

# Efecto del Aluminio Sobre la Germinación de Semillas de Trigo (*Triticum aestivum* L.) y de Maiz (*Zea mayz* L.)

## The effect of aluminium on wheat (*Triticum aestivum* L.) and corn (*Zea mayz* L.) seed germination

Casierra-Posada, Fánor <sup>1</sup>; Cárdenas-Hernández, Julián F.<sup>1</sup>; Roa, Hugo A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ingeniero Agrónomo PhD., Docente asociado en la Facultad de Ciencias Agropecuarias, UPTC Grupo de Investigación Ecofisiología Vegetal. Apartado aéreo 661, Tunja – Boyacá e-mail: fanor.casierra@uptc.edu.co [Autor para correspondencia]

<sup>2</sup>Estudiante de ingeniería agronómica. UPTC, Tunja. E-mail: julianc0182@yahoo.es hugoalexander186@latinmail.com; respectivamente

Recibido: Marzo 31 de 2008. Aceptado: Mayo 21 de 2008

### RESUMEN

Entre especies e incluso cultivares, existen grandes diferencias en cuanto a la respuesta de las plantas a la toxicidad por aluminio. A pesar de existir varios estudios sobre el tema, todavía no se conoce el principal objetivo celular del aluminio, y su efecto sobre varios procesos del desarrollo vegetal como la germinación, han sido poco estudiados; además, los resultados encontrados son muy variables. La germinación es uno de los procesos más importantes en el crecimiento y desarrollo vegetal, ya que de ella depende la estabilización de los cultivos que se encuentran bajo condiciones de estrés. Se realizó un experimento en Tunja / Colombia con el fin de evaluar la influencia del aluminio sobre la germinación de las semillas de trigo (*Triticum aestivum*) y de maíz (*Zea mayz*), tomando como material vegetal semillas de tres cultivares de trigo (ICA Tenza, Sello rojo e ICA Bochica) y de dos cultivares de maíz (ICA V-305 e ICA V-508). De cada especie, ICA Bochica e ICA V-305 fueron los cultivares más afectados por aluminio; el porcentaje de germinación se redujo 31 y 15% en comparación con el testigo, respectivamente. En general, la germinación en trigo fue más afectada por aluminio que la germinación en maíz.

**Palabras clave:** ICA Tenza, Sello Rojo, ICA Bochica, ICA V-305, ICA V-508.

## SUMMARY

There are great differences between species and cultivars regarding plant response to aluminium-induced toxicity. In spite of there being several studies on the topic, aluminium's main cellular target still remains unknown and its effect on several vegetal development processes (i.e. germination) has been little studied and the few results found have been very variable. Germination is one of the most important processes in vegetal growth and development since stabilising crops growing under stress conditions depends on it. An experiment was carried out in Tunja, Colombia, aimed at evaluating aluminium's influence on wheat (*Triticum aestivum*) and corn (*Zea mays*) seed germination, taking seeds from three wheat (ICA Tenza, Sello rojo and ICA Bochica) and two corn cultivars (ICA V-305 and ICA V-508) as vegetal material. ICA Bochica and ICA V-305 were the cultivars in each specie which were most affected by aluminium; germination percentages became reduced by 31% and 15% respectively compared to control. Germination in corn was more affected by aluminium than germination in wheat.

**Key words:** ICA Tenza, Sello Rojo, ICA Bochica, ICA V-305, ICA V-508.

## INTRODUCCIÓN

El maíz es el tercer cereal más producido a nivel mundial y se utiliza como alimento para humanos y animales, como forraje, para la extracción de aceite y la producción de celulosa (Mahmood *et al.*, 2005). En Colombia, el área sembrada en este cereal ascendió en 2006 a 49.020 has, de las cuales, 2.540 se sembraron en Boyacá, lo cual corresponde a 5,18% del área total sembrada en maíz a nivel nacional (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2007).

Entre 40 y 50% de la superficie cultivable en el mundo corresponde a suelos ácidos con problemas de toxicidad por aluminio, lo cual es uno de los factores que más limitan la producción vegetal en suelos ácidos (Casierra-Posada y Cárdenas-Hernández, 2007). El área cubierta por suelos ácidos en el mundo se considera que asciende a 3.950 millones de hectáreas, de las cuales el 41% se encuentran en América. En Colombia, 67 millones de hectáreas corresponden a suelos con problemas de acidez (Arcos, 2008), lo cual ocasiona problemas por toxicidad por aluminio.

Los síntomas de fitotoxicidad por aluminio no dependen únicamente de una concentración crítica del elemento en el sustrato (Cameron *et al.*, 1986).

Por eso, aunque la presencia de aluminio es un factor muy importante en la expresión de la respuesta al daño causado por este elemento, otras características del medio, como el pH, la formación de precipitados insolubles, los efectos protectores de iones, la fuerza iónica de la solución, la presencia de quelatantes, y el genotipo de la planta, pueden también actuar en la modificación de la respuesta de los vegetales al aluminio (Gallardo *et al.*, 1999; Casierra-Posada, 2001). Muchos de estos factores químicos se pueden comprender mejor si se tiene en cuenta los efectos que causa la especiación de aluminio, la que varía según el pH (Kinraide, 1991; Casierra-Posada y Niño-Medina, 2007), ya que las especies tóxicas de aluminio están en función del pH y afectan en distinto grado a especies vegetales y cultivares dentro de una misma especie, siendo  $Al^{+3}$  la especie más tóxica, conocida como 'Al lábil' (Gallardo *et al.*, 2005).

