



INFLUÊNCIA DO ALUMÍNIO DE UM PODZÓLICO VERMELHO-AMARELO DO ACRE SOBRE O CRESCIMENTO DAS PLANTAS⁽¹⁾

J. R. N. F. GAMA⁽²⁾ & J. C. KIEHL⁽³⁾

RESUMO

Este trabalho foi realizado em Piracicaba (SP), em 1995, com o objetivo de investigar a causa da ausência de sintomas de toxidez de alumínio ou da redução de produtividade de plantas cultivadas em um solo Podzólico Vermelho-Amarelo do Acre. O teor de Al trocável nesse solo ultrapassa $14 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no horizonte B. Amostras dos horizontes A e B foram incubadas com diferentes doses de calcário e submetidas à determinação do pH em H_2O , do pH em CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ e do teor de Al trocável extraído com KCl 1 mol L^{-1} e determinado por titulação com NaOH $0,02 \text{ mol L}^{-1}$ e por espectrofotometria de absorção atômica. Em outro experimento, quatro espécies ou cultivares (arroz, cultivares Fernandes e IAC 1131; feijão, cultivar Rosinha, e milho, cultivar C511-A) foram plantados em vasos contendo amostras dos horizontes A e B do solo em estudo; em 50% dos vasos, as amostras foram previamente tratadas com carbonatos de cálcio e de magnésio para elevar a saturação por bases a 80%. Após 60 dias, as raízes e a parte aérea foram secas, pesadas e submetidas à determinação do teor de Al. Em uma terceira etapa, foi determinado o teor de alumínio na solução do solo, empregando-se extratos da pasta de saturação de amostras incubadas com doses crescentes de calcário. Os teores de Al trocável obtidos por titulação do extrato com NaOH $0,02 \text{ mol L}^{-1}$ mostraram-se coerentes com os determinados por espectrofotometria de absorção atômica. A influência da calagem sobre a produção de matéria seca e sobre a absorção de Al pelas plantas foi pequena, não havendo relação clara entre o desenvolvimento destas ou ocorrência de sintomas de toxidez e a presença de Al trocável nesse solo. As amostras não tratadas com corretivos apresentaram teores elevados de Al na solução; contudo, não foram observados sintomas de toxidez nos vegetais. No Podzólico Vermelho-Amarelo estudado, o teor de alumínio trocável e a concentração de Al na solução não constituíram índices adequados para estimar a toxidez desse elemento nas plantas.

Termos de indexação: alumínio trocável, alumínio na solução do solo, alumínio na planta, toxidez do alumínio, arroz, feijão, milho.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo - ESALQ/USP. Trabalho apresentado no XXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, realizado em Viçosa (MG). Recebido para publicação em novembro de 1997 e aprovado em novembro de 1998.

⁽²⁾ Pesquisador da Embrapa Amazônia Oriental. Caixa Postal 48, CEP 66000-000 Belém (PA).

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP, Caixa Postal 9. CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: jdckiehl@carpa.ciagri.usp.br.

SUMMARY: ALUMINUM INFLUENCE ON PLANTS GROWN IN A BRAZILIAN RED-YELLOW PODZOLIC SOIL

The present study was carried out in 1995 to investigate why plants cultivated in a Red-Yellow Podzolic in the State of Acre, in the Brazilian Amazon, presenting high amounts of exchangeable aluminum, have not shown symptoms of toxicity to this element or yield reduction. The exchangeable Al^{3+} in the B horizon is higher than $14 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Samples of the A and B horizons were incubated with increasing rates of lime and subjected to determination of pH in H_2O , pH in $0.01 \text{ mol L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ and of the content of exchangeable Al extracted with $1 \text{ mol L}^{-1} \text{ KCl}$, determined either by titration with $0.02 \text{ mol L}^{-1} \text{ NaOH}$ or by atomic absorption spectrophotometry. In a second experiment, two cultivars of rice plus common beans and corn were planted in pots containing samples of the A and B horizons of the soil; in 50% of the pots the samples were previously limed in order to increase the base saturation to 80%. After 60 days, plant roots and tops were removed, dried, weighed and subjected to determination of Al. In a third study, aluminum concentration in the soil solution was determined utilizing extracts collected from saturated samples previously incubated with increasing rates of lime. The concentrations of exchangeable Al determined by titration with $0.02 \text{ mol L}^{-1} \text{ NaOH}$ were similar to those obtained by atomic absorption spectrophotometry. The influence of liming on dry matter yield and the absorption of Al by the plants was small and no clear relation was found between plant development or toxicity symptoms and exchangeable Al in the soil. The non-limed soil showed high concentrations of Al in the solution; however, toxicity symptoms were not found in the plants. For the Red-Yellow Podzolic, the exchangeable Al and the concentration of Al in solution were not reliable indexes for estimating the toxicity of this element to plants.

