rep.	pH	NO <sub>3</sub> suelo(ppm)	NH <sub>4</sub> suelo(ppm)	Ac. Int.(meq)	Al Int.(meq)	H. Int.(meq)
1	0	1	4,16	65	21	1,06	0,84	0,22
1	0	2	4,12	72	44	0,95	0,74	0,22
1	0	3	4,18	64	33	0,64	0,53	0,12
1	50	1	4,13	55	35	1,13	0,74	0,40
1	50	2	4,14	71	30	0,87	0,74	0,14
1	50	3	4,24	55	31	0,92	0,63	0,29
1	100	1	4,16	72	43	0,86	0,63	0,23
1	100	2	4,18	53	39	0,83	0,74	0,10
1	100	3	4,14	71	59	0,94	0,74	0,20
1	200	1	4,27	75	57	0,54	0,53	0,02
1	200	2	4,33	61	66	0,86	0,84	0,02
1	200	3	4,24	83	59	0,94	0,84	0,10
1	400	1	4,25	96	82	0,96	0,74	0,22
1	400	2	4,57	53	58	1,04	0,95	0,09
1	400	3	4,45	109	102	0,95	0,74	0,22

## SITIO 2

**Cuadro 2**

SITIO	N(Kg./ha)	Rep.	pH	NO <sub>3</sub> suelo(ppm)	NH <sub>4</sub> suelo(ppm)	meq Ac. Inter.	meq Al Inter.	meq . H. Inter.
2	0	1	4,12	46	21	0,85	0,63	0,22
2	0	2	4,11	57	20	0,54	0,53	0,02
2	0	3	4,18	46	30	0,67	0,63	0,04
2	50	1	4,29	62	28	0,82	0,63	0,19
2	50	2	4,12	51	30	0,79	0,74	0,06
2	50	3	4,19	51	22	0,87	0,63	0,24
2	100	1	4,18	74	41	0,83	0,53	0,31
2	100	2	4,22	53	34	0,83	0,63	0,20
2	100	3	4,17	77	37	0,76	0,74	0,03
2	200	1	4,26	96	59	0,60	0,53	0,07
2	200	2	4,16	87	64	0,70	0,63	0,07
2	200	3	4,22	95	56	0,58	0,53	0,06
2	400	1	4,25	82	109	0,73	0,63	0,10
2	400	2	4,33	95	99	1,08	0,95	0,14
2	400	3	4,25	106	108	0,49	0,42	0,07

## SITIO 6

**Cuadro 5**

SITIO	N(Kg./ha)	Rep.	pH	NO <sub>3</sub> en suelo(ppm)	NH <sub>4</sub> en suelo(ppm)	meq Ac. Inter.	meq Al Inter.	meq. H. Inter.
6	0	1	4,3	66	20	1,40	1,26	0,14
6	0	2	4,19	60	20	1,34	1,26	0,08
6	0	3	4,12	61	15	1,81	1,47	0,34
6	50	1	4,18	73	36	1,29	1,26	0,03
6	50	2	4,36	66	36	1,53	1,16	0,38
6	50	3	4,11	78	31	1,21	1,16	0,05
6	100	1	4,21	69	41	1,38	1,37	0,01
6	100	2	4,28	79	45	0,96	0,95	0,02
6	100	3	4,18	80	55	1,17	1,16	0,01
6	200	1	4,25	95	68	1,47	1,37	0,10

6	200	2	4,24	84	66	1,27	1,26	0,01
6	200	3	4,31	75	73	1,13	1,05	0,08
6	400	1	4,35	114	116	1,48	1,37	0,12
6	400	2	4,35	105	113	1,04	0,95	0,09
6	400	3	4,3	98	105	1,29	1,16	0,14

## SITIO 8

**Cuadro 7**

SITIO	N(Kg./ha)	Rep.	pH	NO <sub>3</sub> en suelo(ppm)	NH <sub>4</sub> en suelo(ppm)	meq Ac. Inter.	meq Al Inter.	meq. H. Inter.
8	0	1	4,2	74	5	1,81	1,37	0,44
8	0	2	4,2	64	4	1,57	1,47	0,10
8	0	3	4,3	63	6	1,50	1,47	0,03
8	50	1	4,2	80	15	1,48	1,47	0,01
8	50	2	4,2	72	12	1,72	1,37	0,36
8	50	3	4,0	84	8	1,41	1,37	0,04
8	100	1	4,3	72	29	1,60	1,37	0,23
8	100	2	4,2	83	22	1,41	1,16	0,25
8	100	3	4,2	90	18	1,74	1,37	0,38
8	200	1	4,2	100	43	1,62	1,58	0,04
8	200	2	4,2	96	39	1,56	1,47	0,09
8	200	3	4,3	80	57	1,28	1,26	0,02
8	400	1	4,1	124	73	1,65	1,16	0,50
8	400	2	4,3	121	97	1,54	1,47	0,07
8	400	3	4,5	95	120	1,20	1,16	0,05