La membrana plasmática representa el principal lugar de ataque del aluminio (Takabatake y Shimmen, 1997; Casierra-Posada, 2002). Dentro de los efectos inducidos por  $Al^{+3}$  en los sistemas biológicos tanto *in vivo* como *in vitro*, uno de los efectos más graves es la destrucción de los ácidos grasos que conforman la membrana, provocado por los radicales libres del oxígeno, (Mossor-Pietraszewska, 2001).

Muchos organelos celulares se han relacionado con la toxicidad por  $Al^{+3}$ , tal es el caso de la pared celular y el núcleo, más específicamente el DNA (Rengel, 1996; Silva *et al.*, 2000; Taylor *et al.*, 2000; Casierra-Posada, 2002). Al parecer, la mayoría del  $Al^{+3}$  se acumula en la pared celular. Se reportó una acumulación de 99,9%, del total de  $Al^{3+}$  presente en la célula, en la pared celular del alga *Chara corallina* (Taylor *et al.*, 2000); esto se relaciona principalmente con la parte péctica de la pared celular la cual permanece en el protoplasma incluso después de la digestión enzimática de la pared. Se cree que el aluminio puede asociarse a la pectina que se produce en el momento que se expone el tejido a  $Al^{+3}$  (Chang *et al.*, 1999).

En general se ha reportado que el  $Al^{+3}$  interfiere con la división celular en raíces, aumenta la rigidez de la pared celular mediante el entrecruzamiento de las pectinas, reduce la replicación del DNA mediante el aumento de la rigidez de la doble hélice, fija el fósforo en formas menos solubles en el suelo y en la rizósfera, disminuye la respiración en las raíces, interfiere con varias enzimas, disminuye la producción y el transporte de las citoquininas, modifica la estructura y funcionamiento de las membranas plasmáticas, reduce la toma de agua e interfiere con la toma, transporte y metabolismo de varios nutrientes esenciales (Mossor-Pietraszewska, 2001; Casierra-Posada y Cárdenas-Hernández, 2007). Otros órganos que se ven afectados al entrar en contacto con el  $Al^{+3}$  son las mitocondrias (Yamamoto *et al.*, 2002) y los cloroplastos (Scandalios, 1993).

La genética de la tolerancia a  $Al^{+3}$  ha sido ampliamente estudiada en plantas de importancia económica. En *Zea mays*, se encontró que dos loci mayores e independientes son los responsables del control de la tolerancia a  $Al^{+3}$  (Gallego y Benito, 1997; Sibov *et al.*, 1999), mientras que en *Triticum aestivum*, la tolerancia a  $Al^{+3}$  es una característica compleja controlada por varios genes mayores y menores modificados (Aniol, 1990), y por locus simples (Delhaize *et al.*, 1993).

Dentro del desarrollo de un vegetal, la germinación es una de las etapas más importantes. La germinación inicia con la imbibición o absorción de agua por la semilla y finaliza con la elongación del eje embrionario, principalmente de la radícula (Román, 2000, Bewley y Black, 1985b). La cantidad de agua absorbida en la imbibición no supera dos a tres veces el peso seco de la semilla, proceso que se ve afectado por los factores que determinan el movimiento del agua hacia la semilla (Simon, 1984).

Las plántulas jóvenes son más susceptibles que las plantas ya desarrolladas a la toxicidad causada por  $Al^{+3}$ . Aunque aparentemente el  $Al^{+3}$  no afecta la germinación de las semillas, se sabe que disminuye el crecimiento de las nuevas raíces y la estabilización de las plántulas (Nosko *et al.*, 1988). Sin embargo, con respecto a esta afirmación, los resultados varían mucho entre especies, e incluso entre cultivares. Estudios sobre el efecto de  $Al^{+3}$  en *Triticum aestivum* han demostrado la gran variabilidad en la respuesta de los diferentes cultivares de esta especie a la exposición a  $Al^{+3}$  (Costa *et al.*, 2003; Gallardo *et al.*, 2005; Rincon y Gonzales, 1992). Por otro lado, se encontró que en semillas de arroz sin cascara tratadas con  $Al^{+3}$ , se modifica el peso, el contenido de proteína, de fécula y la actividad de la  $\alpha$ -amilasa y de la proteasa en el endospermo, mientras que en las semillas con cáscara no se observó cambios en las variables mencionadas, indicando que la cáscara del arroz puede actuar como barrera contra la acción de  $Al^{+3}$  sobre el endospermo (Wang y Kao, 2005). Además, Iqbal y Shafiq (2005) encontraron que el aluminio afecta tanto la germinación como el crecimiento inicial de dos cultivares de trigo.

El objetivo del presente estudio fue determinar la influencia del aluminio sobre la germinación de tres cultivares de trigo y dos cultivares de maíz, comúnmente cultivados en el altiplano Cundiboyacense, teniendo en cuenta la gran importancia de la germinación, en el establecimiento de un cultivo en condiciones de estrés (Welbaum *et al.*, 1998).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se realizó a campo abierto en las instalaciones del vivero Puente Restrepo de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia en Tunja / Colombia, ubicada en las coordenadas 5°32'27.3" N, 73°22'04.3" O a 2690 msnm. Las condiciones ambientales de la localidad del ensayo fueron: 12,7° C de temperatura promedio anual y 82% de humedad relativa.

Como material vegetal se utilizaron semillas certificadas de maíz de los cultivares ICA V-305 e ICA V-508 y trigo ICA Tenza, Sello rojo e ICA Bochica. Por tratamiento se utilizaron 50 semillas.