Index terms: exchangeable aluminum, aluminum in soil solution, aluminum in plants, aluminum toxicity, rice, common bean, corn.

INTRODUÇÃO

O alumínio trocável, importante componente da acidez potencial dos solos tropicais, exerce efeitos tóxicos sobre o crescimento dos vegetais, notadamente sobre o sistema radicular, reduzindo a absorção e translocação de fósforo, cálcio e magnésio na planta e, conseqüentemente, a produtividade da cultura. A solubilidade do alumínio no solo e sua toxidez para as plantas dependem, segundo Foy (1974), de fatores como pH do solo, conteúdo de matéria orgânica, características mineralógicas da fração argila e concentração de outros cátions na solução do solo. O alumínio é especialmente tóxico em solos com pH abaixo de 5,0, mas pode causar problemas mesmo quando o pH é 5,5 (Mesquita Filho & Souza, 1986). Para Mengel & Kirkby (1987), os solos ácidos das regiões tropicais apresentam elevada restrição à produtividade das culturas dada a toxidez do alumínio e do manganês.

O alumínio atua principalmente no sistema radicular, interferindo nas reações energéticas e na absorção e transporte de água e nutrientes (Foy, 1966, 1992), ao mesmo tempo em que interfere na deposição de polissacarídeos nas paredes celulares (Foy et al., 1973; Foy, 1974). De acordo com Roy et al. (1988), o alongamento das raízes fica impedido em

virtude da redução da atividade mitótica provocada pelo alumínio, com subsequente aumento da susceptibilidade da planta à seca. As raízes, órgão mais sensível dos vegetais ao excesso de alumínio, apresentam-se curtas, grossas, frágeis, com ápices espessos e coloração marrom; há formação de raízes laterais, cujo crescimento também é reduzido (Foy, 1974).

O alumínio trocável ocorre em quantidades elevadas em muitos solos brasileiros, dentre os quais um dos mais representativos no estado do Acre é classificado como Podzólico Vermelho-Amarelo. Este solo, contudo, apresenta características que o diferem dos demais Podzólicos da Amazônia e mesmo do Brasil. Gama (1986) constatou presença de vidros vulcânicos, altos teores de minerais primários, alta atividade coloidal decorrente da presença dominante de minerais de argila 2:1, CTC elevada, material amorfo alofânico superior a 17% e teores de cálcio, magnésio e alumínio trocáveis altos, simultaneamente. Esse autor encontrou valores de cálcio mais magnésio acima de $8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ no horizonte A, bem como teores de Al^{3+} superiores a $2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. No horizonte B, os teores de alumínio estavam acima de $8,8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, atingindo $13,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ em algumas áreas, enquanto os teores de cálcio mais magnésio eram superiores a $9 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

Embora contendo elevados teores de alumínio trocável, o primeiro autor deste artigo verificou "in loco" que as plantas cultivadas no Podzólico Vermelho-Amarelo pelos agricultores da região não apresentaram sintomas de toxidez a esse elemento ou redução da produtividade. Assim, neste trabalho, procurou-se investigar, por meio de experimentos realizados em laboratório e casa de vegetação, a causa da ausência de tais sintomas de toxidez.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em Piracicaba (SP), com amostras dos horizontes A (0-23 cm) e B (23-52 cm) de um Podzólico Vermelho-Amarelo localizado no município de Sena Madureira, estado do Acre. As amostras foram secas ao ar, passadas em peneira de 2 mm de malha e submetidas à análise química, segundo EMBRAPA (1979) (Quadro 1).

Em um experimento, amostras em triplicata foram tratadas com doses 0, 1, 2, 4 e 6 g kg⁻¹ de CaCO₃, para o horizonte A, e 0, 2, 4, 6 e 8 g kg⁻¹, para o horizonte B, umedecidas a 50% da capacidade de retenção de água e incubadas por 14 dias. Após, procedeu-se à determinação do pH em água e em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ na relação de 1:2,5 e o teor de Al trocável extraído com solução de KCl 1 mol L⁻¹ (relação 1:20), sendo determinado por titulação com NaOH 0,02 mol L⁻¹ e por espectrofotometria de absorção atômica. Os resultados foram submetidos à análise de variância, sendo as médias entre os métodos de determinação do teor de Al trocável comparadas pelo teste de Tukey a 5%.

