

EFEITO DO ALUMÍNIO SOBRE O BALANÇO IÔNICO E SOBRE A CAPACIDADE DAS PLANTAS DE SORGO PARA MODIFICAR O pH DAS SOLUÇÕES NUTRITIVAS^{1/}

José Cambraia^{2/}
José A. Trejo Chandías^{3/}
Marcio de Moura Estevão^{2/}
Renato Sant'Anna^{2/}

1. INTRODUÇÃO

A tolerância diferencial ao alumínio de algumas plantas tem sido atribuída à sua capacidade de modificar o pH das soluções nutritivas (10, 21, 23). Uma vez que a solubilidade do alumínio é fortemente dependente do pH, as plantas que têm capacidade para elevar e manter elevado o pH do meio de cultivo devem manifestar maior tolerância a esse íon (10).

A capacidade de modificar o pH do meio de cultivo depende, dentre outros fatores, da absorção diferencial de cátions e ânions. Dentre todos os elementos minerais, o nitrogênio, dependendo de sua concentração e forma, parece ser o que tem maior influência no balanço iônico dos tecidos vegetais e nas variações de pH das soluções nutritivas (18).

O presente trabalho teve como principal objetivo estabelecer a inter-relação entre o balanço iônico e a capacidade das plantas de sorgo, submetidas a níveis tóxicos de alumínio, para modificar o pH das soluções nutritivas.

^{1/} Parte da tese apresentada à U.F.V., pelo segundo autor, como parte das exigências do curso de Mestrado em Fisiologia Vegetal. Pesquisa parcialmente financiada pelo CNPq.

Aceito para publicação em 23-12-1986.

^{2/} Departamento de Biologia Geral da UFV. Viçosa, MG. Bolsistas do CNPq (1.º e 4.º autores).

^{3/} Departamento Producción Vegetal, UNAH-CURLA, Apdo 89, La Ceiba, Atlántida, Honduras, C.A.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Obtenção do Material Vegetal

Nos experimentos foram utilizados dois cultivares híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor*, L. Moench), um tolerante (CMSxS-106) e outro sensível (CMSxS-903) ao alumínio, cujas sementes foram fornecidas pelo Centro Nacional de Pesquisas em Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

As sementes, após tratamento com hipoclorito de sódio a 0,5%, durante 15 minutos, e lavagem com água desmineralizada, foram colocadas para germinar em caixas com areia esterilizada em autoclave, a 110°C. Irrigaram-se as plântulas com solução nutritiva de CLARK (7), com um terço da concentração original, pH 4,0.

Após sete dias, quatro plântulas foram transplantadas para vasos de polietileno, pintados externamente de preto, e transferidas para uma sala de crescimento, de temperatura controlada ($25 \pm 3^\circ\text{C}$), sob uma densidade de fluxo luminoso de aproximadamente 150 W.m^{-2} e fotoperíodo de 16 horas. Durante o período de cultivo hidropônico as soluções nutritivas receberam arejamento contínuo.

2.2. Efeito do Alumínio sobre a Capacidade das Plantas para Modificar o pH das Soluções Nutritivas

Quatro plântulas foram cultivadas em 1,6 litro de solução nutritiva de CLARK (7), pH 4,0, com 8 m moles de nitrogênio por litro, nas seguintes proporções de $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$: 100/0, 87,5/12,5, 75/25 e 50/50. Nos sete primeiros dias, o pH foi ajustado diariamente para 4,0. Após esse crescimento inicial, as soluções nutritivas foram renovadas e as plantas submetidas a 0 e 5 ppm de alumínio, na forma de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. A partir desses dias, durante seis dias, o pH não foi mais ajustado, e, diariamente, o seu valor foi determinado potenciometricamente.