Previo a la siembra de las semillas se esterilizaron las camas de germinación mediante una solución de formaldehído al 5%. Posterior a la desinfección, se dejaron las camas cubiertas con un plástico durante una semana y posteriormente se descubrieron y se sembraron las semillas tres semanas después de la aplicación del formaldehído. El sustrato de germinación consistió en una mezcla 1:1 de tierra negra obtenida en la zona (Andosol) y arena lavada de río.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al analizar cada una de las variedades de trigo por separado, se pudo apreciar en todas una disminución en el porcentaje de germinación. Tanto en la variedad ICA Tenza como en Sello Rojo, los testigos mostraron diferencias altamente significativas ( $P < 0,01$ ) con los tratamientos, mientras que en la variedad ICA Bochica el testigo no presentó diferencias con el tratamiento de 0,5 meq de  $Al^{3+}$ , presentó diferencias significativas con el tratamiento de 1 y diferencias altamente significativas ( $P < 0,01$ ) con el tratamiento más alto (2 meq. de  $Al^{3+}$ ) (Fig 1). En la variedad ICA Tenza, la reducción en la tasa de germinación fue del orden de 6,4; 10,5 y 18,1%, cuando las semillas se expusieron a 0,5; 1 y 2 meq de  $Al^{3+}$  respectivamente, mientras que en la variedad Sello Rojo, la germinación se redujo 4,8; 8,9 y 9,5, respectivamente. Por último, la variedad ICA Bochica

antes de la siembra se embebieron las semillas en una solución de sulfato de aluminio ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ , Riedel-de Haën®, Alemania) en concentraciones de 0,5; 1 y 2 meq de Aluminio. Como control se embebieron las semillas en agua bidestilada. El periodo de imbibición fue de 24 horas y posteriormente se colocaron las semillas en las camas de germinación. Posterior a la siembra, se monitoreó a diario la germinación hasta que no se observara más la emergencia de plantas. Esta información se llevó a términos de porcentaje.

El ensayo tuvo un arreglo trifactorial con tres concentraciones de aluminio y un control como primer factor; dos especies como segundo factor y diferentes cultivares de cada especie como último factor de variación. Cada tratamiento se replicó cinco veces. La información obtenida se sometió a un análisis clásico de variancia y a la prueba de separación de promedios de Tukey con una probabilidad de 5%. El análisis estadístico se realizó con la ayuda del software SPSS (Statistical Product and Service Solutions) versión 8.0.

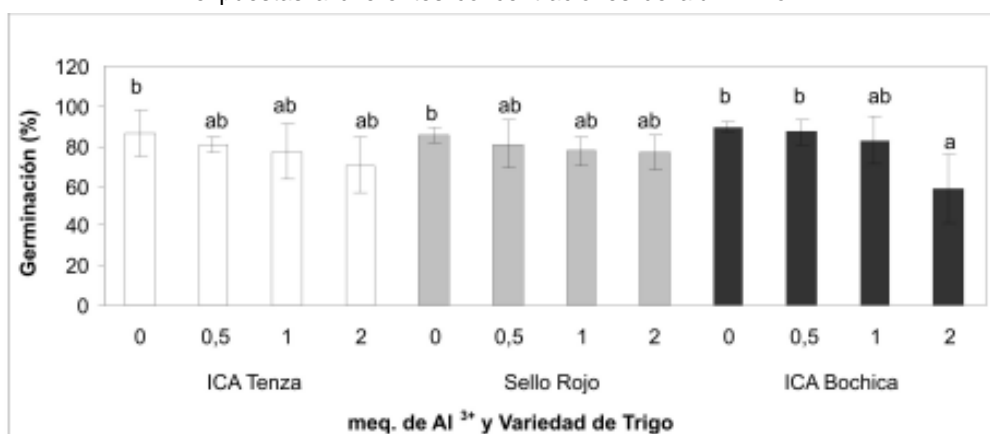
manifestó reducción en la germinación en porcentajes de 2,8; 7,3 y 34,7 cuando se mantuvieron las semillas en soluciones que contenían 0,5; 1 y 2 meq de  $Al^{3+}$  respectivamente.

A pesar de la variabilidad en la respuesta a la exposición de las semillas a aluminio en las diferentes especies, los resultados encontrados en este estudio concuerdan con resultados obtenidos en estudios previos, donde al estudiar el efecto del aluminio sobre tres especies dentro de las que se encontraba el trigo, se determinó que la germinación, el crecimiento temprano de las plántulas y los contenidos de clorofila disminuyeron con el incremento en la concentración de  $Al^{3+}$ , mientras que la proteína soluble de las hojas y contenido total de fenoles incrementó en comparación con el control (Rana y Aery, 1999).

Adicionalmente en ensayos de campo evaluando la tolerancia de *Triticosecale* Wittmack se encontró que además de la restricción en la longitud radicular causada por  $Al^{3+}$ , la producción se redujo considerablemente en los diferentes genotipos evaluados dado que la producción de grano estuvo más estrechamente correlacionada con el crecimiento

relativo de las raíces y con la inducción de calosa (Oettler *et al.*, 1997). Esta apreciación sugiere que el aluminio tiene un efecto negativo no solamente sobre la germinación de las semillas de *Triticum aestivum* como se encontró en el presente estudio, sino también, sobre los estados tempranos de la plántula y finalmente sobre la producción de grano.