Outro experimento foi realizado em casa de vegetação, utilizando vasos com 3 dm³ de terra, em delineamento experimental inteiramente casualizado com três repetições. Os tratamentos, em número de 16, foram arranjados em fatorial envolvendo dois horizontes do solo em estudo (A e B), duas doses de carbonatos (sem e com) e quatro cultivares ou espécies de planta (arroz cultivar Fernandes, com alta tolerância ao alumínio, e cultivar IAC 1131, com baixa tolerância ao alumínio, segundo Fageria & Zimmermann, 1979; feijão cultivar Rosinha, com

tolerância média ao alumínio, e milho cultivar C511-A, altamente sensível ao alumínio, de acordo com Fageria & Kluthcouski, 1980). Os carbonatos foram aplicados na forma de uma mistura de carbonato de cálcio e de carbonato de magnésio na proporção de 4:1, nas doses de 1,58 e 7,89 cmol_c kg⁻¹, para as amostras dos horizontes A e B, respectivamente, calculadas para elevar a porcentagem de saturação por bases a 80%. As terras foram umedecidas a 50% da capacidade de retenção de água e incubadas por 15 dias.

Todas as amostras do horizonte A receberam adição de 150, 100 e 100 mg kg⁻¹ de N, P e K, respectivamente, enquanto as do horizonte B foram tratadas com 150, 300 e 200 mg kg⁻¹ de N, P e K, respectivamente, nas formas de uréia, superfosfato simples e cloreto de potássio. As sementes dos cultivares de arroz, milho e feijão foram plantadas diretamente nos vasos. Oito a dez dias depois da germinação, foi efetuado o desbaste, deixando-se em cada vaso dez plantas para os cultivares de arroz e cinco plantas para os de milho e feijão.

Aos 60 dias, colheu-se a parte aérea das plantas cortando-se o caule ou colmo rente ao solo. As raízes foram separadas da terra por meio de jato d'água e seu comprimento, mínimo e máximo, medido tomando-se a distância entre o coleto da planta e a extremidade das raízes mais curtas e mais longas, respectivamente. Parte aérea e raízes foram secas em estufa a 70°C até massa constante, pesadas, moídas e submetidas à determinação do teor de alumínio de acordo com método citado por Malavolta et al. (1989). Calculou-se a quantidade de alumínio acumulada nas raízes e parte aérea das plantas. Os efeitos dos tratamentos na produção de matéria seca, assim como na concentração e no acúmulo de alumínio nas raízes e parte aérea das plantas, foram avaliados por meio de análises de variância, sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% (Gomes, 1970).

Em uma terceira etapa, amostras dos horizontes A e B do Podzólico Vermelho-Amarelo foram incubadas por 14 dias com as mesmas quantidades de CaCO₃ utilizadas no primeiro experimento. Em seguida, fez-se a extração da solução do solo pelo método da pasta de saturação descrito por Rhoades

Quadro 1. Propriedades químicas do Podzólico Vermelho-Amarelo

Horizonte ⁽¹⁾	pH		C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al ³⁺	H ⁺	T	V	m	P
	H ₂ O	KCl												
	g kg ⁻¹			cmol _c dm ⁻³			%		mg kg ⁻¹					
A	5,1	4,3	17,8	11,7	3,3	0,29	0,07	15,4	0,8	5,9	22,1	70	5	10
B	4,8	3,7	5,7	6,9	2,9	0,13	0,11	10,0	14,5	1,8	26,3	38	59	1

⁽¹⁾A: profundidade de 0-23 cm; B: profundidade de 23-52 cm.

(1982), o qual se baseia em adicionar paulatinamente água a 100 g da amostra e homogeneizar com espátula até se obter pasta saturada; após pernoite, a solução do solo é extraída por centrifugação. O teor de alumínio na solução foi determinado por espectrofotometria de absorção atômica, conforme EMBRAPA (1979).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No primeiro estudo, procurou-se verificar se o método de determinação por titulação com NaOH 0,02 N, por não ser específico ao alumínio, estaria superestimando o teor de Al trocável encontrado no Podzólico Vermelho-Amarelo. Verificou-se que os teores de Al trocável diminuíram com o aumento do pH, tendo havido grande semelhança entre aqueles obtidos por titulação com NaOH 0,02 mol L⁻¹ e os determinados por espectrofotometria de absorção atômica ao longo de toda a faixa de variação de pH (Quadro 2). O aumento do pH com as doses de corretivo foi mais acentuado no horizonte A que no B, indicando a existência de forte tamponamento na camada mais inferior. A análise do solo (Quadro 1) mostra que o elevado tamponamento no horizonte B deveu-se mais ao alumínio trocável que ao hidrogênio.

