

COMUNICACIÓN CORTA

CRECIMIENTO DEL MAÍZ EN VERTISOLES CON ALTO ALUMINIO EN LA BAIXADA MARANHENSE PRE-AMAZONIA, BRASIL¹

Alessandro Costa da Silva²

RESUMEN

Crecimiento del maíz en vertisoles con alto aluminio en la Baixada Maranhense pre-Amazonia, Brasil. El objetivo de este trabajo fue evaluar el crecimiento del maíz en suelos con alto contenido de aluminio. Se midió el efecto del Al^{3+} en raíces y la cantidad de materia seca (raíz, hoja y tallo) de maíz. Se efectuó la caracterización físico-química de cuatro muestras de suelo con alto aluminio colectadas del horizonte Ap, en tres municipios de la región conocida como Baixada Maranhense (Pre-Amazonia, Brasil): Santa Rita (SR), Arari (AR) y Vitoria do Mearim (VM) y un testigo colectado en el municipio de São Luís, Área del Núcleo de Tecnología Rural (T). El estudio, ejecutado en 2009, se llevó a cabo en invernadero y se utilizó 2 dm³ de suelo por maceta. Asimismo las muestras fueron divididas en muestras con y sin fertilización. La variación en la longitud de la raíz y de materia seca de las hojas difirió significativamente entre tratados con y sin fertilizante, excepto en la muestra de la localidad T. La producción de materia seca de raíz, tallo y hoja fue mayor en todos los suelos cuando se fertilizó. El suelo testigo también superó a todos los demás en cuanto a producción de materia seca en la raíz, posiblemente como resultado de una menor cantidad de Al^{3+} (1,2 cmolc/dm³) en comparación con los suelos SR, AR y VM (6,8; 8,0 y 7,0 cmolc/dm³ respectivamente). Se concluye la fertilización reduce el efecto detrimental del aluminio en la producción de maíz en la Baixada Maranhense.

Palabras claves: suelos con alto aluminio, longitud de raíces de maíz, materia seca de la raíz de maíz.

ABSTRACT

Maize growth in Aluminum-rich Vertisols from the lowland pre-Amazonia, Baixada Maranhense, Brazil. The present work studied the influence of Aluminum (Al^{3+}) in the growth of maize plants grown in soil samples collected from a lowland region of Brazil in which tillage is practiced. The effect of Al^{3+} on maize roots and the amount of dry matter produced (root, leaf and stem) was measured. The chemical characterization was also performed in the Ap horizon of four soils samples from the lowland region known as Baixada Maranhense (pre-Amazonia, Brazil): Santa Rita (SR), Arari (AR) and Vitoria do Mearim (VM), all Vertisols; and 1 Oxisol (T) from the municipality of São Luís, Área del Núcleo de Tecnología Rural (T), which was used as a control group. The study was performed in 2009 in a greenhouse using 2 dm³ of soil per pot. Also, the samples were divided into samples with and without fertilization. Variation in root length and dry matter of leaves differed significantly between samples treated with and without fertilizer, except in the control locality T. The production of dry matter of root, stem and leaf was higher in all soils when fertilized. The control soil also outperformed all others in terms of dry matter production in the root, possibly resulting in a lower amount of Al^{3+} (1.2 cmolc/dm³) compared with SR, AR and VM soils (6, 8, 8.0 and 7.0 cmolc/dm³ respectively). Results suggest fertilization reduces the detrimental effect of aluminum in maize production in the Baixada Maranhense.

Keywords: aluminum toxicity, root length in maize, Brazilian lowland soils.

¹ Recibido: 11 de noviembre, 2013. Aceptado: 30 de junio, 2014. Este trabajo es parte del proyecto de investigación del Mestrado en Agroecología de la Universidad del Estado de Maranhao, financiado por el Consejo Superior de Investigación Científicas, CNPq.

² Departamento de Química da Universidade Estadual do Maranhão, Campus Universitário Paulo VI, no Bairro do Tirirical, CEP-65270 na cidade de São Luís, Estado do Maranhão – Brasil. alessandro@uema.br



INTRODUCCIÓN

La toxicidad del aluminio (Al^{3+}) es, probablemente, uno de los factores más importantes que limitan el crecimiento de plantas en suelos ácidos (Foy, 1992). El problema por toxicidad es todavía más grave cuando los suelos presentan valores de $\text{pH} < 5,5$; sin embargo, también se observa en suelos con $\text{pH} 5,5$; donde predominan minerales de arcilla del grupo caolinita (Sposito, 1989). Valores de pH menores a 5,5 favorecen la solubilidad del Al, que en la forma libre puede ser acumulado en las raíces de las plantas disminuyendo su crecimiento, lo que dificulta la asimilación y retribución de fósforo, provocando deficiencias de este elemento en la planta (Brady, 1989).

