

# RELAÇÕES ENTRE CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIONS DE RAÍZES E TOXIDAZ DE ALUMÍNIO EM DUAS GRAMÍNEAS FORRAGEIRAS<sup>1</sup>

M.S. FERNANDES<sup>2</sup>, R.O.P. ROSSIELLO<sup>3</sup> e M.L.R. ARRUDA<sup>4</sup>

RESUMO - Foi estudado o efeito de Al (0; 0,75; 1,5; 3 e 6 ppm) sobre *Brachiaria decumbens* e *Cenchrus ciliaris*, espécies tolerante e sensível ao Al, respectivamente. Al não afetou o comprimento de raízes das duas gramíneas, mas houve redução do volume radicular em *Cenchrus*. Observaram-se, em *Brachiaria*, aumentos nos teores de K e Al em resposta a Al na solução, enquanto que, em *Cenchrus*, houve redução de K e aumentos nos teores de Al e Ca. Houve rápido declínio na capacidade de troca de cátions (CTC) das raízes entre 0 e 1,5 ppm, e estabilização da CTC entre 8 e 10 meq/100 g. A queda da CTC entre 0 e 0,75 ppm é acentuada em *Cenchrus* e gradual em *Brachiaria*. Em *Brachiaria*, observou-se uma correlação negativa entre CTC e acúmulo de K e Al, e uma correlação positiva entre CTC e acúmulo de Ca. Nenhuma correlação deste tipo foi observada em *Cenchrus*. Os resultados deste experimento sugerem que, em *Brachiaria*, o bloqueio de cargas das raízes por Al favorece a absorção de K em relação a Ca.

Termos para indexação: *Brachiaria decumbens*, solução nutritiva, capacidade de troca de cátions de raízes, espécies tolerantes a Al.

## ROOT CATION-EXCHANGE CAPACITY AND ALUMINUM TOXICITY RELATIONSHIPS IN TWO PASTURE GRASSES

ABSTRACT - A study was made on the effects of Al levels (0, 0.75, 1.5, 3 and 6 ppm Al) on *Brachiaria decumbens* and *Cenchrus ciliaris*, known to be tolerant and sensitive to Al, respectively. There was no difference in root length between the two grasses but *Cenchrus* showed a reduction in root volume as Al levels increased. *Brachiaria* showed a small increase in K and a great increase in Al content as Al levels increased while *Cenchrus* showed reduction in K, increase in Ca, and small increase in Al levels. Both plants had a decrease in root cation-exchange capacity (CEC) under 0 to 1.5 ppm Al; after that, there was a stabilization of CEC levels around 8 to 10 meq/100 g. The CEC decrease in *Cenchrus* was linear and sharp from 0 to 0.75 ppm Al while in *Brachiaria* it occurred more slowly. In *Brachiaria* there was a negative correlation between CEC and K and Al accumulation, and a positive correlation between CEC and Ca accumulation. No such correlations were obtained for *Cenchrus*. The results suggest that at least for the tolerant species (*Brachiaria*) the blocking of CEC sites by Al favours K uptake over Ca uptake.

Index terms: *Brachiaria decumbens*, nutrient solution, root-exchange capacity, Al-tolerant species.

## INTRODUÇÃO

A capacidade de troca catiônica (CTC) das raízes origina-se da dissociação de grupos carboxílicos ao nível da parede celular (Crooke & Knight 1962). De fato, existe uma relação linear entre o teor de ácidos urônicos e a CTC das raízes (Crooke 1964). A interfase apoplasto-solução pode ser dividida, conceitualmente, em duas camadas, à semelhança dos sistemas coloidais inorgânicos (Demarty et al. 1980). A primeira, sob influência direta da matriz polianiónica da parede celular, tem sido de-