Quadro 2. Valores de pH em água e em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ e teores de alumínio trocável extraído com KCl 1 mol L⁻¹ e determinado por titulação com NaOH 0,02 mol L⁻¹ ou por espectrofotometria de absorção atômica (EAA), de amostras de dois horizontes de um Podzólico Vermelho-Amarelo do estado do Acre, incubadas com diferentes doses de CaCO₃ por 14 dias

Dose de CaCO ₃ g kg ⁻¹	pH		Alumínio trocável ⁽¹⁾	
	H ₂ O	CaCl ₂	Por titulação	Por EAA
— cmol _c dm ⁻³ —				
Horizonte A				
0	5,5	4,4	0,2A	0,23A
1	5,9	5,0	0,0A	0,05A
2	6,3	5,7	0,0A	0,03A
4	7,4	6,8	0,0A	0,04A
6	7,8	7,4	0,0A	0,06A
Horizonte B				
0	5,3	3,7	14,7A	13,97A
2	5,4	4,0	12,5B	14,25A
4	5,4	4,2	8,4A	7,47A
6	5,5	4,5	7,9B	8,03A
8	5,6	5,3	2,2A	3,08A

⁽¹⁾ Letras comparam métodos de determinação do alumínio dentro de cada dose de carbonato de cálcio, pelo teste de Tukey a 5%.

No estudo em casa de vegetação, observou-se que a produção de matéria seca de raízes diferiu entre um horizonte e outro somente em dois casos. Na cultura do milho sem carbonatos, a quantidade de raízes foi maior no horizonte A que no B (Quadro 3); contudo, as plantas de arroz cv. IAC 1131 sem carbonatos apresentaram mais raízes no horizonte B, com alto teor de Al trocável, do que no horizonte A. O efeito dos carbonatos foi significativo somente para o milho no horizonte B, cuja massa de raízes aumentou com a adição de corretivos.

Na parte aérea, a produção de matéria seca foi maior nas plantas cultivadas no horizonte A que no B para todas as culturas, exceto arroz cv. Fernandes, sem ou com carbonatos; arroz cv. IAC 1131, sem carbonatos, e milho, com carbonatos (Quadro 3). O efeito dos carbonatos foi significativo somente para o milho e para o arroz cv. IAC 1131, cultivados no horizonte B. Neste último caso, percebeu-se maior produção de matéria seca quando não se aplicou o carbonato.

Os teores de Al nas raízes das plantas tenderam a ser maiores naquelas cultivadas nas amostras do horizonte B que nas do A (Figura 1); contudo, à exceção do feijão em amostras sem carbonatos, as diferenças encontradas não refletem a elevada relação de 1:18 existente entre os teores de Al trocável dos horizontes A (0,8 cmol_c dm⁻³) e B (14,5 cmol_c dm⁻³). A correção do pH das amostras de solo com carbonatos não alterou significativamente o teor de alumínio nas raízes das plantas, exceto nas de feijão cultivadas nas amostras do horizonte B.

No caso dos teores de alumínio na parte aérea, em que a interação horizontes x carbonatos não foi significativa, o teor de Al foi maior nas plantas de arroz cv. Fernandes e de feijão cultivadas no horizonte B que nas plantadas no A, não havendo diferença para as demais culturas (Figura 2a); o efeito de carbonatos não foi significativo (Figura 2b).

As quantidades de Al acumuladas nas raízes das plantas de arroz cv. IAC 1131, sem aplicação de carbonatos, e de milho, com aplicação de carbonatos, foram maiores quando cultivadas no horizonte B, mais rico em alumínio, do que no A (Figura 3); quando o corretivo não foi aplicado, contudo, as plantas de milho apresentaram acúmulo de Al nas raízes inexplicavelmente maior no horizonte A que no B. Na parte aérea, o único efeito significativo ocorreu para o feijão sem aplicação de carbonatos: a quantidade acumulada também foi inexplicavelmente maior no horizonte A do que no B.

O efeito da aplicação dos carbonatos sobre a quantidade de Al acumulada nas plantas foi significativo apenas nas raízes do milho cultivado no horizonte B e na parte aérea do feijão cultivado no mesmo horizonte, sendo as quantidades encontradas com a aplicação do corretivo, mais uma vez, incoerentemente maiores do que as obtidas sem a aplicação (Figura 3).