**Figura 1.** Porcentaje de germinación de semillas de tres variedades de trigo (*Triticum aestivum*) expuestas a diferentes concentraciones de aluminio



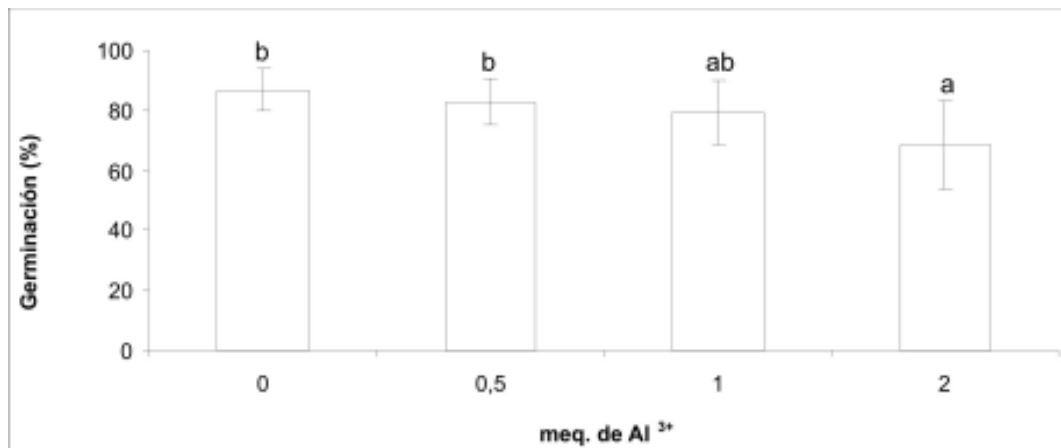
La secreción de ácidos orgánicos inducida por aluminio en las raíces de las plantas expuestas al metal se ha considerado comúnmente como un mecanismo de tolerancia al elemento (Casierra-Posada y Aguilar-Avenidaño, 2007), por tanto se estudiaron los patrones de secreción de ácidos orgánicos en *Secale cereale* y *Triticum aestivum* y se encontró que la alteración en el metabolismo de los ácidos orgánicos está involucrada en la secreción de los mismos, bajo condiciones de toxicidad por aluminio en *Secale cereale*, pero sólo la activación de un canal de aniones parece ser la responsable de la secreción rápida de ácido málico en *Triticum aestivum* (Li, *et al.*, 2000); por tanto, dada la diferencia encontrada en los diferentes cultivares evaluados en el presente ensayo es posible suponer que el mecanismo de relativa tolerancia exhibido por los cultivares, esté relacionado con la posibilidad de los mismos de exudar ácidos orgánicos a través de la radícula recién emergida, lo cual permitiría una inactivación parcial del elemento, limitando su entrada a los tejidos vegetales.

Al analizar el comportamiento de la germinación en semillas de trigo como especie, es decir, las tres

variedades en conjunto se observó la misma tendencia que en las variedades, observándose una proporción inversa entre el porcentaje de germinación y la concentración de  $Al^{3+}$  en la solución (Fig. 2). La exposición de las semillas a concentraciones de 0,5; 1 y 2 meq de  $Al^{3+}$  indujo una reducción de 4,6; 8,8 y 20,9% en la germinación de las semillas, respectivamente.

Estos resultados (Fig. 1 y 2) concuerdan con reportes anteriores, donde la germinación de las semillas de *Triticum aestivum* cv. 'Faisalabad 85' y *T. aestivum* cv. 'Blue Silver' fue significativamente afectada con respecto al testigo, por diferentes concentraciones de aluminio (Iqbal y Shafiq, 2005). Al respecto se ha encontrado que en general, la activación de la semilla se inhibe ante la presencia de sustancias tóxicas que afectan su germinación. La división celular en los meristemos radiculares se puede afectar, y esto puede ocurrir debido al retraso en la mitosis o a alguna alteración en el proceso de elongación de la radícula (Adam y Duncan, 2002; Casierra-Posada y Cárdenas-Hernández, 2007).

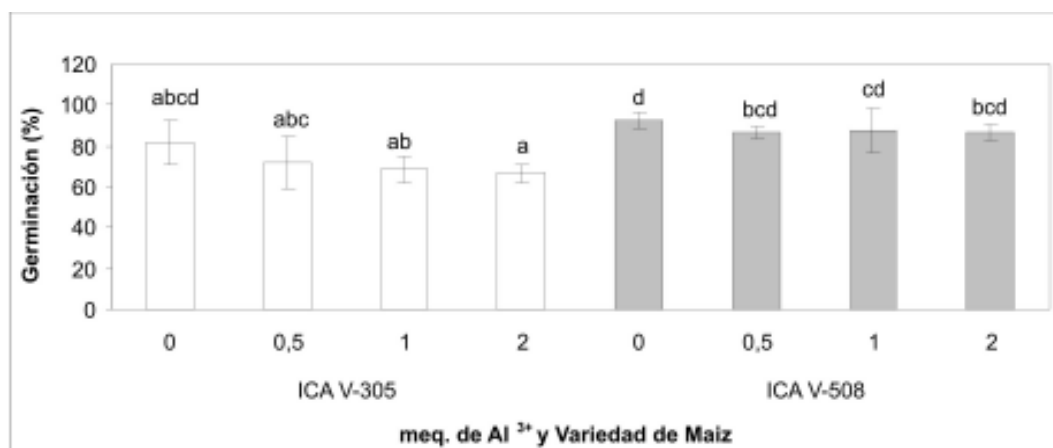
**Figura 2.** Porcentaje de germinación de semillas de trigo (*Triticum aestivum*) expuestas a diferentes concentraciones de aluminio



En cuanto al comportamiento de las variedades de maíz, se observó que en la variedad ICA V-305 disminuyó el porcentaje de germinación a medida que aumentó la concentración de Al<sup>3+</sup> y se presentó diferencia estadísticamente significativa (P >0,05) entre todos los tratamientos. En la variedad ICA V-508, el porcentaje de germinación fué muy parecido entre los tratamientos, no hubo una relación clara entre éste y la concentración de Al<sup>3+</sup>; sin embargo, hay una disminución en la germinación de los

tratamientos con respecto al testigo, presentándose diferencias significativas (P >0,05) (Fig 3). En la variedad ICA V-305, la exposición de las semillas a Al<sup>3+</sup> redujo la germinación en términos de 12,2; 15,9 y 18,4% con concentraciones de 0,5; 1 y 2 meq de Al<sup>3+</sup>, respectivamente, mientras que en la variedad ICA V-508 estos mismos contenidos de Al<sup>3+</sup> en la solución de imbibición de las semillas motivaron reducciones promedio en la germinación del orden de 6,4; 5,4 y 6,4%, respectivamente.

