

# EFFECTO DE LAS RELACIONES NITROGENADAS EN LA TOLERANCIA A ALUMINIO EN DOS CULTIVARES DE TRIGO CRECIDOS EN SOLUCIÓN NUTRITIVA<sup>1</sup>

## Effect of N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ratios in Al-tolerance of two wheat cultivars under nutrient solutions

Felipe Gallardo A.<sup>2</sup>, Mario Pino B.<sup>2</sup>, Marysol Alvear Z.<sup>2</sup> y Fernando Borie B.<sup>2</sup>

### SUMMARY

Al toxicity is considered as one of the most harmful factors in the growth and development of plants cultivated in soils with increased acidity. Between the options for overcoming such limitation it is possible to visualize soil liming, the rationalization of the type of fertilizers employed and the use of Al-tolerant plants.

The response of two wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars (Pitufo BAER and Antihue INIA) growing 26 days in nutrient solution at four levels of Al (0; 50; 300 and 900  $\mu$ M) and three NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup> mM ratios 0,31/3,71 (N<sub>1</sub>), 0,54/0,54 (N<sub>2</sub>) and 3,71/0,31 (N<sub>3</sub>) were evaluated at two pH levels (4,8 and 6,0).

The response of the same cultivars was also evaluated by using two Al levels (0 and 100  $\mu$ M) and N<sub>1</sub> and N<sub>2</sub> ratios with daily pH correction. Antihue INIA it was considered more Al sensitive wheat cultivar than Pitufo BAER. Aluminum affected the growth of root length in both wheat cultivars especially when nutrient solution had the highest NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ratio.

**Key words:** NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ratio, Al tolerance, wheat, *Triticum aestivum* L., nutrient solution.

### INTRODUCCIÓN

La acidificación de los suelos de interés agrícola provoca un efecto fitotóxico directo de los H<sup>+</sup> asociado con el incremento de los niveles de Al y Mn tóxico, además de una menor disponibilidad de fósforo, calcio y magnesio.

La toxicidad producida por aluminio se considera como el factor limitante más importante en el crecimiento y desarrollo de las plantas en suelos con elevada acidez (Cameron *et al.*, 1986; Wright, 1989; Kinraide, 1991). La presencia de este elemento en la solución del suelo incide negativamente en el desarrollo radical, lo que afecta directamente a la nutrición mineral de las plantas (Fageria *et al.*, 1988; Foy, 1988), al verse seriamente modificados la absorción y metabolismo de los nutrientes (Alexander *et al.*, 1991). Específicamente, el aluminio afecta la

absorción y asimilación de nitrógeno en las plantas (Foy y Fleming, 1982; Rode y Runge, 1991), a la vez que afecta significativamente la actividad microbiana que ocurre a nivel de la rizósfera (Foy, 1988; Robson y Abbott, 1989). La absorción preferencial de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> ó de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> pareciera estar relacionada con el comportamiento diferencial de los cultivares con relación a la tolerancia al aluminio. La preferencia por la absorción de una de las formas de nitrógeno tiene una componente varietal y de especie vegetal, asociada con el balance catiónico/aniónico (Rode y Runge, 1991; Marchen 1995). Por lo tanto, cabe esperar que la tolerancia o sensibilidad de algunas especies vegetales pueda ser modificada en función de la variación de la relación amonio/nitrato en el medio de cultivo (Keltjens y Ulden, 1987).

Adicionalmente otros factores del medio como pH, formación de precipitados, efecto protector de otros iones, fuerza iónica de la solución, presencia de quelatos, además de la especie vegetal y genotipo de la planta, pueden influir significativamente en la modificación de la respuesta de la planta a aluminio (Foy, 1983; 1988), toda vez que tales factores influyen en la formación de las diferentes formas de Al, unas más tóxicas que otras.

<sup>1</sup>Recepción de originales: 5 de marzo de 1996.

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad de La Frontera, DIUFRO, Proyecto N° 9217 y Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología, FONDECYT, Proyecto N° 1940840.

<sup>2</sup>Departamento de Ciencias Químicas. Universidad de La Frontera. Casilla 54-D. Temuco. Chile.