## SITIO 4

**Cuadro 9**

SITIO	N(Kg./ha)	Rep.	pH	NO <sub>3</sub> en suelo(ppm)	NH <sub>4</sub> en suelo(ppm)	meq Ac. Inter.	meq Al Inter.	meq. H. Inter.
4	0	1	4,61	96	5	0,17	0,11	0,06
4	0	2	4,51	88	8	0,22	0,21	0,01
4	0	3	4,55	89	10	0,17	0,11	0,06
4	50	1	4,55	113	5	0,33	0,32	0,01
4	50	2	4,4	108	7	0,23	0,21	0,02
4	50	3	4,53	114	4	0,31	0,21	0,10
4	100	1	4,29	152	10	0,27	0,21	0,06
4	100	2	4,41	120	8	0,55	0,11	0,45
4	100	3	4,46	149	5	0,29	0,21	0,08
4	200	1	4,21	192	7	0,59	0,53	0,07

4	200	2	4,3	156	9	0,61	0,53	0,09
4	200	3	4,29	163	8	0,36	0,32	0,04
4	400	1	4,25	235	24	0,77	0,74	0,04
4	400	2	3,15	191	15	0,61	0,42	0,19
4	400	3	4,23	240	17	0,62	0,42	0,20

## SITIO 5

**Cuadro 11**

SITIO	N(Kg./ha)	Rep.	pH	NO <sub>3</sub> en suelo(ppm)	NH <sub>4</sub> en suelo(ppm)	meq Ac. Inter.	meq Al Inter.	meq. H. Inter.
5	0	1	4,49	121	15	0,36	0,32	0,04
5	0	2	4,67	104	22	0,30	0,21	0,09
5	0	3	4,61	131	16	0,30	0,21	0,09
5	50	1	4,55	149	26	0,37	0,32	0,05
5	50	2	4,52	133	17	0,49	0,32	0,17
5	50	3	4,56	143	20	0,42	0,42	0,00
5	100	1	4,38	160	23	0,33	0,32	0,01
5	100	2	4,53	165	26	0,42	0,32	0,10
5	100	3	4,46	163	17	0,29	0,21	0,08
5	200	1	4,36	205	19	0,45	0,42	0,03
5	200	2	4,34	192	24	0,67	0,53	0,15
5	200	3	4,35	195	21	0,46	0,32	0,14
5	400	1	4,37	307	109	1,20	0,74	0,46
5	400	2	4,29	232	102	0,72	0,63	0,09
5	400	3	4,36	281	116	1,08	0,74	0,34

## SITIO 9

**Cuadro 12**

SITIO	N(Kg./ha)	Rep.	pH	NO <sub>3</sub> en suelo(ppm)	NH <sub>4</sub> en suelo(ppm)	meq Ac. Inter.	meq Al Inter.	meq. H. Inter.
9	0	1	4,5	177	15	0,68	0,53	0,16
9	0	2	4,7	129	14	0,62	0,53	0,10
9	0	3	4,5	204	16	0,71	0,63	0,08
9	50	1	4,3	263	22	0,77	0,74	0,03
9	50	2	4,5	244	16	0,84	0,63	0,21
9	50	3	4,4	219	17	0,69	0,53	0,17
9	100	1	4,4	277	20	0,84	0,84	0,00
9	100	2	4,5	194	14	0,74	0,42	0,32

9	100	3	4,3	239	16	0,70	0,53	0,17
9	200	1	4,2	271	31	0,99	0,74	0,26
9	200	2	4,3	290	34	0,86	0,63	0,23
9	200	3	4,3	233	27	0,83	0,63	0,20
9	400	1	4,2	277	45	0,87	0,63	0,24
9	400	2	4,1	346	48	1,16	0,63	0,53
9	400	3	4,2	303	42	0,96	0,63	0,33

## 5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

### Sitio 1

#### pH

Cuadro	de	Análisis	de	la	Varianza
F.V.	SC	Gl.	CM	F	p-valor
Modelo	0,16	4	0,04	6,09	0,0095
N(Kg./ha)	0,16	4	0,04	6,09	0,0095
Error	0,07	10	0,01		
Total	0,23	14			