Quadro 3. Matéria seca produzida por plantas cultivadas em amostras dos horizontes A (com 0,8 cmol_c dm⁻³ de Al trocável) e B (com 14,5 cmol_c dm⁻³ de Al trocável) de um Podzólico Vermelho-Amarelo do estado do Acre, tratadas ou não com carbonatos de cálcio e de magnésio

Cultura ⁽¹⁾	Horizonte	Raiz		Parte aérea	
		Sem carbonato	Com carbonato	Sem carbonato	Com carbonato
g/vaso					
Arroz 1	A	5,18Aa ⁽²⁾	6,34Aa	10,85Aa	14,75Aa
	B	5,94Aa	5,55Aa	12,18Aa	12,08Aa
Arroz 2	A	4,14Ab	6,02Aa	11,98Aa	15,08Aa
	B	7,43Aa	6,02Aa	14,77Aa	9,76Bb
Feijão	A	2,87Aa	3,08Aa	24,9Aa	20,50Aa
	B	0,32Aa	1,39Aa	2,62Ab	6,55Ab
Milho	A	15,82Aa	16,43Aa	42,34Aa	49,92Aa
	B	12,30Bb	17,36Aa	33,15Bb	41,21Aa

⁽¹⁾ Arroz 1 = cultivar Fernandes; Arroz 2 = cultivar IAC 1131. ⁽²⁾ Letras maiúsculas comparam doses de carbonatos e minúsculas comparam horizontes, para a mesma cultura e parte da planta, pelo teste de Tukey a 5%. C.V. para raízes, 12%; C.V. para parte aérea, 15%.

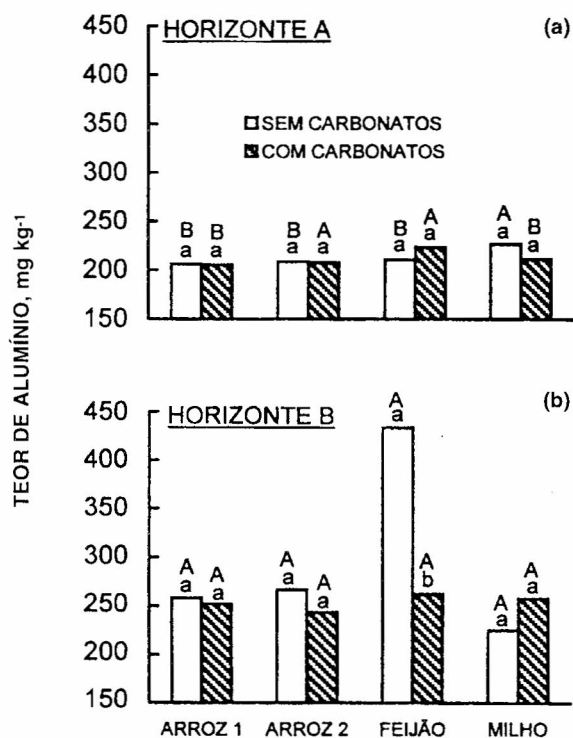


Figura 1. Teores de alumínio em raízes de plantas cultivadas em amostras dos horizontes A (com 0,8 cmol_c dm⁻³ de Al trocável) e B (com 14,5 cmol_c dm⁻³ de Al trocável) de um Podzólico Vermelho-Amarelo do estado do Acre, tratadas ou não com carbonatos de cálcio e de magnésio (Arroz 1, cultivar Fernandes; Arroz 2, cultivar IAC 1131). Letras maiúsculas e minúsculas acima das barras comparam horizontes e doses de carbonatos, respectivamente, pelo teste de Tukey a 5%.

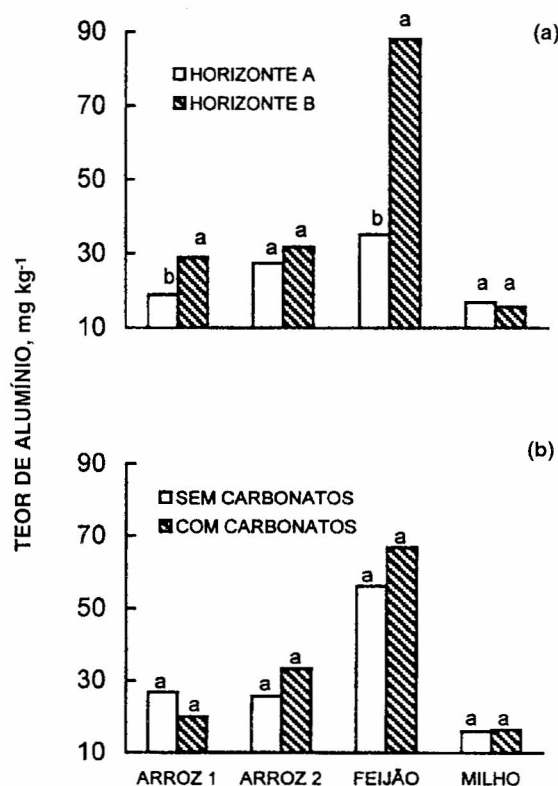


Figura 2. Teores de alumínio na parte aérea de plantas cultivadas em amostras de um Podzólico Vermelho-Amarelo do estado do Acre, influenciados (a) pelo horizonte amostrado e (b) pela aplicação de carbonatos (Arroz 1, cultivar Fernandes; Arroz 2, cultivar IAC 1131). Letras acima das barras comparam horizontes e doses de carbonatos, respectivamente, pelo teste de Tukey a 5%.