Considerando los antecedentes presentados, este trabajo tuvo por objetivo evaluar, mediante el uso de soluciones nutritivas, el comportamiento varietal de plantas de trigo en presencia de aluminio cultivadas con diferentes relaciones de N-amoniaco y N-nítrico.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron dos experimentos utilizando dos cultivares de trigo (*Triticum aestivum* L.) de hábito de crecimiento primaveral Pitufo BAER y Antihue INIA. Semillas de ambos cultivares se esterilizaron en superficie utilizando  $\text{HgCl}_2$  y se dejaron en bandejas con arena lavada. Después de cinco días se seleccionaron seis plántulas y se colocaron en macetas de un litro de capacidad, conteniendo solución nutritiva de la siguiente composición iónica: 0,75 K; 1,27 Ca; 0,27 Mg; 0,12 S- $\text{SO}_4^{2-}$ ; 0,10 P- $\text{HPO}_4^{2-}$  en mM y 17,9 Fe; 6,6 B; 2,4 Mn; 0,6 Zn; 0,2 Cu; 0,1 Mo en  $\mu\text{M}$  (Taylor y Foy, 1985a).

**Ensayo 1:** Elección de la concentración de aluminio y de la razón nitrogenada.

Se consideró como tratamientos los niveles 0, 50, 300 y 900  $\mu\text{M}$  de Al y tres relaciones de  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ : 0,31/3,71 ( $\text{N}_1$ ), 0,54/0,54 ( $\text{N}_2$ ) y 3,71/0,31 ( $\text{N}_3$ ), en concentraciones mM. El pH de la solución nutritiva se ajustó a 4,8 y  $6,0 \pm 0,1$ , respectivamente. De allí que el diseño experimental correspondió al arreglo factorial de dos variedades de trigo, dos niveles de pH, 4 niveles de aluminio y tres relaciones de  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ , en un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones.

**Ensayo 2:** Efecto de la corrección de pH utilizando dos niveles de aluminio y dos relaciones nitrogenadas.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo 1 se eligieron 2 concentraciones de Al y 2 razones nitrogenadas. Se consideró como tratamiento los niveles 0 y 100  $\mu\text{M}$  de Al y dos relaciones de  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  (0,31/3,71 y 3,71/0,31), en un diseño enteramente al azar con cuatro repeticiones.

Ambos experimentos se realizaron en una cámara de crecimiento con temperatura controlada de  $25 \pm 1$  °C y un fotoperíodo de 16 horas. La solución nutritiva se renovó cada cinco días, basándose en la disminución del macronutriente limitante (P). Al término del experimento, después de 26 días, las plantas fueron divididas en parte aérea y raíz determinándose la longitud de ambas partes las que se colocaron en estufa a 65 °C por un período de 48 horas, cuantificándose el peso de raíz y parte aérea.

Se consideró como 100% CRR (Crecimiento Radical Relativo) la longitud radical de las plantas cultivadas en solución nutritiva en ausencia de Al con pH ajustado a 6,0.

En ambos experimentos, se analizaron los datos considerando los promedios de crecimiento radical y peso de materia seca de las plantas contenidas en cada unidad experimental. Utilizándose en ambos ensayos el test de Duncan ( $P \leq 0,05$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estudio de la tolerancia a aluminio en diversos cultivares resulta complejo, puesto que, como lo han señalado Klotz y Horst (1988), es necesario considerar diversas variables, entre ellas, la fuente nitrogenada, la composición iónica, el pH de la solución y la velocidad de crecimiento de las plantas en ausencia de aluminio. En este estudio se ensayaron tres concentraciones de aluminio y tres relaciones nitrogenadas, las que se encuentran en los rangos más utilizados en la literatura (Foy *et al.*, 1990; Miyasaka *et al.*, 1991; Rode y Runge, 1991). Los resultados obtenidos en el Ensayo 1 indican que el cultivar Antihue (Figura 1b), presenta en presencia de aluminio, un menor largo radical relativo (CRR) en relación al cultivar Pitufo, aunque ambos cultivares se vieron afectados por la presencia de protones (0  $\mu\text{M}$  de Al). Se sabe que ambos factores afectan al crecimiento radical, aunque pareciera haber consenso en que el factor adverso más decisivo es el aluminio (Wright, 1989; Ritchie, 1989), puesto que afecta especialmente a la formación de raíces secundarias, afectando la absorción de agua y nutrientes así como también inhibe, en ocasiones, el crecimiento y actividad de los microorganismos implicados en el aporte de nutrientes al vegetal (Grauer y Horst, 1990; Borie *et al.*, 1992).