**Figura 3.** Porcentaje de germinación de semillas de dos variedades de maíz (*Zea mays*) expuestas a diferentes concentraciones de aluminio



En relación con este resultado, se ha reportado que en semillas de *Vigna radiata* y *V. sinensis* expuestas a diferentes concentraciones de  $Al^{3+}$ , no mostraron disminución en la germinación de las semillas ya que 100% de las semillas de ambas especies germinaron en poco tiempo. Sin embargo, se reporta la inhibición total del crecimiento de la raíz en *V. radiata*, mientras que en *V. sinensis* se observó un aumento en la longitud radicular (Jamal *et al.*, 2006a; Foy *et al.*, 1978; Casierra-Posada y Cárdenas-Hernández, 2007). Con esta información se corrobora el hecho de que en algunas especies, la respuesta de las semillas a la exposición a  $Al^{3+}$  es muy variable e incluso las semillas se pueden ver poco afectadas por el metal. Esto demuestra la gran variabilidad en la respuesta a la presencia de  $Al^{3+}$ , mostrada por plantas del mismo género, la cual se observó en las variedades de maíz analizadas en el presente ensayo, dado que tanto el crecimiento como la producción se ven severamente afectados en plantas de maíz expuestas a concentraciones altas de aluminio (Collet *et al.*, 2000). Adicionalmente, la imbibición y en consecuencia la germinación, puede afectarse por factores como el agua, los gases, la temperatura, la luz, los iones y los inhibidores (Román, 2000). La activación de la semilla se inhibe ante la presencia de sustancias tóxicas, que afectan su germinación. La división celular de los meristemas radiculares puede afectarse, ya sea por retraso en el proceso de mitosis o por alteración en la elongación radicular (Adam y Duncan, 2002).

Tomando en consideración que las especies monocotiledóneas y dicotiledóneas presentan grandes diferencias en cuanto a la composición de sus paredes celulares por su contenido de pectina y su potencial de sitios de unión del aluminio, se han encontrado amplias diferencias en cuanto a la respuesta de plantas de *Vicia faba* y *Zea mays*. Como resultado se encontró que en puntas de raíces de *Z. mays*, el aluminio alcanzó la estela en cerca de 60 minutos, mientras que en *V. faba* este se concentró en la rizodermis y en las células de la corteza externa, lo cual indica un alto potencial de unión del aluminio en las paredes celulares de la dicotiledónea (Marienfeld

*et al.*, 2000), lo que puede explicar el comportamiento de los cultivares de maíz presentado en la figura 3.

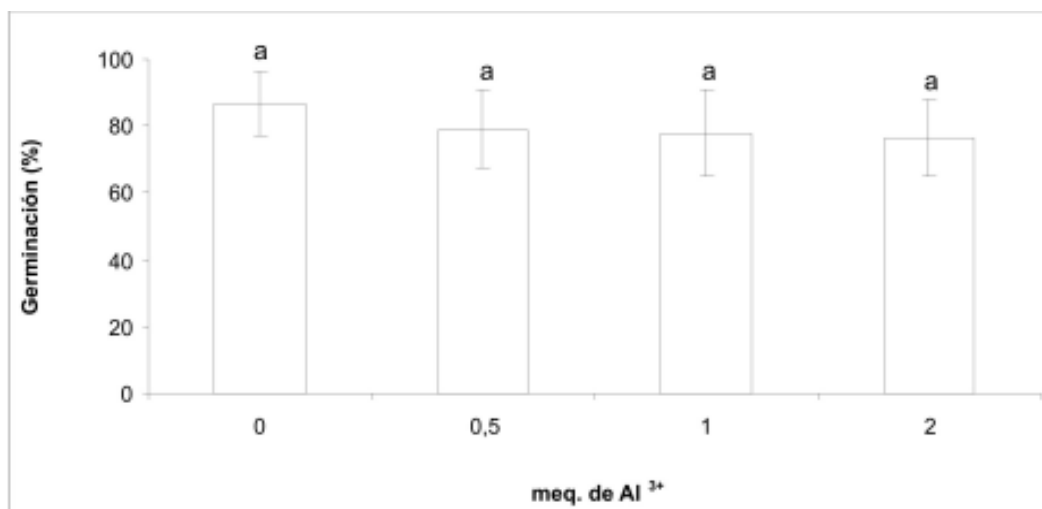
La exposición de diferentes variedades de *Zea mays* a un pH ácido y a aluminio, dió como resultado una disminución progresiva de los niveles de DNA con relación a los existentes en el control a pH 6,0 (Feixa, 2001). Un efecto similar puede ocurrir en las semillas evaluadas en el presente estudio, contribuyendo así a la disminución observada en la germinación de la variedad ICA V-305.

Al hacer el análisis de la germinación de las semillas de maíz, se observó una disminución en las semillas expuestas a  $Al^{3+}$  con respecto a las semillas germinadas en el testigo, sin embargo entre todos los tratamientos con  $Al^{3+}$ , el comportamiento fue muy similar y de hecho no hubo diferencia estadísticamente significativa (Fig. 4). En maíz, la germinación de las semillas se redujo 9,0; 10,3 y 12,0% respectivamente, cuando las semillas se expusieron a concentraciones de 0,5; 1 y 2 meq de  $Al^{3+}$ .