Debido a su toxicidad, el Al es uno de los elementos más analizados en los estudios de suelos, sedimentos, material geológico y en las plantas, pues es un importante constituyente de minerales no carbonatados (Alloway, 1993). El Al cambiante, importante componente de la acidez potencial de los suelos tropicales, ejerce efectos tóxicos sobre el crecimiento de los vegetales, principalmente sobre el sistema radicular; reduciendo la absorción y translocación de nutrientes en la planta. De acuerdo con Foy (1974), el alargamiento de las raíces queda impedido en virtud de la reducción de la actividad mitótica provocada por el aluminio, con subsiguiente aumento de la susceptibilidad de la planta al estrés hídrico. La raíz, órgano más sensible de los vegetales al exceso de Al, se observa corta, gruesa, débil, con ápice espeso y coloración marrón; además, se da formación de raíces laterales, cuyo crecimiento es reducido.

En diversas regiones de Brasil se presentan cantidades elevadas de Al cambiante, entre estas se encuentra la Baixada Maranhense. Esta zona tiene características que difieren de las otras regiones, principalmente debido a su gran variación en el régimen pluviométrico. El período lluvioso, con duración de aproximadamente 150 días, presenta un índice de precipitación pluviométrica de alrededor de 2000 mm anuales, de los cuales 80% ocurren entre los meses de enero a mayo. Esta característica induce la formación de ambientes saturados con baja disponibilidad de oxígeno, favoreciendo la reducción de los óxidos de hierro y manganeso presentes en el suelo. Durante el período seco, la disponibilidad de agua es reducida,

a un punto crítico para muchas especies vegetales, lo que ocasiona la oxidación de elementos reducidos en la época lluviosa (Moura, 1991).

En un estudio realizado en la Baixada Maranhense por Raij et al. (1999), se encontraron niveles de Al muy superiores a los niveles críticos de toxicidad ($0,5 \text{ cmol/dm}^3$), valores de pH igual a 5,0, saturación por Al de 30%; estos niveles de saturación son superiores a los valores medios ($0,6 \text{ cmol/dm}^3$) encontrados en suelos de Cerrado del Brasil Central (Ribeiro et al., 1999).

Investigaciones muestran que aún con elevados niveles de Al, algunos cultivos sensibles a la presencia de Al, como maíz y sandía, presentan productividades razonables cuando son cultivados en la Baixada Maranhense, estos no presentan síntomas de toxicidad, ni reducción en la productividad, lo cual indica que los niveles detectados por métodos rutinarios no determinan la toxicidad real de Al en estos suelos. Este problema ha dificultado la interpretación de resultados de los análisis de suelo por los técnicos involucrados en los proyectos agropecuarios desarrollados en la región.

En la Baixada, puede ocurrir que plantas de determinadas especies crezcan sin sufrir toxicidad de Al, a pesar de existir un elevado nivel de este elemento, por lo que es importante entender a que se debe el comportamiento asintomático, pues los altos niveles de Al podrían traer trastornos futuros a los cultivos; este comportamiento en suelos tropicales puede explicarse por la precipitación y nutrientes solubles tales como el calcio (Alves et al., 2004). Nada garantiza que después de cierto tiempo, el exceso de Al encontrado en estos suelos, no sufra un proceso de acumulación, ocasionando problemas para el desarrollo económico de la región.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el crecimiento de maíz en suelos con alto contenido de aluminio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio fue la región de la Baixada Maranhense, ubicada en la parte centro-occidental del Estado de Maranhão (pre-Amazonia, Brasil), entre 1° y 4° de latitud sur y 26° y 44° de longitud oeste. Estudios

en el área revelan una homogeneidad topográfica con altitudes que varían entre 0 a 80 m, una humedad relativa del aire próxima de 80%, con clima clasificado como Aw, según Köppen, temperatura media superior a 18 °C y un régimen pluviométrico con dos períodos: uno lluvioso y otro seco (EMBRAPA/SNLC, 1986).

Caracterización físico-química

Se efectuó un muestreo de cuatro suelos, a una profundidad de 0 a 20 cm en el mes de agosto de 2009. Las muestras de suelo fueron retiradas del horizonte Ap (0-20 cm), con una muestra compuesta (proveniente de tres muestras simples) por cada localidad. Estas fueron colectadas en cuatro municipios de la Baixada Maranhense: Santa Rita (SR), Arari (AR), Vitória do Mearim (VM), con suelos vertisoles, y en el municipio de São Luís que presenta suelos argisoles; la muestra de este último fue empleada como testigo (T).