Rode y Runge (1991), estudiaron el efecto de aluminio sobre el crecimiento radicular de diez especies de plantas ecológicamente distintas en solución nutritiva a pH 3,8, con distintas formas nitrogenadas ( $\text{N-NO}_3^-$ : 1 mM y  $\text{N-NO}_3^-/\text{N-NH}_4^+$  0,5/0,5 mM), encontrando que concentraciones tan bajas como 40  $\mu\text{M}$  de aluminio en solución nutritiva conteniendo  $\text{N-NO}_3^-$  solamente, provocaron disminución del crecimiento radicular y que sólo en muy pocos casos, en plantas consideradas muy tolerantes a Al, concentraciones mayores o iguales a 1.000  $\mu\text{M}$ , ejercieron un ligero efecto restrictivo del crecimiento radicular. Además, la mayoría de las especies tolerantes estudiadas por ellos, crecieron igualmente bien con ambas formas de nitrógeno.

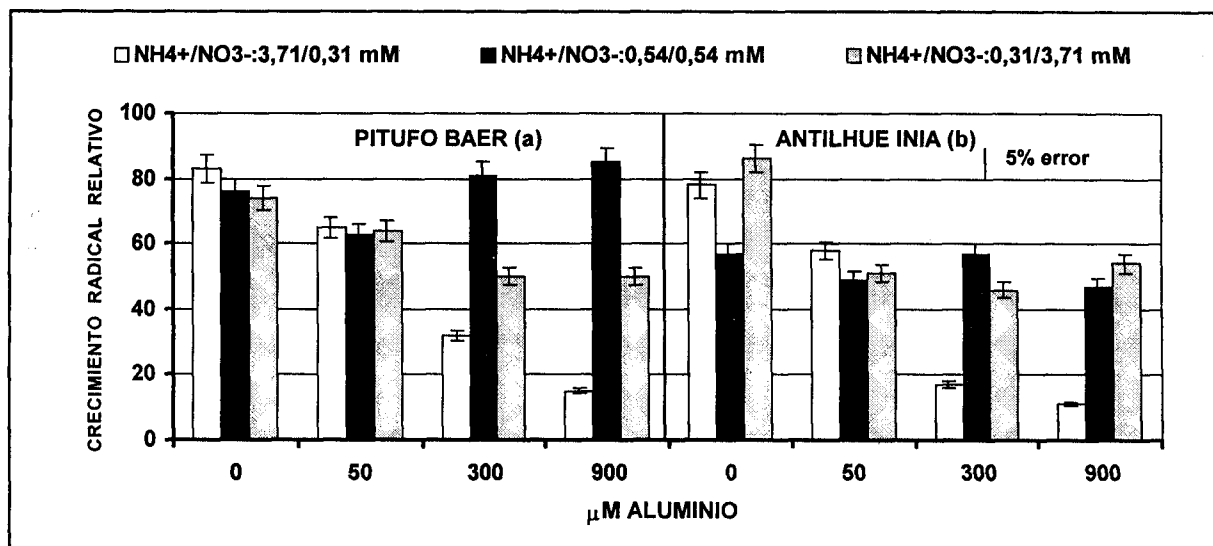


FIGURA 1. Crecimiento Radical Relativo del cultivar de trigo Pitufu BAER (a) y el cultivar Antilhue INIA (b) en función de distintos niveles de aluminio y distintas razones nitrogenadas cultivados en solución nutritiva.

FIGURE 1. Relative Root Length of Pitufu BAER (a) and Antilhue INIA (b) wheat cultivars at different levels of aluminum and different nitrogen ratios growing in nutrient solutions.

En relación al pH empleado por estos autores, cabe mencionar que es bastante bajo, ya que la mayoría de los trabajos mencionan valores de pH superiores a 4,1 y no mayores a 4,8. Es un hecho conocido de que el porcentaje de las diferentes formas de aluminio tóxico para la planta, varía con el pH y si los resultados obtenidos en solución se desean extrapolar a lo que sucedería en el suelo, con los fertilizantes nitrogenados actuales, es poco realista trabajar a pH inferior a 4,0.