#### NO3

Cuadro	de	Análisis	de	la	Varianza
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1165,92	4	291,48	1,21	0,3665
N(Kg./ha)	1165,92	4	291,48	1,21	0,3665
Error	2414,48	10	241,45		
Total	3580,40	14			

#### NH4

Cuadro	de	Análisis	de	la	Varianza
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	5063,17	4	1265,79	8,42	0,0031
N(Kg./ha)	5063,17	4	1265,79	8,42	0,0031
Error	1504,11	10	150,41		
Total	6567,29	14			

#### Ac. Inter

Cuadro	de	Análisis	de	la	Varianza
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,08	4	0,02	0,91	0,4938
N(Kg./ha)	0,08	4	0,02	0,91	0,4938
Error	0,23	10	0,02		
Total	0,31	14			

<b><u>Al. Inter</u></b>					
<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,02	4	0,01	0,39	0,8137
N(Kg./ha)	0,02	4	0,01	0,39	0,8137
Error	0,16	10	0,02		
Total	0,19	14			

<b><u>H Int.</u></b>					
<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,08	4	0,02	3,15	0,0644
N(Kg./ha)	0,08	4	0,02	3,15	0,0644
Error	0,07	10	0,01		
Total	0,15	14			

**Sitio2****pH**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,03	4	0,01	2,72	0,0906
N(Kg./ha)	0,03	4	0,01	2,72	0,0906
Error	0,03	10	2,8E-03		
Total	0,06	14			

**NO3**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	5253,08	4	1313,27	15,43	0,0003
N(Kg./ha)	5253,08	4	1313,27	15,43	0,0003
Error	850,91	10	85,09		
Total	6103,99	14			

**NH4**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	13584,99	4	3396,25	154,60	<0,0001
N(Kg./ha)	13584,99	4	3396,25	154,60	<0,0001
Error	219,68	10	21,97		
Total	13804,67	14			

**Ac. Inter.**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,09	4	0,02	0,89	0,5031
N(Kg./ha)	0,09	4	0,02	0,89	0,5031
Error	0,24	10	0,02		
Total	0,32	14			

**Al. Inter.**

<b>Cuadro</b>	<b>De</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,02	4	0,01	0,34	0,8450
N(Kg./ha)	0,02	4	0,01	0,34	0,8450
Error	0,18	10	0,02		
Total	0,21	14			

**H Int.**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,03	4	0,01	0,79	0,5558
N(Kg./ha)	0,03	4	0,01	0,79	0,5558
Error	0,08	10	0,01		
Total	0,11	14			

**Sitio 4****pH**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,87	4	0,22	2,62	0,0991
N(Kg./ha)	0,87	4	0,22	2,62	0,0991
Error	0,83	10	0,08		
Total	1,70	14			

**NO<sub>3</sub>**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	Gl	CM	F	p-valor
Modelo	31794,93	4	7948,73	27,73	<0,0001
N(Kg./ha)	31794,93	4	7948,73	27,73	<0,0001
Error	2866,00	10	286,60		
Total	34660,93	14			

**NH4**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	Gl	CM	F	p-valor
Modelo	331,07	4	82,77	10,80	0,0012
N(Kg./ha)	331,07	4	82,77	10,80	0,0012
Error	76,67	10	7,67		
Total	407,73	14			

**Ac. Inter**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>La</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,44	4	0,11	9,58	0,0019
N(Kg./ha)	0,44	4	0,11	9,58	0,0019
Error	0,12	10	0,01		
Total	0,56	14			

**Al. Inter.**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,36	4	0,09	7,56	0,0045
N(Kg./ha)	0,36	4	0,09	7,56	0,0045
Error	0,12	10	0,01		
Total	0,47	14			

**Sitio 6****pH**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,03	4	0,01	1,41	0,2988
N(Kg./ha)	0,03	4	0,01	1,41	0,2988
Error	0,06	10	0,01		
Total	0,09	14			

**NO3**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3221,21	4	805,30	15,99	0,0002
N(Kg./ha)	3221,21	4	805,30	15,99	0,0002
Error	503,73	10	50,37		

Total	3724,94	14			
-------	---------	----	--	--	--

#### NH4

Cuadro	de	Análisis	de	la	Varianza
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	15585,64	4	3896,41	172,95	<0,0001
N(Kg./ha)	15585,64	4	3896,41	172,95	<0,0001
Error	225,29	10	22,53		
Total	15810,93	14			

#### Al. Inter

Cuadro	de	Análisis	de	la	Varianza
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,06	4	0,02	0,60	0,6730
N(Kg./ha)	0,06	4	0,02	0,60	0,6730
Error	0,26	10	0,03		
Total	0,33	14			