Los suelos (SR, AR, VM y T) fueron colectados y posteriormente llevados al Laboratorio de Suelos de la Universidad Estatal de Maranhão (UEMA) para la respectiva caracterización química y física. Las muestras se pasaron por un tamiz de 2 mm para obtener tierra fina; posteriormente, se secaron al aire (TFSA). La cuantificación del carbono orgánico fue realizada con base en Cavallet et al. (2004), el calcio y el magnesio fueron extraídos en KCl (1 mol/l) y determinados por absorción atómica; el Al^{3+} se obtuvo por titulometría ácido-base con NaOH, el potasio y fósforo fueron extraídos utilizando solución extractora Mellich 1 y determinado en fotómetro de llama y colorímetro, respectivamente. La acidez

potencial fue extraída en NaOAc (0,5 mol/l) a pH 7,0 y determinada por titulometría (EMBRAPA, 1997), el pH se determinó en la relación suelo: solución 1:2,5.

Experimento

El trabajo fue realizado entre septiembre y diciembre de 2009 en invernadero, utilizando 2 dm³ del suelo/maceta, en un diseño completamente al azar con tres repeticiones, en 50 macetas. Los tratamientos en arreglo factorial, involucraron cuatro muestras de suelo que fueron divididas en muestra con y sin fertilización básica (Cuadro 1). La especie indicadora utilizada fue el maíz (AG 1051), con una planta por maceta.

La siembra se realizó directamente en las macetas, con semillas que se humedecieron a 70% de la capacidad de retención de agua del suelo. A los 45 días después de la siembra, fueron colectadas las raíces y la parte aérea (hoja y tallo) de las plantas. Las raíces fueron lavadas con agua, y se midió su longitud máxima y mínima medida desde la hoja bandera a la base del tallo. El material (hoja, tallo y raíz) se secó en estufa de aire forzado a 70 °C, posteriormente se pesó y molió para determinar el contenido de Al, de acuerdo con el procedimiento citado por Malavolta et al. (1989). Los efectos de los tratamientos en la producción de materia seca y en la acumulación de Al en las raíces fueron evaluados por medio de análisis de varianza, y los promedios comparados utilizando la prueba de Tukey a 5%.

Cuadro 1. Dosis y concentraciones utilizadas para fertilización con macro y micronutrientes en maíz. Baixada Maranhense, Pre-Amazonia, Brasil. 2009.

Nutrientes	Concentración (mg/kg) de suelo	Fuente de variación	Cantidad (g) utilizada por maceta	Masa (g) diluida en 250 ml de agua
N	100	Urea	0,4	-
P	300	Superfosfato simples	1,5	-
K	150	KCl	0,5	-
B	0,81	H ₃ BO ₃	-	0,46*
Zn	4,00	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	-	1,76*

*Fueron utilizadas alícuotas de 5 ml de solución/maceta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

No se presentaron variaciones significativas del pH en agua y en CaCl_2 , cuando se compararon los suelos entre sí. Con respecto a la cantidad de arcilla presente en las muestras, se pudo verificar que el mayor contenido de arcilla se encontró en el (SR) y el menor en el (T) (Cuadro 2).

La presencia de Al inhibe el desarrollo de las raíces (Martínez y Estrella, 1999); por esta razón, la detección de la forma geoquímica de este metal es importante debido al proceso de interacción, ya

que este se encuentra ligado (biodisponibilidad), la presencia de Al no indicará problema de toxicidad, esto debido al efecto de otros factores como: materia orgánica, mineralogía, presencia de nutrientes como Ca y Mg, entre otros.

La producción de materia seca de raíz, tallo y hoja y tallo fue mayor a todos los suelos cuando se fertilizó. El suelo testigo superó a todos los demás en la cantidad de materia seca de raíz (Cuadro 3). El suelo con menor respuesta a fertilización fue SR, lo que puede relacionarse con el mayor contenido de arcilla de este suelo, característica que facilita

Cuadro 2. Caracterización química y física de cuatro suelos con alto contenido de aluminio colectados en cuatro localidades en la Baixada Maranhense y São Luís, Brasil. 2009.