Por otra parte, Grauer y Horst (1990), estudiando el efecto del pH y de la fuente nitrogenada en la tolerancia de aluminio en lupino amarillo y en centeno, apreciaron que la inhibición de la elongación de las raíces de ambas especies vegetales se incrementó al elevar el pH desde 4,1 a 4,5. Estos resultados están de acuerdo con lo informado por Wagatsuma y Ezoe (1985), quienes atribuyen la alta toxicidad de aluminio a bajos valores de pH, como consecuencia de un incremento en las actividades de las formas tóxicas de aluminio, tanto mono como polinucleares.

De los resultados obtenidos en el Ensayo 1, se deduce que la presencia de altos niveles de amonio (relación 3,71 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/0,31 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), produjo un decrecimiento significativo del sistema radical en ambos cultivares, en presencia de aluminio, lo que hace suponer que el pH 6,0 inicial de la solución nutritiva disminuyó a través del tiempo, afectando el crecimiento radical normal de las plantas. Considerando que no hubo corrección de pH en el lapso de tiempo

comprendido antes de cada cambio de solución nutritiva, el efecto negativo sobre el desarrollo de las plantas se debe al incremento en la concentración de H<sup>+</sup>, producto de la absorción de un alto nivel de amonio en la solución nutritiva, que favorece el incremento de la actividad tóxica de las especies de aluminio. Estos resultados están de acuerdo con lo observado por Tan *et al.* (1992), quienes trabajaron con 12 genotipos de sorgo en solución nutritiva con diferentes formas de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en presencia de Al.

El incremento de los niveles de aluminio a pH 4,8 en la solución nutritiva, afectó el sistema radical de ambos cultivares, cuando la solución nutritiva contenía una relación amonio/nitrato 3,71/0,31 mM, situación similar a la obtenida por Rode y Runge (1991). Este antecedente permitió definir el nivel de aluminio a utilizar en el segundo ensayo. Existe una considerable variación en datos publicados en relación con la concentración de Al tóxico, considerándose que los niveles bajos de Al afectan en forma detrimental el sistema radicular de algunas especies y cultivares (Taylor y Foy, 1985b; Wilkinson y Duncan, 1993). En cambio, otros autores como Mugwira y Haque (1993), utilizan en sus ensayos altos niveles de aluminio. En cuanto a las concentraciones a emplear, en un ensayo posterior se observó que el nivel 100 μM de Al, es la concentración que permite discriminar entre una planta que no es afectada por aluminio de otra que sí lo es (datos no publicados), siendo semejante a la descrita por otros investiga-

dores (Rode y Runge, 1991). Por estas razones se empleó en el ensayo 2 la concentración de 100  $\mu\text{M}$  de Al.

Para el cultivar Pitufu, se observó que el efecto detrimental fue menor en relación al cultivar Antihue demostrándose de esta manera que existe una respuesta diferencial a Al entre cultivares (Foy, 1988; Fageria *et al.*, 1988; Scott y Fischer, 1989; Galvez *et al.*, 1991) y por tanto, Pitufu es más tolerante que Antihue.

Por otra parte, el máximo crecimiento radical se logró siempre a pH 6,0, aún a 900  $\mu\text{M}$  de Al, lo cual demuestra que este elemento en estas condiciones no se encuentra en forma libre, la cual es tóxica para la planta (Camargo y Furlani, 1989).

Ahora bien, considerando las diferentes relaciones nitrogenadas utilizadas, para realizar el ensayo 2, se descartó la relación  $\text{N}_2$  porque con ella la solución nutritiva tendía a no variar considerablemente su pH en comparación con las otras relaciones nitrogenadas que lo alteraron substancialmente.

Algunos autores han encontrado que una alta relación nitrogenada en la forma amoniacal provoca una disminución de hasta dos unidades el pH (Alexander *et al.*, 1991). Borie *et al.*, (1994), trabajando con cebada y avena informan diferencias de 0,8 y 1,8 unidades de pH para ambos cultivos respectivamente, al comparar la adición de  $\text{N-NH}_4^+$  y  $\text{N-NO}_3^-$ .

Una vez seleccionada las concentraciones de aluminio y las relaciones nitrogenadas a emplear, se procedió a realizar el segundo ensayo, cuyos resultados es posible apreciar en la Figuras 2 y 3.