2.3. Efeito do Alumínio sobre o Balanço Iônico

Quatro plântulas, cultivadas em 2,5 litros de solução nutritiva de CLARK (7), com o pH inicialmente ajustado para 4,0, foram submetidas a 0 e 5 ppm de alumínio, na forma de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Diariamente, o pH foi ajustado para 4,0 em metade dos vasos, enquanto na outra metade seu valor foi determinado potenciometricamente. Após 14 dias, procedeu-se à colheita do material vegetal, que foi subdividido em sistema radicular e parte aérea. O material colhido foi mergulhado em HCl 0,1 N durante um — dois minutos, lavado em água corrente e, em seguida, enxaguado com água desmineralizada. Após uma pré-secagem a 60°C , por 48 horas, o material vegetal foi moído e secado novamente em estufa, a 105°C , até a obtenção de peso constante, e a matéria seca foi determinada gravimetricamente.

As amostras foram mineralizadas por via úmida, usando-se uma mistura nítrico-perclórica (1). Nos digeridos, determinaram-se os teores de Na^+ e K^+ , por fotometria de chama, Ca^{++} e Mg^{++} , por espectrofotometria de absorção atômica, NO_3^- e H_2PO_4^- , por espectrofotometria do visível, e SO_4^{--} , por turbidimetria (3, 6, 19).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Efeito do Alumínio sobre a Capacidade das Plantas para Modificar o pH das Soluções Nutritivas

Observa-se, na Figura 1, que o pH da solução nutritiva em que o nitrogênio se encontrava exclusivamente na forma de NO_3^- aumentou rapidamente, atingindo um valor em torno de 6, para os dois cultivares. Na presença de alumínio, por outro lado, o pH pouco variou, permanecendo durante o tempo do experimento em torno de 4. Em soluções nutritivas com 87,5% do nitrogênio na forma de NO_3^- e 12,5% na forma de NH_4^+ o pH decresceu ligeiramente nos primeiros dias, começando a subir a partir do quinto dia. Na presença de alumínio, o pH decresceu mais ainda, mostrando tendência de aumento apenas nos últimos dias. Nas demais situações, o pH decresceu sempre, tendo sido o decréscimo maior na presença de alumínio, exceto quando a relação $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ foi de 50/50, quando o alumínio não teve efeito sobre a variação de pH.

Os cultivares não apresentaram grande diferença no comportamento, embora o tolerante, em alguns casos, tenha mostrado tendência ligeiramente maior de acidificar o meio.

A capacidade das plantas para modificar o pH do meio depende, dentre outros fatores, da nutrição nitrogenada. Quando o nitrogênio é fornecido exclusivamente na forma de NO_3^- , o balanço de cargas é estabelecido pela liberação para o meio de OH^- e, ou, HCO_3^- , resultando no aumento do pH do meio. Na presença de NH_4^+ e, até certo ponto, dependendo de sua concentração, o balanço de cargas é mantido pela secreção de H^+ no meio de cultivo (20). O tratamento com alumínio provavelmente inibiu o sistema de absorção/assimilação do NO_3^- , passando a forma NH_4^+ a ser preferencialmente absorvida, com um conseqüente abaixamento do pH. Valores de pH abaixo de 4 têm sido atribuídos à presença de NH_4^+ , e somente depois que a sua concentração cai abaixo de certos valores o pH da solução nutritiva volta a subir (9, 13).

Em pH abaixo de 4, 90% ou mais do alumínio estão na forma de Al^{+++} , mas, à medida que o pH sobe, formam-se complexos de alumínio com OH^- , diminuindo a atividade de Al^{+++} na solução, forma preferencialmente absorvida pelas plantas, segundo sugestões de PAVAN e BINGHAM (22). Assim, para esses autores, a maior fitotoxicidade do alumínio se dá em pH 4. KERRIDGE *et alii* (15), por outro lado, acreditam que isto ocorra em pH 4,5, quando o alumínio estaria na forma de $\text{Al}(\text{OH})^{++}$. Em sorgo, o efeito mais pronunciado do alumínio sobre o crescimento radicular ocorreu em pH 4 (dados não publicados). Esse pH deve ser regularmente ajustado, pois, na presença exclusiva de NO_3^- ou após a exaustão do NH_4^+ , há um rápido aumento do pH, que pode levar a uma precipitação do alumínio, aliviando ou eliminando totalmente seus efeitos tóxicos (11, 13).