Suelo*	C _{org} dag/kg	Ca	Mg	K	P	Al	(H ⁺ + Al)	Arena*	Limo	Arcilla	pH		
		cmol _c /dm ³			mg/dm ³		cmol _c /dm ³	----- g/kg -----				H ₂ O	CaCl ₂
SR	1,8	5,0	6,0	0,25	11	6,8	Santa Rita (Vertisol)						
							10,6	10a	20b	250	720	4,1	3,9
AR	1,7	4,8	4,6	0,20	16	8,0	Arari (Vertisol)						
							9,1	40a	60b	270	580	5,2	4,6
VM	2,3	9,1	7,5	0,21	4,5	7,0	Vitória do Mearim (Vertisol)						
							9,6	30a	20b	240	710	5,0	4,6
T	2,0	2,4	2,1	0,17	5,0	0,8	Testigo (Argisol)						
							1,2	30a	70b	700	200	5,1	4,0

* a: arena gruesa, b: arena fina.

SR: Santa Rita, AR: Arari, VM: Vitória do Mearim, T: Testigo.

Cuadro 3. Materia seca producida por el maíz cultivado en suelos con alto contenido de aluminio, colectados en tres localidades de la Baixada Maranhense, Estado de Maranhão, Brasil. 2009.

Suelo*	Sin fertilización				Con fertilización			
	Hoja	Tallo	Raíz	Total	Hoja	Tallo	Raíz	Total
----- g/maceta -----								
SR	1,68 cdA ¹	0,50 bB	1,34 cB	3,00 ²	19,79 cA	8,06 cA	7,35 bA	27,20
AR	2,99 bcB	1,02 abB	2,25 bcB	5,30	30,55 abcA	15,03 aA	7,37 bA	37,70
VM	3,94 bB	1,58 abB	2,78 bB	6,80	30,13 abA	13,57 aA	7,45 bA	37,90
T	7,74 aB	2,83 aB	5,08 aB	12,80	29,77 aA	10,35 bA	8,69 aA	38,50

* SR: Santa Rita, AR: Arari, VM: Vitória do Mearim, T: Testigo.

¹ Medias seguidas de letras iguales, minúsculas en las columnas y mayúsculas en las líneas no difieren significativamente entre sí por la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

² Medias obtenidas de los valores iniciales (tres repeticiones).

su compactación, lo que dificulta el desarrollo de la planta; esto se ve reflejado en la menor producción de materia seca (hoja, tallo y raíz) que se obtuvo en SR, tanto con fertilización como sin ella.

En el Cuadro 3 se observa que hubo una diferencia entre los suelos SR, AR y VM con el T en relación con la cantidad de materia seca de la raíz; este comportamiento puede ser consecuencia del elevado contenido de Al^{3+} en los suelos de la Baixada (6,8; 8,0 y 7,0 $cmol/dm^3$, para los suelos SR, AR y VM respectivamente, en comparación con el testigo (Alves et al., 2004).

La variación en la longitud de la raíz de las plantas en los suelos con presencia y ausencia de fertilización básica, se presenta en el Cuadro 4, en donde se observa una diferencia significativa entre el suelo tratado con y sin fertilización, con excepción de las raíces menores en el suelo T, que no presentó diferencia.

Para los diferentes tipos de suelo, no se presentaron diferencias significativas entre sí sobre el desarrollo de las raíces (Cuadro 5), con excepción de los resultados obtenidos para las raíces menores de los tratamientos con fertilización. Esto sugiere que estas raíces sufrieron mayor influencia del tipo de suelo que del tratamiento realizado a este. Los suelos de la Baixada presentaron menor longitud de raíz. Esta situación, que compromete el desarrollo del vegetal (disminuyendo la productividad), no es percibida en el campo, de acuerdo con informaciones obtenidas de los agricultores de la región. Esto se puede dar debido al hecho de que el Al puede formar complejos más estables con la materia orgánica del suelo (pues los agricultores, a diferencia del experimento en invernadero, adicionan estiércol de animales sobre el campo durante la siembra) lo que puede inhibir la toxicidad por Al. Por lo tanto, nada impide que en el

Cuadro 4. Longitud (m) de la raíz del maíz, en presencia y ausencia de fertilización, en suelos con alto contenido de aluminio colectados en la Baixada Maranhense, Estado de Maranhão, Brasil. 2009.

Suelo*	Raíz mayor ²	Raíz mayor ³	Raíz menor ²	Raíz menor ³
SR	0,83 cA	0,94 cB	0,21 bA	0,23 cB
AR	0,50 bA	0,58 bB	0,12 cA	0,14 bB
VM	0,60 bA	0,81 cB	0,09 dA	0,12 bB
T	1,58 aA	1,76 aB	0,33 aA	0,39 aA

* SR: Santa Rita, AR: Arari, VM: Vitória do Mearim, T: Testigo.

Medias seguidas de letras iguales, mayúsculas en las líneas y minúsculas en las columnas, no difieren significativamente por la prueba de Tukey al nivel de 5%.