En todos los casos en que se corrigió el pH hubo un mayor crecimiento radical, además de que los crecimientos fueron mayores en presencia de una baja concentración de  $\text{NH}_4^+$  (Figuras 2a y 3a). Bernier (1991), ha descrito que el uso excesivo e indiscriminado de fertilizantes amoniacales, ha producido paulatinamente, un descenso del pH de los suelos del sur de Chile, lo que conlleva el peligro de la aparición de fitotoxicidad principalmente de aluminio y manganeso. De hecho, los resultados de este ensayo demuestran que la solución nutritiva, conteniendo la mayor concentración de amonio ( $\text{N}_3$ ), tuvo una disminución de pH desde 6,0 a 3,2 en ambos cultivares, al cabo de cinco días en la fase final del ensayo (datos no mostrados). Para superar este problema en la práctica agronómica se recurre al uso de enmiendas calcáreas (Aitken *et al.*, 1990).

En la Figura 2b, se observa que el cultivar Pitufu, en elevada concentración de amonio ( $\text{N}_3$ ), presentó un decrecimiento en el largo radical aun cuando no hay Al en el medio, al comparar el nivel cero de Aluminio con la Figura 2a. Esta disminución se vio aumentada cuando no se corrigió el pH, lo que quiere decir que la presencia de  $\text{H}^+$  en el medio es un factor de importancia para el cultivar estudiado. Esto se observó aún a pH 6,0 donde no hay aluminio a la forma libre (Aitken *et al.*, 1990; Gijsman, 1990).

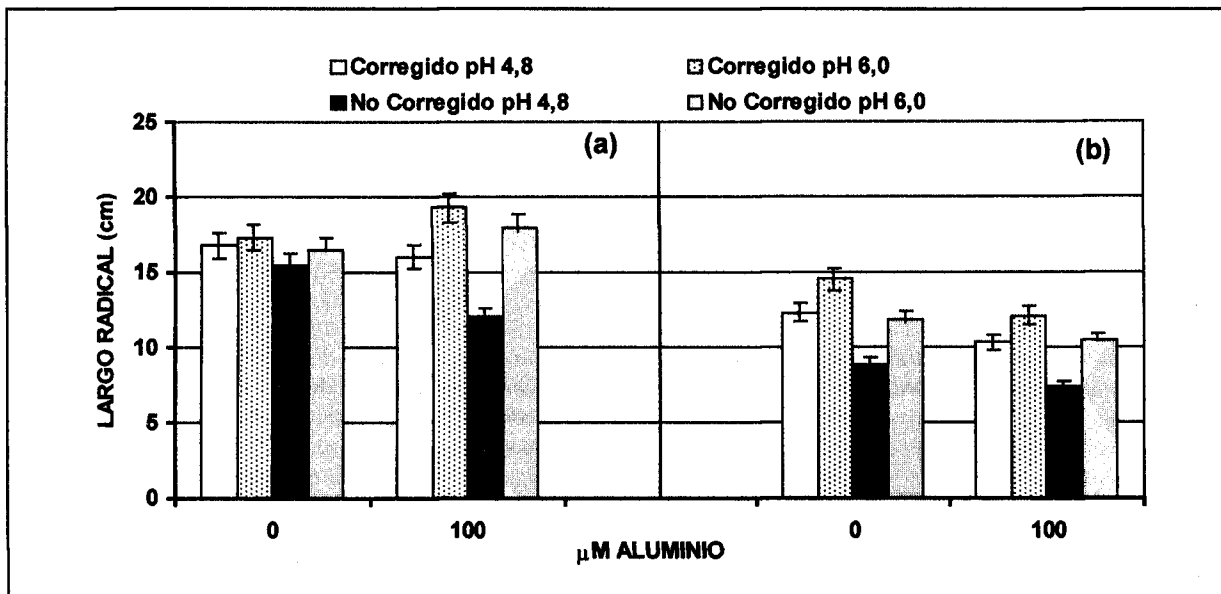


FIGURA 2. Largo radical del cultivar de trigo Pitufu crecido a bajo (a) y a alto (b) nivel de  $\text{NH}_4^+$ .

FIGURE 2. Root length of Pitufu wheat cultivar growing at low (a) and high (b) level of  $\text{NH}_4^+$ .