nominada espaço livre do Donnan, e a outra, independente, é conhecida como espaço livre de água, no sentido de que nela o fluxo de cátions e ânions é igual ao da solução externa (Demarty et al. 1980). A primeira camada tem despertado considerável interesse, já que a distribuição iônica nela deveria seguir as predições da teoria de Donnan (Huffaker & Wallace 1958, Demarty et al. 1980). Assim, dadas duas espécies vegetais, aquela com menor densidade de carga negativa, ao nível do apoplasto radicular, deveria oferecer menor restrição ao fluxo de cátions monovalentes em relação aos divalentes, até os locais de absorção, ao nível da plasmalema (Crooke 1964, Helyar 1978). Especificamente, Huffaker & Wallace (1958) apresentaram a expressão:

$$\frac{CTC_A}{CTC_B} = \frac{K_B}{K_A} = \left( \frac{Ca_A}{Ca_B} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (1),$$

<sup>1</sup> Aceito para publicação em 19 de março de 1984. Contribuição do Dep. de Solos da UFRRJ, km 47 Rod. Rio-São Paulo, CEP 23460 Seropédica, RJ.  
<sup>2</sup> Eng<sup>o</sup>-Agr<sup>o</sup>, Ph.D., Prof.-Adj., UFRRJ.  
<sup>3</sup> Eng<sup>o</sup>-Agr<sup>o</sup>, M.S., Prof.-Assist., UFRRJ.  
<sup>4</sup> Eng<sup>o</sup>-Agr<sup>o</sup>, M.S., Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), Caixa Postal 515, CEP 30000 Belo Horizonte, MG.

válida para duas espécies vegetais diferentes (A e B), em relação à absorção de potássio (K) e cálcio (Ca). Esses autores encontraram correlações significativas entre os termos da expressão (1), quando aplicada a citros, soja e milho. Os conceitos anteriores têm sido também aplicados ao estudo da resistência à toxidez de alumínio (Al), visto que, presumivelmente, numa espécie tolerante, baixa CTC deve favorecer maior exclusão de íons trivalentes em relação aos di e monovalente (Vose & Randall 1962, Helyar 1978). Por outro lado, em espécies tolerantes que acumulam Al nas raízes, é de esperar que o progressivo bloqueio de cargas negativas no espaço livre, facilite a absorção aniônica, (Foy 1974).

Neste trabalho, estudam-se as relações entre a acumulação de K, Ca e Al e a CTC, em duas gramíneas forrageiras (*Brachiaria decumbens* e *Cenchrus ciliaris*), em resposta à aplicação de cinco níveis de Al em solução nutritiva. Ambas as espécies mostram diferenças marcantes na capacidade de resistir a concentrações elevadas de Al, tanto em solo como em solução nutritiva.

#### MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação e as plantas foram cultivadas em solução nutritiva com Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> como fonte de N. A composição da solução nutritiva foi dada anteriormente (Arruda et al. 1983).

O delineamento experimental foi o tipo fatorial, com cinco concentrações de Al, duas espécies e três repetições. Sementes de *Brachiaria decumbens* (obtidas de fonte comercial) e de *Cenchrus ciliaris* (da coleção do Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Leite, da EMBRAPA), foram germinadas em areia lavada, sendo umedecidas, quando necessário, com solução nutritiva. Detalhes adicionais sobre as condições de crescimento são dados em outro trabalho (Arruda et al. 1983). O período experimental foi iniciado quatro semanas após a emergência das plantas, usando-se seis plantas por vaso de 8 litros. Nessa ocasião, o pH da solução nutritiva foi ajustado para 4,2 e Al na forma de Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.18H<sub>2</sub>O, acrescentado nos seguintes níveis: 0; 0,75; 1,5; 3,0; e 6,0 ppm. A solução nutritiva usada é comparável, com ligeiras diferenças, com a solução a 0,25 de força iônica de Hoagland e Arnon, usada por Pavan & Bingham (1982), e para a qual esses autores determinaram, usando a mesma fonte de Al que a do presente trabalho, que acima de 80% do Al adicionado deve estar como Al<sup>3+</sup>, a valores de pH de 4,0 ± 0,2. Após a adição de Al à solução, o pH desta foi medido diariamente e ajustado para 4,2 a cada 48 horas, por adição de quantidades