En cuanto a los resultados encontrados en *Prosopis juliflora* el aluminio no afectó el porcentaje de germinación ni la masa seca (Jamal *et al.*, 2006b; Claire *et al.*, 1991; Fernandes y Henriques, 1991), similar a lo encontrado en el presente ensayo. Aunque las semillas de *Zea mays* en este experimento sí redujeron su porcentaje de germinación con el aumento en la concentración de  $Al^{3+}$ , la tendencia en la disminución de la germinación no fue lo suficientemente amplia, como para que se presentaron diferencias significativas.

Por otro lado, en estudios en los que se evaluó la influencia de los metales sobre la germinación, se encontró que ni el Cu ni el Zn influyen significativamente sobre la germinación de las semillas de *Zea mays* (Mahmood *et al.*, 2005), lo cual puede deberse a que la semilla usa sus propias reservas durante la germinación evitando así la influencia de la presencia de iones metálicos presentes en el sustrato (Stefani *et al.*, 1991). Por tanto, es posible que debido a esta propiedad de las semillas de *Zea mays*, los efectos negativos que causa el aluminio sobre la germinación sean menos marcados que en otras especies.

**Figura 4.** Porcentaje de germinación de semillas de maíz (*Zea mays*) expuestas a diferentes concentraciones de aluminio



La germinación implica numerosos eventos como la hidratación de proteínas, el cambio de estructuras subcelulares, la respiración, la síntesis de macromoléculas y la elongación celular, pero ninguno de los cuales por sí mismo determina la germinación (Bewley y Black, 1985a; 1985b). El desarrollo de estos procesos se ve afectado por los iones que entran a la semilla en el momento de la imbibición, ya que en condiciones experimentales y naturales (en el suelo), la semilla se encuentra en solución y por ende, los solutos entran a la semilla al igual que el agua (Simon, 1984). De igual manera que en el presente ensayo, en los suelos ácidos el Al<sup>3+</sup> se encuentra formando parte de los solutos disueltos en la solución del suelo, lo cual afecta algunos de los procesos implicados en la germinación.

Se encontró que el aluminio afecta en primera medida la elongación celular en raíces de *Glycine max* (Horst y Klotz, 1990), lo cual puede deberse a la restricción física del crecimiento, ya que los iones Al<sup>3+</sup> hacen más rígida tanto la membrana celular (Jones y Kochian, 1995; Horst, 1996 y Yamamoto *et al.*, 2001), como la red de actina (Grabski y Shcindler, 1995). Por otro lado, la toxicidad por Al<sup>3+</sup> en las plantas inhibe la mitosis e induce daños a los cromosomas, lo cual está asociado con el efecto del Al<sup>3+</sup> sobre las proteínas fosforiladas asociadas al ADN (Matsumoto y Morimura, 1980; Kochian, 1995); además, el Al<sup>3+</sup> puede

interferir con la biosíntesis de las proteínas (Delhaize y Ryan, 1995).

Se ha encontrado que la reorientación inducida por las auxinas y la depolimerización inducida por el frío en los microtúbulos de la corteza externa en las raíces de maíz se bloquea mediante tratamientos previos con aluminio; lo que sugiere que el aluminio incrementa la estabilidad en los microtúbulos estas células. El efecto estabilizante de las células de la corteza externa coincide con la inhibición del crecimiento; por tanto, la reorganización y estabilización del citoesqueleto están íntimamente asociadas con la toxicidad por aluminio en raíces de plantas de *Zea mays* (Blancaflor *et al.*, 1998).

Varios componentes son los responsables del hinchamiento de la semilla tales como la celulosa, sustancias pécticas, almidón y proteína; de las cuales, esta última, es el principal componente que embebe agua en la semilla (Mayer y Polja Koff-Mayber, 1975; Tran y Cavanagh, 1984; Ueda y Kato, 1980). Muchas de estas sustancias se ven afectadas por el Al<sup>3+</sup>. Por ejemplo, es posible que el aluminio se asocie con la pectina que se produce en el momento que se expone el tejido a Al<sup>3+</sup> (Chang *et al.*, 1999). En cuanto a la proteína, en semillas de arroz sin cáscara se reporta una disminución del contenido de proteína del endospermo cuando estas se tratan con diferentes concentraciones de Al<sup>3+</sup> (Wang y Kao, 2005).



Al comparar los resultados encontrados entre las variedades de *Zea mays* y las de *Triticum aestivum*, se observó que en ambas hubo disminución en el porcentaje de germinación, sin embargo fue mucho más marcado en las variedades de *Triticum aestivum* que en *Zea mays*. A Pesar de que el  $Al^{3+}$  al entrar en la semilla afecta la radícula, mediante su asociación

con el núcleo de las células meristemáticas, lo cual desencadena una serie de sucesos que afectan tanto el crecimiento como la división celular (Silva *et al.*, 2000; Casierra-Posada y Cárdenas-Hernández, 2007), no se debe olvidar la respuesta diferencial que presentan los genotipos cuando se exponen a concentraciones elevadas de Al.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio, se desarrolló con el apoyo de la Dirección de Investigaciones (DIN) de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, en el marco del plan de trabajo del grupo de investigación

Ecofisiología Vegetal, adscrito al programa de Ingeniería Agronómica de la Facultad de Ciencias Agropecuarias.

## REFERENCIAS

Adam G, Duncan H. of diesel fuel on seed germination. Environ Pollut. 2002; 12 (2): 363-370.

Aniol A. Genetics of tolerance to aluminium in wheat (*Triticum aestivum* L. Thell). Plant Soil 1990; 123 (2): 223-227.