Os resultados evidenciam a utilidade da solução nutritiva modificada por CLARK (7). A referida solução, que contém 87,5% do nitrogênio na forma de NO_3^- e 12,5% na forma de NH_4^+ apresentou boa capacidade tamponante, facilitando o controle do pH durante o experimento, e permitiu boa manifestação dos efeitos tóxicos do alumínio.

3.2. Efeito do Alumínio sobre o Balanço Iônico

A influência do alumínio sobre o balanço iônico em plantas de sorgo é mostrada no Quadro 1. Observa-se que, na ausência de alumínio, o sistema radicular do

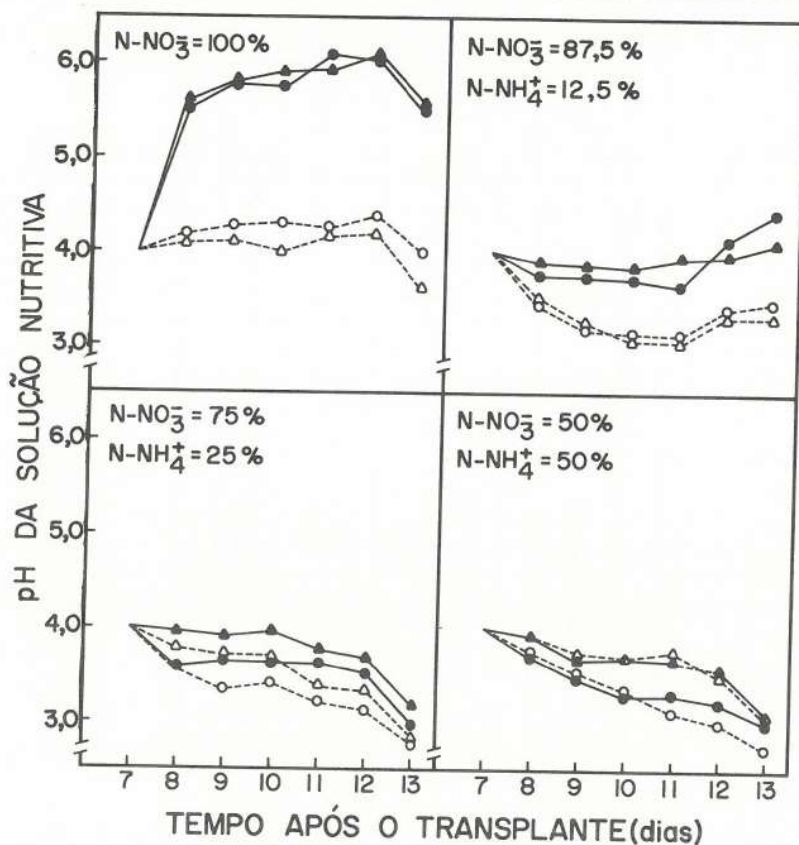


FIGURA 1 - Variação do pH de soluções nutritivas com diferentes proporções de NO_3^- e NH_4^+ , conforme o tempo de cultivo de dois cultivares de sorgo, um tolerante (\bullet — \circ) e outro sensível (\blacktriangle — \triangle), submetidos a 0 (—) e 5 ppm (----) de alumínio

cultivar sensível apresentou um teor de cátions significativamente maior do que o do cultivar tolerante. Isso resultou, basicamente, dos teores mais elevados de potássio e de sódio. Na parte aérea, somente o teor de potássio foi maior no cultivar sensível, enquanto os demais não diferiram significativamente. Na presença de alumínio, observou-se intenso efeito depressor sobre os teores dos cátions, principalmente no cultivar sensível, tanto na raiz quanto na parte aérea. No sistema radicular, o alumínio reduziu significativamente os teores de potássio e de magnésio nos dois cultivares, sendo maior a redução no sensível. O teor de sódio somente sofreu redução no cultivar sensível, mesmo assim pequena, e o de cálcio não foi modificado. Na parte aérea, o comportamento diferiu apenas no tocante à absorção do cálcio, que, nesse caso, apresentou redução significativa no cultivar sensível.