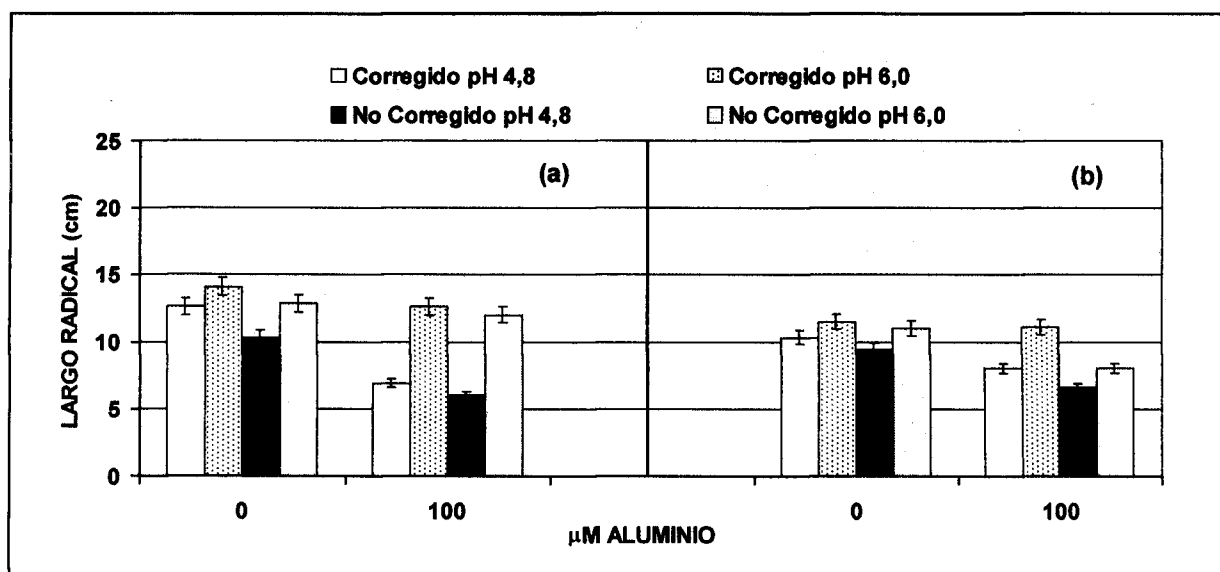


FIGURA 3. Largo radical del cultivar de trigo Antilhue crecido a bajo (a) y a alto (b) nivel de  $\text{NH}_4^+$ .

FIGURE 3. Root length of Antilhue wheat cultivar growing at low (a) and high (b) level of  $\text{NH}_4^+$ .

A 100  $\mu\text{M}$  de aluminio el largo radical se vio mucho más afectado en el caso de no corregir el pH (Figura 2b), considerando aún que Pitufu es un cultivar relativamente tolerante a aluminio.

En cuanto al cultivar Antilhue, a bajo nivel de amonio presentó un menor crecimiento radical comparado con cultivar Pitufu, cuando se mantuvo controlado a 4,8 el pH de la solución nutritiva. A elevado nivel de amonio ( $\text{N}_3$ ) el crecimiento radical de este cultivar se vio significativamente disminuido a pH 6,0 con 100  $\mu\text{M}$ , de aluminio y cuando no se corrigió el pH.

Por último es interesante mencionar que en la actualidad se están aplicando en los suelos ácidos del Sur de Chile fertilizantes tamponantes, como una forma de minimizar el problema de fitotoxicidad a aluminio, de ciertos cultivares. Los productos desarrollados consisten en una serie de razones nitrogenadas  $\text{N-NH}_4^+$  y  $\text{N-NO}_3^-$ ; de allí que resulte interesante estudiar el efecto que poseen en la tolerancia a aluminio, diversas razones nitrogenadas ya que, entre las opciones de manejo del problema se puede mencionar, entre otros, la racionalización del tipo de fertilizante nitrogenado empleado.

Existe enorme interés por tener mayor claridad en cuanto a los efectos que ejercen los fertilizantes

nitrogenados, en especial la variedad de mezclas disponibles en el mercado, sobre las características químicas de los suelos derivados de cenizas volcánicas ya que éstos ocupan en Chile un área aproximada a los 4 millones de hectáreas, de las cuales, una superficie cercana al millón son arables. Este tipo de suelos, si bien poseen una serie de características edáficas, beneficiosas para el cultivo de una serie de especies de interés agrícola y forestal, existen otras en cambio, que son negativas como lo son su acidez y su materia orgánica altamente humificada.

## CONCLUSIONES

El cultivar Antilhue fue afectado en mayor grado que el cultivar Pitufu con los distintos niveles de aluminio cuando la solución nutritiva contenía una mayor relación de  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ .

La longitud radical de ambos cultivares se afectó en distinto grado cuando se modificó la relación  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ .

La corrección de pH de la solución nutritiva tuvo un efecto benéfico en el sistema radical de ambos cultivares, siendo más marcado este efecto en las plantas cultivadas en presencia de aluminio.

## RESUMEN

La toxicidad de Al es considerada el factor más importante en el crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas en suelos con elevada acidez. Entre las opciones de manejo del problema de la acidificación de los suelos de interés agrícola, se encuentra la racionalización del tipo de fertilizante nitrogenado empleado. Se evaluó la respuesta de dos cultivares de trigo (*Triticum aestivum* L.) (Pitufo BAER y Antilhue INIA) frente a dos niveles de pH (4,8 y 6,0), cuatro niveles de Al (0; 50; 300 y 900  $\mu$ M) y tres relaciones de  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  (0,31/3,71 ( $\text{N}_1$ ), 0,54/0,54 ( $\text{N}_2$ ) y 3,71/0,31 ( $\text{N}_3$ ) en concentraciones mM) con cuatro repeticiones en cultivos hidropónicos, en condiciones de cámara de crecimiento, sin corrección de pH. Además, se

evaluó la respuesta de estos mismos cultivares a los dos niveles de pH antes estudiados, pero realizando corrección diaria del pH. En este caso se utilizaron dos niveles de Al (0 y 100  $\mu$ M) y dos relaciones nitrogenadas ( $\text{N}_1$  y  $\text{N}_3$ ). El cultivar Antilhue INIA fue más sensible a aluminio que el cultivar Pitufo BAER.

La longitud radical de ambos cultivares se afectó en distinto grado, cuando se modificó la relación  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$  en la solución nutritiva.

**Palabras claves:** relación  $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ , tolerancia, aluminio, trigo, *Triticum aestivum* L., solución nutritiva.

## LITERATURA CITADA

- AITKEN, R.L.; MOODY, P.W. and B.L. COMPTON. 1990. A simple bioassay for the diagnosis of aluminum toxicity in soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 21: 511-529.
- ALEXANDER, K.G., MILLER, M.H. and BEACHAMP, E.G. 1991. The effect of an  $\text{NH}_4^+$  enhanced nitrogen source on the growth and yield of hidroponically grown maize (*Zea mays* L.). *J. Plant Nutr.* 14: 31-44.
- BERNIER, V.R. 1991. Acidez y encalado de suelos en la Región de Los Lagos. INIA. Serie Remehue Nº 15: 113-115.
- BORIE, F.; MORALES, A. y PINO, M.E. 1992. Influencia del aluminio y acidez sobre la elongación radical de trébol rosado (*Trifolium pratense* L.) y trébol blanco (*Trifolium repens* L.). *Agricultura Técnica* 52 (2): 134-138.
- BORIE, F.; STANGE, B.; MORALES, A. y PINO, M.E. 1994. Efecto de aluminio y acidez sobre la elongación radical de cebada (*Hordeum vulgare* L.) y avena (*Avena sativa* L.). *Agricultura Técnica* 54: 224-230.
- CAMARGO, O.A. y FURLANI, P.R. 1989. Aluminio no solo: concentração, especificação e efeito no desenvolvimento radicular en: *Anais do II Simpósio Avançado de Solos e Nutrição de Plantas*. Fundação, Cargill Campinas, SP, Brasil, p.: 43-69.
- CAMERON, R.S.; RITCHIE, G.S.P. and ROBSON, A.D. 1986. Relative toxicities of inorganic aluminum complexes to barley. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1231-1237.
- FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C. and WRIGHT, R.J. 1988. Aluminum toxicity in crop plants. *J. Plant Nutr.* 11: 303-319.
- FOY, C.D. 1983. Plant adaptation to mineral stress in problems soils. *Iowa State J. Research* 57: 339-354.
- FOY, C.D. 1988. Plant adaptation to acid, aluminum-toxic soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 19: 959-987.
- FOY, C.D. and FLEMING, A.L. 1982. Aluminum tolerances of two wheat genotypes related to nitrate reductase activities. *J. Plant Nutr.* 11: 1313-1333.
- FOY, C.D.; LEE, E.H.; CORADETTI, C.A. and TAYLOR, G.J. 1990. Organic acids related to differential aluminum tolerance in wheat (*Triticum aestivum*) cultivars. *J. Plant Nutr.* p.: 381-389.
- GALVEZ, L.; CLARCK, R.B.; KLEPPER, L.A. and HANSEN, L. 1991. Organic acids and free proline accumulation and nitrate reductase activity in sorghum (*Sorghum bicolor*) genotypes differing in aluminum tolerance. *En: Plant Soil Interactions at low pH*, Kluwer Academic Press, Durdrecht, p.: 859-867.
- GIJSMAN, A.J. 1990. Rhizosphere pH along different root zones of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*), as affected by source of nitrogen. *Plant and Soil* 124: 161-167.
- GRAUER, U.E. and HORST, W.J. 1990. Effect of pH and nitrogen source on aluminum tolerance of rye (*Secale cereale* L.) and yellow lupin (*Lupinus luteus* L.). *Plant and Soil* 127: 13-21.
- KELTJENS, W.G. and Van ULDEN, P.S.R. 1987. Effects of Al on nitrogen ( $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$ ) uptake, nitrate reductase activity and proton release in two sorghum cultivars differing in Al tolerance. *Plant and Soil* 104: 227-234.
- KINRAIDE, T.B. 1991. Identity of the rhizotoxic aluminum species. *Plant and Soil* 134: 167-178.
- KLOTZ, F. and HORST, W.J. 1988. Effect of ammonium and nitrate nitrogen nutrition on aluminium tolerance of soybean (*Glycine max* L.). *Plant and Soil* 111: 59-65.