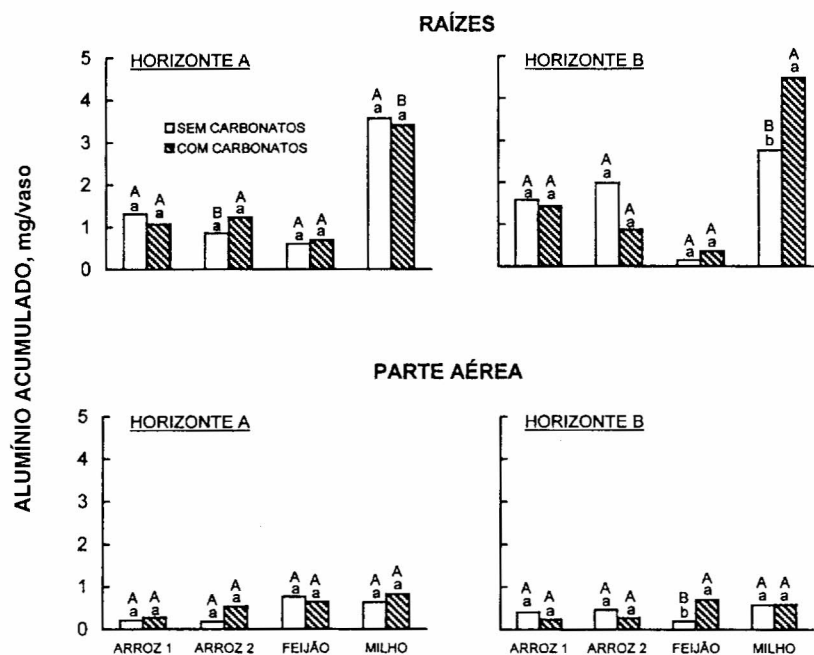


Figura 3. Quantidades de alumínio acumuladas em plantas cultivadas em amostras dos horizontes A (com $0,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al trocável) e B (com $14,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al trocável) de um Podzólico Vermelho-Amarelo do estado do Acre, tratadas ou não com carbonatos de cálcio e de magnésio (Arroz 1, cultivar Fernandes; Arroz 2, cultivar IAC 1131). Letras maiúsculas e minúsculas acima das barras comparam horizontes e doses de carbonatos, respectivamente, pelo teste de Tukey a 5%.

A inconsistência dos resultados descritos até aqui a respeito dos efeitos do alumínio do Podzólico Vermelho-Amarelo sobre o crescimento dos vegetais é reforçada pelo fato de as plantas terem apresentado crescimento vegetativo normal e nenhum sintoma de toxidez ao alumínio, mesmo quando cultivadas nas amostras do horizonte B sem adição de corretivos. Medições do comprimento de raízes das plantas cultivadas nessas amostras, por exemplo, mostraram que o sistema radicular apresentou crescimento normal, e que o abaixamento dos teores de Al trocável com carbonatos não estimulou esse crescimento (Quadro 4). Essas observações não condizem com a maioria dos resultados encontrados na literatura (Foy et al., 1965; Foy, 1974; Fageria & Zimmermann, 1979; Pavan, 1982) e com a elevada toxidez atribuída a esse íon por vários autores (Clarkson, 1965; Foy et al., 1978; Furlani, 1989). Embora o limite de toxidez possa variar com a espécie e cultivar, bem como com as propriedades do solo, Malavolta (1980) considera prejudicial para as plantas teores de alumínio trocável acima de $0,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

Smyth & Cravo (1992) avaliaram a eficiência da utilização de calcário e gesso nas culturas de milho, soja, amendoim e caupi, para corrigir os problemas de deficiência de cálcio e de excesso de alumínio em Oxissolo da Amazônia, visando à produção contínua de alimentos. Observaram que, para milho e soja, a saturação por alumínio do solo não deve ser superior a 27%, enquanto, para o amendoim, o nível crítico