Arcos AL. Determinación de calosa para seleccionar genotipos de maíz. 2008 Disponible online en: [http://www.ciat.cgiar.org/training/pdf/2008\\_05\\_21\\_L\\_Arcos.pdf](http://www.ciat.cgiar.org/training/pdf/2008_05_21_L_Arcos.pdf). Consulta : 27-07-2008

Bewley J D, Black M. 1985a. Seed physiology of development and germination. Germination structure and composition, (ed.). Plenum Press, New York. pp.1-27.

Bewley JD, Black M. 1985b. Storage, imbibition and germination. Germination structure and composition, Ed. Plenum Press, New York. pp. 89-133.

Cameron RS, Ritchie GSP, Robson AD. Relative toxicities of inorganic aluminium complexes to barley. Soil Sci Soc Am J. 1986; 50 (4): 1231-1237.

Blancaflor EB, Jones DL, Gilroy S. Alterations in the cytoskeleton accompany aluminium-induced growth inhibition and morphological changes in primary roots of maize. Plant Physiol. 1998; 118 (1): 159-172.

Casierra-Posada F. Fundamentos fisiológicos, bioquímicos y anatómicos del estrés por aluminio en vegetales. Revista Comalfi. 2001; 28(2): 8-19.

Casierra-Posada F. Alteraciones inducidas por aluminio en el citoesqueleto de las plantas. Revista Comalfi. 2002; 29(2): 23-28.

Casierra-Posada F, Aguilar -Avendaño OE. 2007. Estrés por aluminio en plantas: Reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas 1(2): 246-256

Casierra-Posada F, Cárdenas-Hernández JF. Influencia del aluminio sobre el crecimiento de la raíz en coliflor (*Brassica oleracea* L. var. Botrytis, Hib. Nevada F1. Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica. 2007; 10(1): 149-157.

Casierra-Posada F, Niño-Medina RC. Solubilidad y reacción del aluminio en el suelo. Ciencia y Agricultura 2007; 5(2): 7-17.

Chang YC, Yamamoto Y, Matsumoto H. Accumulation of aluminium in the cell wall pectin in cultured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) cells treated with a combination of aluminium and iron. Plant Cell Environ. 1999; 22: 1009-1017.

- Collet L, de León C, Horst WJ. 2000. Screening maize for adaptation to acid aluminium-toxic soils of Colombia. Proceedings, Deutscher Tropentag University of Hohenheim, Session III, WG 3.
- Costa A, Cogrosi LA, Riede CR. Reaction of wheat genotypes to soil aluminium differential saturations. *Braz Arch Biol Techn.* 2003; 46 (1): 19-25.
- Claire LC, Adriano DC, Sajwan KS, Abel SL, Thoma DP, Driver JT. Effects of selected trace metals on germinating seeds of six plant species. *Water Air Soil Pollut.* 1991; 59 (3-4): 231-240.
- Delhaize E, Ryan PR. Aluminium toxicity and tolerance in plants. *Plant Physiol.* 1995; 107 (2): 315-321.
- Delhaize E, Ryan PR, Randall PJ. Aluminium tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) II. Aluminium stimulated excretion of malic acid from root apices. *Plant Physiol.* 1993; 103 (3): 695-702.
- Fernández JC, Henríquez FS. Biochemical, physiological and structural effects of excess copper in plants. *Bot Rev* 1991; 57: 246-273.
- Foy CD, Chaney R L, Shite MC. The physiology of metal toxicity in plants. *Annu Rev Plant Physiol.* 1978; 29: 511-566.
- Gallardo AF, Pino BM, Alvear ZM, Borie BF. Efecto del aluminio en la producción de materia seca y en la actividad nitrato reductasa de dos variedades de trigo, creciendo en soluciones nutritivas. *R C Suelo Nutr Veg.* 2005; 5 (1): 30-36.
- Gallardo AF, Borie BF, Alvear ZM, Von Baer E. Evaluation of aluminium tolerance of three cultivars by two short-term screening methods and field experiments. *Soil Sci Plant Nut.* 1999; 45(3): 713-719.
- Gallego FJ, Benito C. Genetic control of aluminum tolerance in rye (*Secale cereale* L.). *Theor Appl Genet.* 1997; 95: 393-399.
- Grabski S, Shindler M. Aluminium induces rigor within the actin network of soybean cells. *Plant Physiol.* 1995; 108 (3): 897-901.
- Horst WJ. The role of the apoplast in aluminium toxicity and resistance of higher plants: A review. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 1996; 158: 419-428.
- Horst WJ, Klotz F. 1990. Screening soybean for aluminium tolerance and adaptation to acid soils. En: Genetic aspects of plant mineral nutrition. BASSAM EI, N.; M. DAMBROTH; B.C. LOUGHMAN (eds.). Kluwer academic publishers, dordrecht, the netherlands. pp. 355-360.
- Iqbal MZ, Shafiq M. Effects of aluminium on germination and growth of two different wheat cultivars. *Acta Bot Hung.* 2005; 49 (3): 315-321.
- Jamal SN, Zafariqbal M, Athar M. Effect of aluminum and chromium on the germination and growth of two *Vigna* species. *Int J Environ Sci Tech.* 2006a; 3(1): 53-58.
- Jamal SN, Iqbal MZ, Athar M. Effect of aluminum and chromium on the growth and germination of mesquite (*Prosopis juliflora* swartz.) DC. *Int J Environ Sci Tech.* 2006b; 3 (2): 173-176.
- Jones DL, Kochian LV. Aluminium inhibition of the inositol 1,4,5-trisphosphate signal transduction pathway in wheat roots: A role in aluminium toxicity?. *Plant Cell* 1995; 7 (11): 1913-1922.
- Kochian LV. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. *Annu Rev Plant Physiol. Plant Mol Biol.* 1995; 46: 237-260.
- Kinraide TB. Identity of the rhizotoxic aluminum species. *Plant Soil* 1991; 134 (1):167-178.
- Li XF, Ma JF, Matsumoto H.. Pattern of aluminium-induced secretion of organic acids differs between rye and wheat. *Plant Physiol.* 2000; 123 (4): 1537-1543.