apropriadas de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0,1N), ocasião em que também eram controladas as concentrações de N e P na solução. Como consequência da fonte de N empregada (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), as plantas de ambas as espécies elevaram significativamente o pH da solução externa, na faixa de 0 - 1,5 ppm de Al adicionado. As variações máximas, registradas 48 horas após a troca da solução, verificaram-se ao nível de 0 ppm de Al com oscilações positivas médias de 2,24 unidades de pH para *B. decumbens* e 2,80 para *C. ciliaris*. A partir de 3,0 ppm de Al adicionado, a elevação de pH foi pequena, não ultrapassando pH 5,0 durante todo o período experimental. As variações de pH da solução induzidas por *B. decumbens* foram discutidas previamente (Arruda et al. 1983). Após quatro semanas de tratamento experimental, no qual a solução nutritiva foi trocada semanalmente, as plantas foram colhidas, após registro do número de perfilhos por vaso. As raízes foram separadas da parte aérea, secadas ligeiramente (com toalha de papel) e imersas em uma proveta, para aferição do volume radicular. O material colhido (parte aérea e raízes) foi, subsequentemente, secado (70°C) e moído (Wiley, 40 mesh). Raízes e parte aérea foram analisadas para K, Ca, Al e P, após digestão secada a 500°C. Os teores de Al e P foram determinados colorimetricamente, segundo Otomo (1963) e Leece & Short (1967), respectivamente. Os teores de K foram determinados por fotometria de chama, e os da Ca, por complexometria com EDTA. Os teores de N foram determinados por destilação (Bremner & Keeney 1965). Em subamostras de 200 mg de raízes secadas e moídas, a CTC foi medida segundo o método de Croke (1964).

#### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, deve ser destacado que o período de crescimento pré-estresse (quatro semanas após emergência) ao qual foram submetidas as plantas, deve ser favorecido a espécie mais sensível (*C. ciliaris*), atenuando nela os efeitos da adição de Al à solução, visto que as respostas mais drásticas à toxidez de Al manifestam-se no estágio de plântula (Rorinson 1958, Helyar 1978). Ao final do período experimental, *C. ciliaris* produziu uma quantidade maior de matéria seca total (raiz + parte aérea) do que *B. decumbens* (ao nível 0 de Al adicionado, Tabela 1). Entretanto, em termos relativos (6 Al/0 Al), *B. decumbens* teve reduzida a sua produção total 30,4%, e *C. ciliaris* 51,7% (Tabela 1). Contrariamente a outros trabalhos, neste experimento, o comprimento máximo de raízes não foi grandemente afetado em ambas as espécies, mas *B. decumbens* mostrou menor redução em volume radicular do que *C. ciliaris*. O perfilhamento foi

TABELA 1. Efeitos de dois níveis de alumínio sobre parâmetros de crescimento da *B. decumbens* e *C. ciliaris*, cultivadas em solução nutritiva.

Parâmetros	Nível de Al (ppm)	<i>B. decumbens</i>	<i>C. ciliaris</i>	6 Al/0 Al (%)	
				<i>B. decumbens</i>	<i>C. ciliaris</i>
Matéria seca total (g. vaso <sup>-1</sup> )	0	20,95 a*	35,19 a	69,6	48,3
	6	14,59 b	16,98 b		
Raiz/p. aérea (g.g. <sup>-1</sup> )	0	0,15 a	0,12 a	93,3	125,0
	6	0,14 a	0,15 a		
Número de perfilhos por vaso	0	35 a	24 a	48,6	45,8
	6	17 a	11 b		
Comprimento máximo da raiz (cm)	0	38,0 a	43,0 a	84,2	87,4
	6	32,0 d	37,6 a		
Volume radicular (cm <sup>3</sup> .vaso <sup>-1</sup> )	0	51,6 a	57,0 a	64,5	45,6
	6	33,3 b	26,0 b		

\* Valores médios de três repetições. Letras diferentes para parâmetros dentro de cada espécie indicam diferenças significativas, ao nível de 5%, pelo teste de Tukey.

afetado numa proporção similar em ambas as espécies (Tabela 1).