<b>H Int.</b>					
Cuadro	de	Análisis	de	la	Varianza
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,06	4	0,01	1,26	0,3468
N(Kg./ha)	0,06	4	0,01	1,26	0,3468
Error	0,12	10	0,01		
Total	0,18	14			

#### **Sitio 8**

##### pH

Cuadro	de	Análisis	de	la	Varianza
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,04	4	0,01	0,81	0,5484
N(Kg./ha)	0,04	4	0,01	0,81	0,5484
Error	0,12	10	0,01		
Total	0,16	14			

##### NO3

Cuadro	de	Análisis	de	la	Varianza
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3682,06	4	920,51	8,76	0,0026
N(Kg./ha)	3682,06	4	920,51	8,76	0,0026
Error	1050,98	10	105,10		

Total	4733,04	14			
-------	---------	----	--	--	--

#### NH4

Cuadro	de	Análisis	de	la	Varianza
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	16435,09	4	4108,77	29,89	<0,0001
N(Kg./ha)	16435,09	4	4108,77	29,89	<0,0001
Error	1374,53	10	137,45		
Total	17809,62	14			

#### Ac. Inter.

Cuadro	de	Análisis	de	la	Varianza
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,05	4	0,01	0,39	0,8097
N(Kg./ha)	0,05	4	0,01	0,39	0,8097
Error	0,34	10	0,03		
Total	0,39	14			

#### Al. Inter.

Cuadro	de	Análisis	de	la	Varianza
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,08	4	0,02	1,25	0,3512
N(Kg./ha)	0,08	4	0,02	1,25	0,3512
Error	0,16	10	0,02		
Total	0,24	14			

#### H Int

Cuadro	de	Análisis	de	la	Varianza
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,09	4	0,02	0,74	0,5879
N(Kg./ha)	0,09	4	0,02	0,74	0,5879
Error	0,32	10	0,03		
Total	0,41	14			

#### Sitio 9

#### pH

Cuadro	de	Análisis	de	la	Varianza
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,24	4	0,06	10,58	0,0013
N(Kg./ha)	0,24	4	0,06	10,58	0,0013
Error	0,06	10	0,01		

Total	0,29	14			
-------	------	----	--	--	--

**NO3**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	30352,02	4	7588,00	6,65	0,0070
N(Kg./ha)	30352,02	4	7588,00	6,65	0,0070
Error	11406,19	10	1140,62		
Total	41758,21	14			

**NH4**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1962,06	4	490,52	56,97	<0,0001
N(Kg./ha)	1962,06	4	490,52	56,97	<0,0001
Error	86,10	10	8,61		
Total	2048,17	14			

**Ac. Inter.**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,20	4	0,05	5,76	0,0114
N(Kg./ha)	0,20	4	0,05	5,76	0,0114
Error	0,09	10	0,01		
Total	0,28	14			

**Al. Inter.**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,02	4	4,8E-03	0,36	0,8308
N(Kg./ha)	0,02	4	4,8E-03	0,36	0,8308
Error	0,13	10	0,01		
Total	0,15	14			

**H Int.**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,13	4	0,03	2,76	0,0882
N(Kg./ha)	0,13	4	0,03	2,76	0,0882
Error	0,12	10	0,01		
Total	0,24	14			

**Sitio 5****pH**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,15	4	0,04	11,45	0,0009
N(Kg./ha)	0,15	4	0,04	11,45	0,0009
Error	0,03	10	3,3E-03		
Total	0,18	14			

**NO3**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	43619,86	4	10904,96	31,17	<0,0001
N(Kg./ha)	43619,86	4	10904,96	31,17	<0,0001
Error	3498,58	10	349,86		
Total	47118,44	14			

**NH4**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	10770,06	4	2692,52	6,91	0,0062
N(Kg./ha)	10770,06	4	2692,52	6,91	0,0062
Error	3895,14	10	389,51		
Total	14665,20	14			

**Ac. Inter.**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,94	4	0,23	13,50	0,0005
N(Kg./ha)	0,94	4	0,23	13,50	0,0005
Error	0,17	10	0,02		
Total	1,11	14			

**Al. Inter**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,39	4	0,10	19,14	0,0001
N(Kg./ha)	0,39	4	0,10	19,14	0,0001
Error	0,05	10	0,01		
Total	0,45	14			

**H Int.**

<b>Cuadro</b>	<b>de</b>	<b>Análisis</b>	<b>de</b>	<b>la</b>	<b>Varianza</b>
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,12	4	0,03	2,96	0,0748
N(Kg./ha)	0,12	4	0,03	2,96	0,0748
Error	0,10	10	0,01		
Total	0,22	14			