Quadro 4. Comprimento mínimo e máximo de raízes de plantas cultivadas em amostras do horizonte B (com $14,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al trocável) de um Podzólico Vermelho-Amarelo do estado do Acre, tratadas ou não com carbonatos de cálcio e de magnésio

Carbonato	Cultura ⁽¹⁾			
	Arroz 1	Arroz 2	Feijão	Milho
	cm			
Sem	27 - 32	26 - 27	18 - 19	55 - 61
Com	21 - 30	26 - 32	19 - 22	53 - 65

⁽¹⁾ Arroz 1 = cultivar Fernandes; Arroz 2 = cultivar IAC 1131.

seria de 54%. Houve estreita correlação entre a produtividade das culturas e a relação Ca/Al trocáveis do solo, tendo sido encontrado um valor crítico de 0,42 para obtenção de máxima produtividade. Isso indica que a produtividade pode não ser afetada pelo alumínio trocável desde que exista quantidade suficiente de cálcio para manter a relação Ca/Al elevada. No solo estudado, a relação Ca/Al trocáveis é da ordem de 14,6 para o horizonte A, com baixa saturação por alumínio, e de 0,48 para o horizonte B, com saturação por alumínio de 59%, prejudicial à

maioria das culturas. Esses fatos podem explicar a ausência de toxidez ao alumínio observada neste experimento. Outra possibilidade é a de ter havido atenuação da toxidez ao alumínio pela presença de íons cálcio na solução, efeito já demonstrado anteriormente por Helyar (1978), Kamprath (1978) e Pavan & Bingham (1982).

Na terceira etapa do trabalho, análises do extrato da pasta de saturação do solo revelaram que as concentrações de Al na solução chegaram a $2,1 \text{ mmol L}^{-1}$ nas amostras não tratadas com carbonatos. Tomando por base resultados publicados na literatura, verifica-se que essas concentrações seriam suficientemente altas para causar toxidez de Al nas plantas. Pavan & Bingham (1982), por exemplo, observaram que os sintomas de injúria em raízes de plântulas de café cultivadas em solução nutritiva com $0,148 \text{ mmol L}^{-1}$ de Al variaram de *médios a muito severos*, enquanto nas folhas, de *nenhum a severos*, dependendo da força iônica da solução. Pavan et al. (1982) verificaram, para dois Ultissolos e quatro Oxissolos do estado do Paraná, que a menor concentração de Al na solução, a partir da qual ocorre redução estatisticamente significativa no crescimento de raízes do cafeeiro, variou de $0,007$ a $0,0127 \text{ mmol L}^{-1}$.

Estudo realizado posteriormente com amostras do mesmo solo (Carmello et al., 1997), utilizando a técnica de especiação química de íons em solução com o auxílio do programa de computador GEOCHEM (Sposito & Mattigod, 1980), mostrou que no horizonte A a maior parte do alumínio em solução estava complexada com os ânions SO_4^{2-} (49%), PO_4^{3-} (38%) e OH^- (6%), e, no horizonte B, com SO_4^{2-} (5%), PO_4^{3-} (17%) e OH^- (59%). Assim, a proporção de Al livre em solução era de apenas 7% no horizonte A e 20% no horizonte B, o que explica a baixa toxidez desse elemento para as plantas no solo estudado.

CONCLUSÕES

1. Os teores de Al trocável obtidos por titulação do extrato com $\text{NaOH } 0,02 \text{ mol L}^{-1}$ mostraram-se coerentes com os determinados por espectrofotometria de absorção atômica.

2. A influência da calagem sobre a produção de matéria seca e a absorção de Al pelas plantas foi pequena, não havendo relação clara entre o desenvolvimento destas ou ocorrência de sintomas de toxidez e a presença de Al trocável nesse solo.

3. As amostras não tratadas com corretivos apresentaram teores elevados de Al na solução; contudo, não foram observados sintomas de toxidez nos vegetais.

4. No Podzólico Vermelho-Amarelo estudado, o teor de alumínio trocável e a concentração de Al na solução não constituíram índices adequados para estimar a toxidez desse elemento nas plantas.