Na Tabela 2, são apresentadas as quantidades totais de K, Ca e Al (mg/vaso) acumuladas pelas duas espécies, em resposta aos níveis de Al adicionados. Dadas as diferenças mencionadas em crescimento, em termos absolutos, *C. ciliaris* acumulou inicialmente mais K e Ca do que *B. decumbens*, acontecendo o contrário com respeito a Al. Quando os teores acumulados são comparados em igualdade de matéria seca total produzida (meq/100 g), verifica-se que *B. decumbens* aumentou ligeiramente o teor de K, e drasticamente, o de Al, em resposta à adição de níveis crescentes de Al na solução (Tabela 2). Em comparação, *C. ciliaris* teve maior redução no conteúdo de K, mas manteve maiores teores de Ca e acumulou quantidades menores de Al. As diferenças em acumulação total, particularmente de K e Al, podem ser consideradas como indicadores de tolerância diferencial de ambas as espécies ao Al tóxico (Foy 1974, Arruda 1982).

Na Fig. 1, é mostrada a variação da CTC das raízes de ambas as espécies, em função dos níveis de Al adicionados. Para ambas as espécies, as quedas mais marcantes ocorrem entre 0 e 1,5 ppm de Al adicionado à solução. Acima de 3,0 ppm, os dados indicam uma aparente estabilização do valor de CTC

nas duas espécies, na faixa de 8 a 10 meq/100 g (Fig. 1). Calbo & Cambraia (1980) observaram que a curva de acumulação de Al em raízes de sorgo mostrou duas fases distintas, com uma pseudo-saturação entre 4 e 6 ppm de Al adicionado à solução. No presente caso, os dados indicam tendência à estabilização do valor da CTC acima de 3,0 ppm de Al, o que pode ser indicativo de uma certa saturação dos sítios mais facilmente acessíveis para a ligação de Al, admitindo-se que esses sítios se localizem, primariamente, ao nível do apoplasto radicular (Foy 1974, Klimashevskii & Dedov 1976, Helyar 1978). Adições de Al à solução nutritiva também produzem diminuição da CTC em raízes de variedades de *Lolium* sp., independentemente de sua sensibilidade ao Al (Vose & Randall 1962). Neste experimento, notam-se diferenças nas duas espécies (Fig. 1). Assim, *C. ciliaris* mostrou declínio brusco de CTC, com apenas 0,75 ppm de Al na solução, sem aparente correspondência com o teor de Al acumulado (Fig. 1 e Tabelas 2 e 3). As plantas de *B. decumbens* mostraram tendência mais gradual de redução, que guarda melhor correspondência com os teores de acumulação total e radicular de Al nessas plantas (Tabela 3).

Na Tabela 3, são apresentados os coeficientes de correlação entre a acumulação de K, Ca e Al (planta inteira ou raiz) e os respectivos valores de

TABELA 2. Conteúdo total e teores acumulados de potássio, cálcio e alumínio por plantas de *B. decumbens* e *C. ciliaris*, cultivadas em solução nutritiva, em resposta à aplicação de cinco níveis de alumínio.

Al (ppm)	<i>B. decumbens</i>					
	Potássio		Cálcio		Alumínio	
	mg/vaso	meq/100 g	mg/vaso	meq/100 g	mg/vaso	meq/100 g
0	884,3 a*	108,2	40,0 a	9,6	9,5 c	5,1
0,75	715,6 a	98,4	16,6 bc	4,5	12,2 bc	7,3
1,5	823,2 a	124,9	15,9 bc	4,7	18,2 bc	11,9
3,0	832,4 a	118,3	16,9 bc	4,4	30,7 a	18,9
6,0	743,5 a	130,7	9,4 c	2,2	33,8 a	25,8
$\frac{6 \text{ Al}}{0 \text{ Al}}$ (%)	84,1	120,8	23,5	33,3	355,8	506,0