QUADRO 1 - Efeito do alumínio sobre a composição mineral do sistema radicular e da parte aérea dos dois cultivares de sorgo, expresso em meq/100 g de matéria seca*

Parte anali- sada	Cultivar	Nível de Al (ppm)	Cátions			Ânions					
			K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	Total	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁼⁼	Total
Raiz	Tolerante		26,3 bA	10,8 aA	11,5 aA	5,4 bA	54,0 bA	26,4 bA	5,9 bB	6,1 bA	38,4 bA
	Sensível	0	30,1 aA	9,8 aA	12,1 aA	6,4 aA	58,4 aA	31,9 aA	8,4 aA	8,1 aA	48,4 aA
	Tolerante		18,7 aB	10,2 aA	7,0 aB	5,4 aA	41,3 aB	6,8 aB	6,5 aB	2,9 aB	16,2 aB
	Sensível	5	18,5 aB	11,2 aA	5,4 bB	5,2 aB	40,3 aB	1,8 bB	5,6 aB	2,6 aB	10,0 bB
P. Aérea	Tolerante		11,3 bA	32,3 aA	24,7 aA	3,6 aA	71,9 aA	25,9 aA	15,7 bA	5,7 bA	47,3 bA
	Sensível	0	12,7 aA	31,9 aA	23,7 aA	3,5 aA	71,8 aA	28,1 aA	17,8 aA	7,0 aA	52,9 aA
	Tolerante		8,6 aB	32,4 aA	17,3 aB	3,5 aA	61,8 aB	4,9 aB	16,2 aA	5,2 aA	26,3 aB
	Sensível	5	4,3 bB	23,8 bB	11,9 bB	3,6 aA	43,6 bB	2,7 aB	7,9 bB	3,0 bB	13,6 bB

* As médias seguidas da mesma letra minúscula, dentro de cada nível de alumínio, e maiúscula, entre os níveis de alumínio, não diferiram estatisticamente, pelo teste F (P < 0,05).

Muitos pesquisadores têm relatado efeitos semelhantes do alumínio sobre a composição de macro e micronutrientes em diversos tipos de plantas (2, 4, 12, 13, 14). Essa redução generalizada nos teores dos cátions parece estar associada a um efeito inibitório do alumínio sobre a atividade de uma ATPase catiônica da membrana plasmática, que funcionaria no transporte de cátions através dessa membrana (4, 24).

Os teores dos ânions, de modo geral, foram mais influenciados pela presença do alumínio do que os dos cátions. Observa-se que, na ausência de alumínio, a semelhança do que já foi dito em relação aos cátions, o cultivar sensível apresentou maiores teores de ânions do que o cultivar tolerante, nas duas partes da planta. Na presença de alumínio, a situação se inverteu. Os teores de nitrato e de sulfato do sistema radicular foram os mais severamente reduzidos nos dois cultivares, ao passo que o teor de fosfato reduziu-se no cultivar sensível, não tendo sido influenciado no tolerante. Na parte aérea, observou-se redução dos teores de nitrato nos dois cultivares, enquanto a redução do teor de sulfato e de fosfato só foi significativa no cultivar sensível. Muitos pesquisadores têm relatado efeitos depressores do alumínio sobre a composição de ânions em diversos tipos de plantas (8, 12, 22). A redução generalizada dos teores dos ânions provavelmente está associada a um efeito inibitório do alumínio sobre a atividade de transportadores e, ou, sistemas enzimáticos envolvidos na redução e na assimilação de alguns ânions, principalmente o nitrato (13).