LITERATURA CITADA

- CARMELO, Q.A.C.; MÖLLER, M.R.F.; BERTON, R.S.; GAMA, J.R.N.F. & KIEHL, J.C. Especiação iônica da solução do solo para avaliar o alumínio trocável. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. Anais. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. (CD-ROM)
- CLARKSON, D.T. The effect of aluminum and other trivalent metal cations on cell division in root apices of *Allium cepa*. Ann. Bot. N. Ser., 29:309-314, 1965.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Rio de Janeiro, Manual de Métodos de Análise de Solos, 1979. 255p.
- FAGERIA, N.K. & KLUTHCOUSKI, J. Metodologia para avaliação das culturas de arroz e feijão, para condições adversas de solo. Goiânia, EMBRAPA/CNPAF, 1980. 22p. (Circular Técnica, 8)
- FAGERIA, N.K. & ZIMMERMANN, F.J.P. Seleção de cultivares de arroz para tolerância de alumínio em solução nutritiva. Pesq. Agropec. Bras., 14:141-147, 1979.
- FOY, C.D. Effect of aluminum on the uptake and metabolism of phosphorus by barley seedling. Plant Physiol., 41:165-172, 1966.
- FOY, C.D. Effects of aluminum on plant growth. In: CARSON, E.W., ed. The plant root and its environment. Charlottesville, University Press of Virginia, 1974. p.601-642.
- FOY, C.D. Soil chemical factors limiting plant root growth. In: HATFIELD, J.L. & STEWART, B.A., eds. Limitations to plant root growth. New York, Springer-Verlag, 1992. p.97-149.
- FOY, C.D.; ARMIGER, W.H.; BRIGGLE, L.W. & REID, D.A. Differential aluminum tolerance of two wheat varieties associated with plant-induced pH changes around their roots. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 29:64-67, 1965.
- FOY, C.D.; CHANEY, R.L. & WHITE, M.C. The physiology of metal toxicity in plants. Ann. Rev. Plant Physiol., 29:511-566, 1978.
- FOY, C.D.; GERLOFF, G.C. & GABELMEN, W.H. Diferencial effects of aluminum on the vegetative growth of tomato cultivars in acid soils and nutrient solution. J. Am. Soc. Hort. Sci., 98:427-432, 1973.
- FURLANI, P.R. Efeitos fisiológicos do alumínio em plantas. In: SIMPÓSIO AVANÇADO EM SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 2., Piracicaba, 1989. Anais. Campinas, Fundação Cargill, 1989. p.73-90.
- GAMA, J.R.N.F. Caracterização e formação de solos com argila de atividade alta no estado do Acre. Itaguaí, UFRJ, 1986. 150p. (Tese de Mestrado)
- GOMES, F.P. Curso de estatística experimental. São Paulo, Nobel, 1970. 430p.
- HELAR, K.R. Effects of aluminum and manganese toxicity on legume growth. In: ANDREW, C.S. & KAMPRATH, E.J., eds. Mineral nutrition of legumes in tropical and subtropical soils. Melbourne, CSIRO, 1978. p. 207-231.

- KAMPRATH, E.J. Lime in relation to aluminum toxicity in tropical soils. In: ANDREW, C.S. & KAMPRATH, E.J., eds. Mineral nutrition of legumes in tropical and subtropical soils. Melbourne, CSIRO, 1978. p. 233-245.
- MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. São Paulo, Agronômica Ceres, 1980. 251p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. & OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas. Piracicaba, Potafos, 1989. - 201p.
- MENGEL, K. & KIRKBY, E.A. Principles of plant nutrition. Bern, International Potash Institute, 1987. 687p.
- MESQUITA FILHO, M.V. & SOUZA, A.F. Resposta do tomateiro à aplicação da calagem e da adubação fosfatada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 26., Salvador, 1986. Resumos; Hort. Bras., 4:61-66, 1986.
- PAVAN, M.A. Efeitos tóxicos de alumínio em mudas de café em relação à nutrição de cálcio. R. Bras. Ci. Solo, 6:209-213, 1982.
- PAVAN, M.A. & BINGHAM, F.T. Toxidez de alumínio em café cultivados em solução nutritiva. Pesq. Agropec. Bras., 17:1293-1302, 1982.
- PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. & PRATT, P.F. Toxicity of aluminum to coffee in Ultisols and Oxisols amended with CaCO_3 , MgCO_3 , and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Soil Sci. Soc. Am. J., 46:1201-1207, 1982.
- RHOADES, J.R. Soluble salts. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. Methods of soil analysis. Madison, ASA, 1982. p.167-179 (Agronomy 9)
- ROY, K.A.; SHARMA, A. & TALUKDER, G. Some aspects of aluminum toxicity in plants. The Bot. Rev., 54:145-178, 1988.
- SMYTH, T.J. & CRAVO, M.S. Aluminum and calcium constraints to continuous crop production in a Brazilian Amazon Oxisol. Agron. J., 84:843-850, 1992.
- SPOSITO, G. & MATTIGOD, S.V. Geochem: a computer program for the calculation of chemical equilibria in soil solution and other natural water systems. Riverside, Kearney Foundation of Soil Science, University of California, 1980. 110p.