Al (ppm)	<i>C. ciliaris</i>					
	Potássio		Cálcio		Alumínio	
	mg/vaso	meq/100 g	mg/vaso	meq/100 g	mg/vaso	meq/100 g
0	2143,5 a*	156,2	54,1 a	7,7	13,0 b	4,1
0,75	1768,5 ab	158,0	36,3 b	6,2	15,4 b	6,0
1,5	1483,2 b	157,9	26,0 c	5,4	18,7 ab	8,6
3,0	1076,8 bc	119,2	26,1 c	5,6	26,1 a	12,5
6,0	670,5 c	101,3	14,3 d	4,2	18,9 a	12,4
$\frac{6 \text{ Al}}{0 \text{ Al}}$ (%)	31,3	64,9	26,4	54,5	145,4	302,4

\* Dentro das colunas, médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente, ao nível de 5%, pelo teste de Tukey.

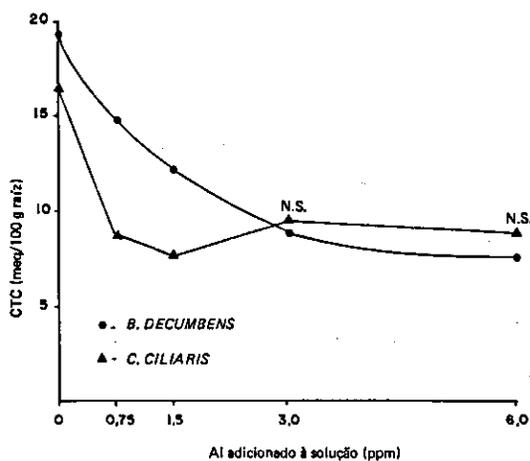


FIG. 1. Variação da CTC de raízes de *B. decumbens* e *C. ciliaris*, em função da adição de doses crescentes de Al na solução nutritiva.

CTC para as duas espécies. Observa-se que, de forma geral, a CTC de *B. decumbens* relaciona-se, de forma consistente, com seus valores de acumulação de K, Ca e Al, enquanto que *C. ciliaris* mostra coeficientes menores, que, em todos os casos, não atingem significação estatística ao nível de 5%. Para *B. decumbens*, a consideração do teor radicular, isoladamente, melhora os coeficientes de correlação entre CTC, K e Ca; para *C. ciliaris*, isto vale somente no caso de K (Tabela 3). Para *B. decumbens*, as relações mais consistentes foram entre CTC e as relações Ca/Al (Fig. 2a), K/Al (Fig. 2b) e K/Ca (Fig. 2c). Relações similares para *C. ciliaris* não atingem significação estatística (dados não apresentados). Tomadas em conjunto, estas relações sugerem que, ao menos em *B. decumbens* (a espécie mais resistente à toxidez de Al, Tabela 1), a diminuição da CTC pelo progressivo bloqueio das cargas negativas do espaço livre pela adição de Al, deve favorecer maior absorção de K do que de Ca.

TABELA 3. Coeficientes de correlação simples (r) entre CTC e acumulação de K, Ca e Al em *B. decumbens* e *C. ciliaris*.

	<i>B. decumbens</i>	<i>C. ciliaris</i>
CTC x K(T)*	-0,732	0,250
x K(R)	-0,959***	-0,590
x Ca(T)	0,879**	0,864
x Ca(R)	0,893**	-0,152
x Al(T)	-0,938**	-0,603
Al(R)	-0,905**	-0,515
	Planta inteira	raiz
$\frac{CTC_{Br}}{CTC_{Ce}} \times \frac{K_{Ce}}{K_{Br}}$	0,806	0,944**
$\frac{CTC_{Br}}{CTC_{Ce}} \times \left(\frac{Ca_{Br}}{Ca_{Ce}}\right)^{1/2}$	-0,109	0,781
$\frac{K_{Ce}}{K_{Br}} \times \left(\frac{Ca_{Br}}{Ca_{Ce}}\right)^{1/2}$	0,330	0,885**

\* CTC e teores de K, Ca e Al em meq/100 g (matéria seca). Teores na planta inteira (T) ou na raiz (R).