- Mahmood S, Hussain A, Saeed Z, Athar M.. Germination and seedling growth of corn (*Zea mays* L.) under varying levels of copper and zinc. *Int J Environ Sci Tech.* 2005; 2 (3): 269-274.
- Marienfeld S, Schmohl N, Klein M, Schröder WH, Kuhn AJ, Horst WJ. Localisation of aluminium in root tips of *Zea mays* and *Vicia faba*. *J Plant Physiol.* 2000; 156: 666-671.
- Matsumoto H, Morimura S. Repressed template activity of chromium of pea roots treated by aluminium. *Plant Cell Physiol.* 1980; 21 (6): 951-959
- Mayer AM, Polia Koff-Mayber A. 1975. The germination of seed, Ed. Pergamon Press, Oxford. pp. 21-45.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2007. Información departamental. Disponible online en: [[www.minagricultura.gov.co/archivos/carpeta\\_departamental\\_septiembre\\_12\\_2007.pdf](http://www.minagricultura.gov.co/archivos/carpeta_departamental_septiembre_12_2007.pdf)]. Consulta : 30-05-2008
- Mossor-Prietaszewska T. Effect of aluminium on plant growth and metabolism. *Acta Biochim Pol.* 2001; 40 (3): 673-686.
- Nosko P, Brassard P, Kramer JR, Kershaw KA. The effect of aluminum on seed germination and early seedling establishment, growth and respiration of white spruce (*Picea glauca*). *Can J Bot.* 1988; 66: 2305-2310.
- Oettler G, Geiger R, Wiethölter S, Gaus CS, Hesemann CU, Horst WJ. Metodische und genetische Untersuchungen zur Aluminiumtoleranz von Triticale. *Vortr Pflanzenzüchtg* 1997; 38: 41-56.
- Rana DK, Aery NC . Effect of aluminum stress on the biochemical constituents during early seedling growth of mustard. *Bionature* 1999; 19: 47-50.
- Rengel Z. Uptake of aluminium by plant cells. *New Phytol.* 1996; 134 (3): 389-406.
- Rincon M, Gonzales RA. Aluminium partitioning in intact roots of aluminium-tolerant and aluminium-sensitive wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Plant Physiol.* 1992; 99 (3): 1021-1028.
- Román PR. Efecto de iones y otros factores físicos sobre la germinación de semillas. *Journal of the Mexican Chemical Society.* 2000; 44 (3): 233-236.
- Sibov ST, Gaspar M, Silva MJ. 1999. Two genes control aluminum tolerance in maize: genetic and molecular mapping analyses. *Genome, Ottawa* 42: 475-482.
- Scandalios JG.. Oxygen stress and superoxide dismutases. *Plant Physiol.* 1993; 101 (1): 7-12.
- Silva JR, Smyth TJ, Moxley DF, Carter TE, Allen NS, Rufty TW. Aluminium accumulation at nuclei of cells in the root tip. Fluorescence detection using lumogallion and confocal laser scanning microscopy. *Plant Physiol.* 2000; 123 (2) : 543-552.
- Simon EU. 1984. Early events in germination. *Seeds Physiology Vol III, Germination and Reserve Mobilization*, Morray, D. R. (ed.). Academia Press, New York. Pp. 77-115.
- Stefani A, Arduini I, Onnis A. *Juncus acutus*: Germination and initial growth in presence of heavy metals. *Ann Bot Fenn.* 1991; 28: 37-43.
- Takabatake R, Shimmen T. Inhibition of electrogenesis by aluminum in characean cells. *Plant Cell Physiol.* 1997; 38 (11): 1264-1271.
- Taylor GJ, McDonald Stephens JL, Hunter DB, Bertsch PM, Elmore D, Rengel Z, Reid RJ.. Direct measurement of aluminum uptake and distribution in single cells of *Chara corallina*. *Plant Physiol.* 2000; 123 (3): 987-996.
- Tran VN, Cavanagh AK. 1984. Structural aspects of dormancy. seed physiology, vol. II, germinations and reserve mobilization. Ed. Murray, D.R., Academic Press, New York. Pp. 1-43.

Ueda J, Kato J. Isolation and identification of a senescence-promoting substance from wormwood (*Artemisia absinthium* L.). *Plant Physiol.* 1980; 66 (2): 246-249.

Wang JW, Kao CH. Effect of aluminium on endosperm reserve mobilization in germinating rice grains. *Biol Plantarum.* 2005; 49 (3): 405-409.

Welbaum GE, Bradford KJ, Kyu Ock Y, Booth DT, Oluoch MO. Biophysical, physiological and biochemical processes regulating seed germination. *Soil Sci. Res.* 1998; 8: 161-172.

Yamamoto Y, Kobayashi Y, Devi R, Rikiishi S, Matsumoto YH. Aluminum toxicity is associated with mitochondrial dysfunction and the production of reactive oxygen species in plant cells. *Plant Physiol.* 2002; 128(1): 63-72.

Yamamoto Y, Kobayashi Y, Matsumoto H. Lipid peroxidation is an early symptom triggered by aluminum, but not the primary cause of elongation inhibition in pea roots. *Plant Physiol.* 2001; 125 (1): 199-