Os teores dos íons inorgânicos medidos foram reduzidos pela ação do alumínio, tanto na parte aérea quanto no sistema radicular dos dois cultivares, tendo o cultivar sensível sido o mais atingido. Observa-se que o total de cátions inorgânicos foi sempre maior do que o total de ânions inorgânicos, uma vez que não foram avaliados ânions orgânicos e outros inorgânicos, como o cloreto. Como a presença de alumínio reduziu mais o teor de ânions inorgânicos do que o de cátions, isto deve ter sido compensado pela síntese de ácidos orgânicos, que se acumulam nos vacúolos. Vários trabalhos têm relatado resultados semelhantes em diferentes espécies (16, 18).

O efeito do alumínio sobre os teores de nitrato parece ser particularmente importante, porque o nitrato é o ânion mais abundante na solução nutritiva e porque a sua absorção e, ou, assimilação produzem OH^- , que é excretado para a solução nutritiva em troca de mais nitrato ou, então, a carga negativa é passada para ácidos orgânicos, que se acumulam nos vacúolos (17). Alguns desses ácidos orgânicos, principalmente o transaconítico e o málico, podem estar ligados ao mecanismo de tolerância do sorgo ao alumínio (5).

4. RESUMOS E CONCLUSÕES

Os efeitos do alumínio sobre o balanço iônico e capacidade das plantas para modificar o pH de soluções nutritivas foram estudados em dois cultivares de sorgo: um tolerante (CMSxS-106) e outro sensível (CMSxS-903) ao elemento.

A capacidade das plantas para modificar o pH mostrou-se dependente da proporção $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ da solução nutritiva. Quando o nitrogênio foi fornecido exclusivamente na forma de NO_3^- , o pH aumentou, mas nas situações em que havia também NH_4^+ o pH tendeu a decrescer. Na presença de alumínio, o pH foi sempre menor que nos controles, exceto quando a relação $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ foi de 50/50.

O alumínio reduziu os teores de vários íons inorgânicos, especialmente K^+ , Mg^{++} , NO_3^- e SO_4^{--} , tanto no sistema radicular como parte na parte aérea dos dois cultivares, tendo o cultivar sensível sido mais influenciado. O teor de ânions, de

modo geral, sofreu uma redução mais forte que a de cátions, e pode ser essa a explicação para a tendência, manifestada pelas plantas, de acidificar a solução nutritiva, principalmente na presença de alumínio.

5. SUMMARY

(THE EFFECT OF ALUMINUM ON IONIC BALANCE AND ON THE CAPACITY OF SORGHUM TO MODIFY THE pH OF NUTRIENT SOLUTIONS)

The effect of aluminum on ionic balance and on plant-induced pH changes in the nutrient solution were studied in two cultivars of sorghum: one Al-tolerant (CMSxS-106) and one Al-sensitive (CMSxS-903).

The plant-induced pH changes were dependent upon the ratio of $\text{NO}_3\text{-N}$ to $\text{NH}_4\text{-N}$ in the nutrient solution. When the N was supplied 100% as NO_3 the pH increased but when part of the N was supplied as NH_4 the pH decreased. In the presence of aluminum the pH was always smaller than in the controls, except when the ratio of $\text{NO}_3\text{-N}$ to $\text{NH}_4\text{-N}$ was 50/50.

Aluminum reduced the content of various inorganic ions, specially K^+ , Mg^{++} , NO_3 and SO_4 , in both parts of the plants of the two cultivars. The anions were more affected than the cations and possibly this could be an explanation for the tendency of the plants to acidify the nutrient solution, specially in the presence of aluminum.

6. LITERATURA CITADA

1. ALLAN, J.E. *The preparation of agricultural samples for analysis by atomic absorption spectroscopy*. Walnut Creek, USA, Varian Techtron, 1969, 15 p. (Bull. 12/69:A.1010).
2. ANDREW, C.S.; JOHNSON, A.D. & SANDLAND, R.L. Effect of aluminum on the growth and chemical composition of some tropical and temperate pasture legumes. *Aust. J. Agric. Res.*, 24:235-239. 1973.
3. BLANCHAR, R.W.; REHM, G. & CALDWELL, A.C. Sulfur in plants material by digestion with nitric and perchloric acid. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 29: 71-72. 1965.
4. CALBO, A.G. & CAMBRAIA, J. Efeito do alumínio sobre a composição mineral de dois cultivares de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Rev. Ceres*, 27: 369-378. 1980.
5. CAMBRAIA, J.; GALVANI, F.R.; ESTEVÃO, M.M. & SANT'ANNA, R. Effects of aluminum on organic acid, sugar and amino acid composition of the root system of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *J. Plant Nutr.*, 6:313-322. 1983.
6. CATALDO, D.A.; HAROON, M.; SCHRADER, L.E. & YOUNGS, V.L. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 6:71-90. 1975.