\*\* Significativo a 5%.

\*\*\* Significativo a 1%.

Também, na Tabela 3, são mostradas as correlações obtidas entre as relações da CTC de ambas as espécies, com suas correspondentes acumulações de K e Ca, tais como apresentadas por Huffaker & Wallace (1958) a partir da expressão (1). Novamente, a consideração isolada dos teores radiculares melhora os valores de correlação, particularmente de CTC x K (r = 0,944) e K x Ca (r = 0,885) (Tabela 3).

Na Fig. 3a, são mostrados os valores de acumulação de N e P nas duas espécies. Na base de meq/100 g, observa-se que *B. decumbens* aumentou 7% a absorção de N, quando o nível de 6 ppm Al é relacionado ao nível 0 ppm. Em *C. ciliaris*, o teor declina bruscamente a partir de 3,0 ppm; ao nível maior de Al adicionado, a acumulação representa 79% daquela, ao nível 0 (Fig. 3a). Com respeito à absorção de P, os dados mostram tendência similar (Fig. 3b). Para *B. decumbens*, os máximos de acumulação verificam-se entre 0,75 - 1,5 ppm, enquanto que, para *C. ciliaris*, o teor praticamente não muda entre 0 - 3,0 ppm. Aumentos, ou pelo

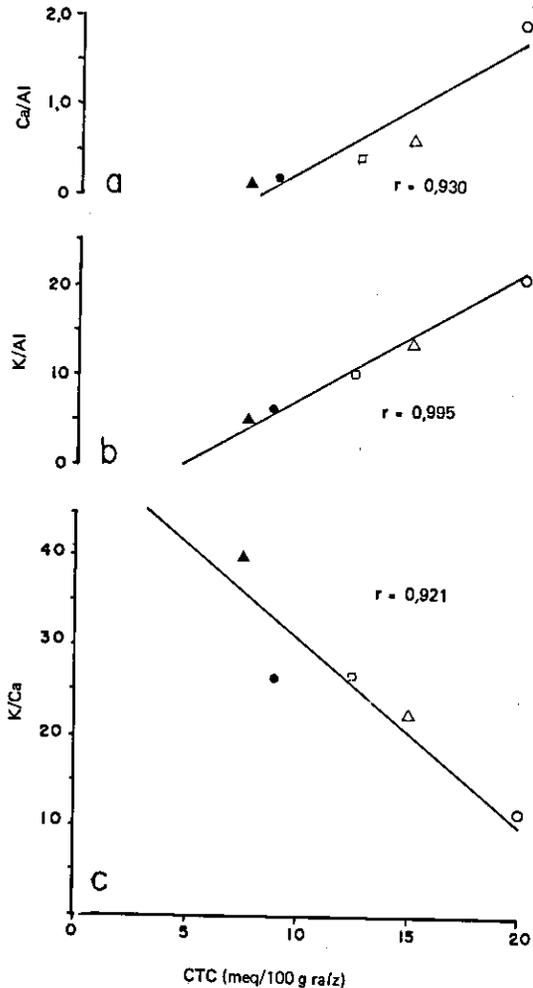


FIG. 2. Relações entre Ca/Al (a), K/Al (b), K/Ca (c) e CTC de raízes de *B. decumbens*. Níveis de Al na solução (em ppm): o = 0 Al; Δ = 0,75 Al; □ = 1,50 Al; ● = 3,00 Al; ▲ = 6,00 Al.

menos a manutenção da acumulação aniônica (no caso,  $NO_3^-$  e  $H_2PO_4^-$ ), são uma consequência esperada do modelo da dupla camada, em situações em que a densidade de cargas negativas da parede celular é diminuída (Fig. 1), desde que o processo implique menor exclusão de ânions, ao nível do espaço livre radicular (Foy 1974, Demarty et al. 1980). Contudo, para o caso de P, é possível que a sua maior parte esteja localizada ao nível da parede celular, sem participação ativa no metabolismo (Aruda 1982).