Los valores 2 y 3 indican las longitudes de la raíz del maíz obtenidas a los 45 días de cultivo, sin y con fertilización respectivamente.

Cuadro 5. Valores de F calculada para el desarrollo de la raíz del maíz en cuatro suelos de la Baixada Maranhense con alto contenido de aluminio, Estado de Maranhão, Brasil. 2009.

Suelos estudiados	Sin fertilización		Con fertilización	
	Raíz mayor	Raíz menor	Raíz mayor	Raíz menor
Santa Rita				
Arari				
Vitória do Mearim	1,79	5,05	1,94	47,29
Testigo				

Valor tabulado de F ($\alpha = 5\%$) igual a 9,01.

futuro debido a las modificaciones del medio ocurran dislocamientos de este elemento (Al) por medio de la elevada presencia de otros metales como Ca y Mg; además de la ocurrencia de procesos de oxidación y reducción.

El dislocamiento de Al de los sitios de cambio de la materia orgánica o de la fracción mineral, podría acarrear problemas futuros de toxicidad por Al; sin embargo, para hacer inferencias es imprescindible conocer el mecanismo de interacción de Al en presencia elevada de Ca, Mg y otros elementos, con el fin de determinar los factores reales que contribuyen a la inhibición de la toxicidad por Al en los campos de la Baixada. Otra contribución relevante sería verificar si la presencia de este elemento está realmente causando la reducción de la longitud de la raíz (Cuadro 5). Para ello, se debe instalar otro experimento en invernadero con los suelos SR, AR y VM en ausencia y presencia natural de aluminio.

Todos los tratamientos mostraron correlación (-) entre la longitud de la raíz y los contenidos de Ca, Mg, Al, y K. Referente a los componentes físicos del suelo, la fracción de limo presentó los mayores niveles de correlación (+) con la longitud de la raíz. El fósforo (P) sólo se correlacionó con la longitud de la raíz en el tratamiento raíz mayor con fertilizante (Cuadro 5).

LITERATURA CITADA

- Alloway, B.J. 1993. Heavy metals in soils, Great Britain: Ed. Black Academic, New York, USA.
- Alves, V.M.C., G.V.E. Pitta, S.N. Parentoni, R.E. Schaffert, A.M. Coelho, y J.V. Magalhães. 2004. Toxidez por alumínio e hidrogênio no crescimento de raízes de milho. *Rev. Bras. de Milho e Sorgo* 3:311-318.
- Brady, N.C. 1989. The nature and properties of soils. 9a ed. Macmillan Publishing Company, New York, USA.
- Cavallet, L.E., M. Villas-Boas, O.J. Khum, y A. Richard. 2004. Aplicação de composto de lixo urbano em Latossolo vermelho eutroférrico - alterações da percentagem de agregados e níveis de fósforo, potássio, carbono orgânico. *SAP* 3:7-13.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). 1997. Manual de métodos de análises de solos. 2 ed. Bookman, Rio de Janeiro, Brasil.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária)/ SNLC (Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos). 1986. Levantamento exploratório e reconhecimento de solos do Estado do Maranhão. *Boletim de Pesquisa* 35. Ed. Embrapa, Rio de Janeiro, Brasil.
- Foy, C.D. 1974. Effects of aluminum on plant growth. En: E.W. Carson, editor, *The plant root and its environment*. University Press of Virginia, USA. p. 601-642.
- Foy, C.D. 1992. Soil chemical factors limiting plant root growth. En: J.L. Hatfield, y B.A. Stewart, editores, *Advances in soil science - Limitations to plant root growth*. Springer, New York, USA. p. 97-149.
- Malavolta, E., J.L. Vitti, G.C., y S.A. Oliveira. 1989. Avaliação do estado nutricional das plantas. Piracicaba, Potafos.
- Martínez, J.M.F., y L.H. Estrella. 1999. Advances in the understanding of aluminum toxicity and the development of aluminum-tolerant transgenic plants. *Adv. Agron.* 66:103-120.
- Moura, E.G. 1991. Avaliação das qualidades físicas dos solos de duas transeções na baixada ocidental maranhense. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- Raij, B.V., H. Cantarella, J.A. Quaggio, y A.M.C. Fullani. 1999. *Boletim Técnico* No 100. 2ª ed. IAC, Campinas, Brasil.
- Ribeiro, A.C., P.T.G. Guimarães, y V.H. Alvarez. 1999. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais 5a aproximação. EDUFV, Viçosa, Brasil.
- Sposito, G. 1989. The chemistry of soil. Ed. Oxford University Press, New York, USA.