7. CLARK, R.B. Characterization of phosphatase of intact maize roots. *J. Agric. Food Chem.*, 23:458-460. 1975.
8. CLARKSON, D.T. Interactions between aluminum and phosphorus on roots surfaces and cell wall material. *Plant Soil*, 27:347-356. 1967.
9. FLEMING, A.L. Ammonium uptake by wheat varieties differing in Al tolerance. *Agron. J.*, 75:726-730. 1983.
10. FOY, C.D.; BURNS, G.R.; BROWN, J.C. & FLEMING, A.L. Differential aluminum tolerance of two wheat varieties associated with plant induced pH changes around their roots. *Soil Sic. Soc. Amer. Proc.*, 29:64-67. 1965.
11. FOY, C.D.; CHANEY, R.L. & WHITE, M.C. The physiology of metal toxicity in plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, 29:511-566. 1978.
12. FOY, C.D. & FLEMING, A.L. Aluminum tolerance of two wheat genotypes related to nitrate reductase activities. *J. Plant Nutr.*, 5:1313-1333. 1982.
13. FOY, C.D.; FLEMING, A.L.; BURNS, G.R. & ARMIGER, W.H. Characterization of differential aluminum tolerance among varieties of wheat and barley. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 31:513-521. 1967.
14. FURLANI, P.R. & CLARK, R.B. Screening sorghum for aluminum tolerance in nutrient solutions. *Agron. J.*, 73:587-594. 1981.
15. KERRIDGE, P.C.; DAWSON, M.D. & MOORE, D.P. Separation and degrees of aluminum tolerance in wheat. *Agron. J.*, 63:586-591. 1971.
16. KIRKBY, E.A. & ARMSTRONG, M.J. Nitrate uptake by roots as regulated by nitrate assimilation in shoot of castor oil plants. *Plant Physiol.*, 65:286-290. 1980.
17. KIRKBY, E.A. & KNIGHT, A.H. Influence of the level of nitrate nutrition on ion uptake and assimilation, organic acid accumulation, and cation-anion balance in whole tomato plants. *Plant Physiol.*, 60:349-353. 1977.
18. KIRKBY, E.A. & MENGEL, K. Ionic balance in different tissues of tomato plant in relation to nitrate, urea or ammonium nutrition. *Plant Physiol.*, 42: 6-14. 1967.
19. LINDEMAN, W. Observation on the behavior of phosphate compounds in *Chlorella* at the transition from dark to light. In: UNITED NATIONS (ed.) Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 24:8-15. 1968.
20. MOORE, D.P. Physiological effects of pH on roots. In: CARSON, E.W. (ed.) *The Plant Root and its Environment*, Charlottesville, Virginia Univ. Press, 1974. p. 135-151.
21. MUGWIRA, J.M. & PATEL, S.V. Root zone pH changes and ion uptake imbalances by triticale, wheat, rye, and barley to aluminum in nutrient solution. *Agron. J.*, 68:782-787. 1976.

22. PAVAN, M.A. & BINGHAM, F.T. Toxicity of aluminum to coffee seedlings grown in nutrient solution. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 46:993-997. 1982.
23. TAYLOR, G.J. & FOY, C.D. 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. 1985.
24. WOOLHOUSE, H.W. Differences in the properties of the acid phosphatases of plant roots and their significance in the evolution of edaphic ecotypes. In: RORISON, I.H. (ed.). *Ecological Aspects of the Mineral Nutrition of Plants*. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1969. p. 357-380.