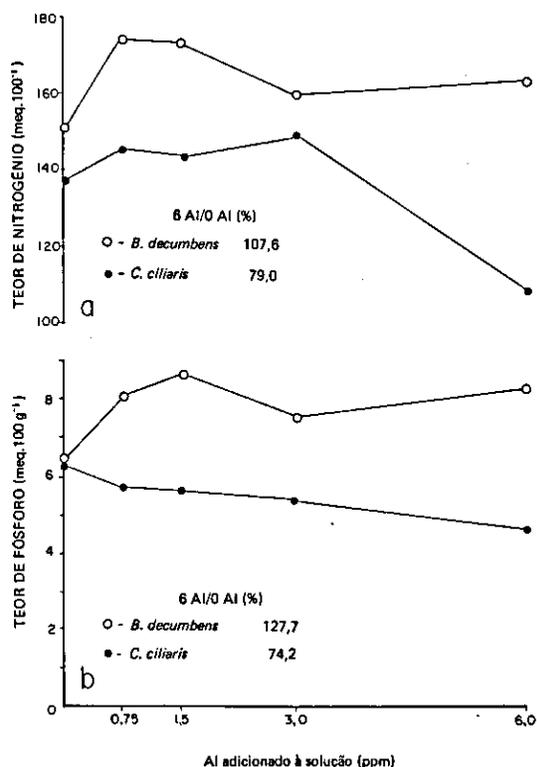


FIG. 3. Teores de nitrogênio (a), e teores de fósforo (b) em meq/100 g<sup>-1</sup> (matéria seca total) acumulados por *B. decumbens* e *C. ciliaris*, em resposta a doses crescentes de Al na solução nutritiva.

As correlações mostradas na Tabela 3 e Fig. 2 podem ser interpretadas no sentido de que, em uma espécie tolerante ao Al (*B. decumbens*), a associação entre CTC e absorção catiônica é muito mais forte que numa espécie susceptível (*C. ciliaris*). Embora esse possa ser o caso, deve ser observado que essas correlações não implicam que a CTC esteja casualmente relacionada com a absorção iônica, podendo ser apenas o resultado da covariação dos efeitos da adição de Al sobre a CTC e a absorção de nutrientes. Em particular, dois fatores podem estar atuando de forma complexa: a) variações de pH na solução externa, induzidas por desbalanços na relação entre cátions e ânions, as quais, por sua vez, modificarão as formas iônicas e/ou a solubilidade de vários nutrientes na solução externa (Luisi et al. 1983, Arruda 1982); b) depo-

sições intracelulares de Al, as quais podem afetar o metabolismo energético (Helyar 1978) e, por essa via, a absorção iônica, particularmente do K<sup>+</sup> (Helyar 1978).

Os dados do presente trabalho, embora preliminares, indicam que seria de grande interesse a verificação das relações entre acumulação de nutrientes e CTC, numa gama mais ampla de espécies (ou cultivares) com tolerância diferencial ao Al tóxico.

## CONCLUSÕES

1. A espécie mais sensível ao Al (*C. ciliaris*) mostrou maior redução da produção de matéria seca, maior relação raiz/parte aérea e menor volume radicular do que a espécie mais tolerante (*B. decumbens*), quando submetida a níveis crescentes de Al.

2. Ambas as espécies mostraram acentuada redução da CTC radicular com níveis crescentes de Al, sendo que, em *C. ciliaris*, observou-se uma redução brusca de CTC entre 0 e 0,75 ppm de Al. Observou-se, ainda, em ambas as espécies, uma estabilização da CTC entre 8 e 10 meq/100 g, a partir de 3 ppm de Al na solução. Na espécie mais tolerante (*B. decumbens*), essa diminuição da CTC das raízes parece ter favorecido a absorção de K em relação a Ca.