- MARSCHNER, H., 1995. Mineral Nutrition of higher Plants. Second Ed., Academic Press.
- MIYASAKA, S.C.; BUTA, J.G.; HOWELL and FOY C.D. 1991. Mechanism of aluminum tolerance in snapbeans. *Plant Physiol.* 96: 737-743.
- MUGWIRA, L.M. and HAQUE, I. 1993. Screening forage and browse legumes germplasm to nutrient stress I: Tolerance of *Medicago sativa* L. to aluminum and low phosphorus in soils and nutrient solutions. *J. Plant Nutr.* 16: 17-35.
- RITCHIE, G.S.P. 1989. The chemical behaviour of aluminum, hydrogen and manganese in acid soils. Robson, A.D. (Ed.). *En: Soil Acidity and Plant Growth.* Academic Press-Australia. p.: 1-49.
- ROBSON, A.D. and ABBOTT, L.K. 1989. The effects of soil acidity on microbial activity in soils. ROBSON, A.D.; (Ed.). *En: Soil Acidity and Plant Growth.* Academic Press-Australia. p.: 139-166.
- RODE, M.V. and RUNGE, M. 1991. Combined effects of aluminum and nitrogen forms on roots growth of ten ecologically distinct plant species. *Plants Roots and their Environment* 95: 263-272.
- SCOTT, B.J. and FISHER, J.A. 1989. Selection of genotypes tolerant of aluminum and manganese. ROBSON, A.D. (Ed.). *En: Soil Acidity and Plant Growth.* Academic Press-Australia. p.: 167-196.
- TAN, K.; KELTJENS and G.R. FINDENEGB. 1992. Effect of nitrogen form on aluminum toxicity in sorghum genotypes. *J. Plant Nutr.* 15: 1383-1394.
- TAYLOR, G.J. and FOY, C.D. 1985a. Mechanisms of aluminum tolerance in *Triticum aestivum* L. (Wheat). I. Differential pH induced by winter cultivars in nutrient solutions. *Amer. J. Bot.* 72: 695-701.
- TAYLOR, G.J. and FOY, C.D. 1985b. Mechanisms of aluminum tolerance in *Triticum aestivum* L. (Wheat). II. Differential pH induced by spring cultivars in nutrient solutions. *Amer. J. Bot.* 72: 702-706.
- WAGATSUMA, T. and EZOE, Y. 1985. Effect of pH on ionic species of aluminum in medium and on aluminum toxicity under solution culture. *Soil Sci. Plant Nutr.* 31: 547-561.
- WILKINSON, R.E and DUNCAN, R.R. 1993. Calcium ( $^{45}\text{Ca}^{2+}$ ) absorption inhibition by aluminum ( $\text{Al}^{3+}$ ) in sorghum roots. *J. Plant Nutr.* 16: 235-240.
- WRIGHT, R.J. 1989. Soil aluminum toxicity and plant growth. *Commun. in Soil Sci. Plant Anal.* 20: 1479-1497.