3. Os resultados indicam que o estudo das relações entre CTC e absorção de nutrientes, numa gama ampla de tolerância diferencial ao Al, seria de grande interesse.

## REFERÊNCIAS

- ARRUDA, M.L.R. Estudo da tolerância à toxidez de alumínio em gramíneas forrageiras. Rio de Janeiro, UFRJ, Departamento de Solos, 1982. 141p.
- ARRUDA, M.L.R.; FERNANDES, M.S. & ROSSIELLO, R.O.P. Alumínio e nitrogênio, nas variações de pH e a CTC de *Brachiaria decumbens*. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 18(9):1031-6, 1983.
- BREMNER, I.M. & KEENEY, D.R. Steam distillation methods for determination of ammonium, nitrate and nitrite. *Anal. Chim. Acta*, 32:485-95, 1965.
- CALBO, A.G. & CAMBRAIA, J. Efeito do alumínio sobre a composição mineral de dois cultivares de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Ceres*, 27: 369-78, 1980.
- CROOKE, W.M. The measurement of the cation-exchange capacity of plant roots. *Plant and Soil*, 21:43-9, 1964.

- CROOKE, W.M. & KNIGHT, A.H. An evaluation of published data on the mineral composition of plants in the light of the cation-exchange capacities of their roots. *Soil Sci.*, 93:365-73, 1962.
- DEMARTY, M.; RIPOLL, C. & THELLIER, M. Ion exchange in plant cell walls. In: SPANSWICH, R.M.; LUCAS, W.J. & DAINTY, J., eds. *Plant membrane transport. Conceptual issues.* Amsterdam, Elsevier/North-Holland Biomedical Press, 1980. p.33-44.
- FOY, C.D. Effects of aluminum on plant growth. In: CARSON, E.W., ed. *The plant root and its environment.* Charlottesville, The University Press of Virginia, 1974. p.601-42.
- HELYAR, K.R. Effects of aluminium and manganese toxicities on legume growth. In: ANDREW, C.S. & KAMPRATH, E.J., ed. *Mineral nutrition of legumes in tropical and subtropical soils.* Melbourne, CSIRO, 1978. p.207-32.
- HUFFAKER, R.C. & WALLACE, A. Possible relationships of cation-exchange capacity of plant roots to cation uptake. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 22:392-4, 1958.
- KLIMASHEVSKII, E.L. & DEDOV, V.M. Localization of the mechanism of growth inhibiting action of  $Al^{3+}$  in elongating cell walls. *Soviet Plant Physiol.*, 22:1040-6, 1976.
- LEECE, D.R. & SHORT, C.C.A. A routine procedure for the nutrient element analysis of peach leaves utilizing atomic absorption spectroscopy. s.l., New South Wales Dept. of Agric. Division of Scientific Services, 1967. (Chem. Branch Bull., August).
- LUIZI, M.V.V.; ROSSIELLO, R.O.P. & FERNANDES, M.S. Acidificação do rizocilindro de milho em resposta à absorção de nutrientes e sua relação com o crescimento radicular. *R. bras. Ci. Solo*, 7:69-71, 1983.
- OTOMO, M. The spectrophotometric determination of aluminum with Xylenol orange. *Bull. Chem. Soc. Japan*, 36:809-13, 1963.
- PAVAN, M.A. & BINGHAM, F.T. Toxicity of aluminum to coffee seedlings grown in nutrient solution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:993-7, 1982.
- RORINSON, I.H. The effect of aluminum on legume nutrition. In: HALLWORTH, E.G., ed. *Nutrition of legumes.* London, Butterworths Sci. Pub., 1958. p.183-201.
- VOSE, P.B. & RANDALL, P.J. Resistance to aluminum and manganese toxicities in plants related to variety and cation-exchange capacity. *Nature*, 196:85-6, 1962.