

VERA MARIA CARVALHO ALVES



2873 - 1

EFEITO DO ALUMÍNIO SOBRE A CINÉTICA DE ABSORÇÃO E TRANSLOCAÇÃO
DE FOSFATO E SOBRE O CRESCIMENTO E COMPOSIÇÃO
MINERAL DE DOIS CULTIVARES DE TRIGO

T
09/84

Tese Apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como Parte das
Exigências do Curso de Solos e Nu
trição de Plantas, para Obtenção
do Título de "Magister Scientiae".

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
DEZEMBRO - 1984

VERA MARIA CARVALHO ALVES

EFEITO DO ALUMÍNIO SOBRE A CINÉTICA DE ABSORÇÃO E TRANSLOCAÇÃO
DE FOSFATO E SOBRE O CRESCIMENTO E COMPOSIÇÃO
MINERAL DE DOIS CULTIVARES DE TRIGO

Tese Apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como Parte das
Exigências do Curso de Solos e Nu
trição de Plantas, para Obtenção
do Título de "Magister Scientiae".

APROVADA: 04 de julho de 1984

ABRena

Prof. Alemar Braga Rena
(Conselheiro)

Nairam Félix de Barros

Prof. Nairam Félix de Barros
(Conselheiro)

Julio César Lima Neves

Julio César Lima Neves
(Eng. Agr. M.S.)

Paulo César Rezende Fontes

Paulo César Rezende Fontes
(Eng. Agr. Ph.D.)

Roberto Ferreira de Novais

Prof. Roberto Ferreira de Novais
(Orientador)

À memória de meu tio Hélio.

Aos meus pais e irmãos.

Ao meu esposo.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária e à Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, pela oportunidade de realizar este curso.

Ao Professor Roberto Ferreira de Novais, pela eficiente orientação, estímulo e confiança durante a realização deste trabalho.

Aos Professores Nairam Félix de Barros e Alemar Braga Rena, pelas críticas e sugestões.

Aos pesquisadores Júlio César Lima Neves e Paulo César Rezende Fontes, pelas oportunas sugestões e constante incentivo.

Aos Professores Márcio de Moura Estevão, Renato Sant'Anna e Victor Hugo Alvarez Venegas, pela colaboração e acompanhamento durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor José Mário Braga, pela colaboração, e à sua família, pelo apoio e amizade constantes.

Às amigas Rosângela D'Arc de Lima, Satie Kimura e Aline W. Barbosa de Carvalho, pela amizade e agradável convivência.

Aos colegas e amigos Alfredo Joaquim Castells, Hugo Ruiz e Manoel da Silva Cravo, pela amizade e apoio constantes.

Ao Dr. Elizeu Roberto Andrade Alves, pelo incentivo.

Ao Deoclécio Nazareno do Carmo e Ciriaca A. F. de Santana do Carmo, pelo estímulo e apoio.

À senhorita Lourdes Cléa Moreira, pelos serviços de datilografia.

Aos demais colegas de curso, professores, laboratoristas e funcionários do Departamento de Solos, pela ajuda e apoio prestados.

BIOGRAFIA

VERA MARIA CARVALHO ALVES, filha de Carlos Alberto Andrade Alves e Maria Conceição Alves, nasceu em Carrancas, Estado de Minas Gerais, em 4 de novembro de 1957.

Realizou seus estudos de 1º e 2º graus em Lavras, MG. Em 1976, iniciou o Curso de Engenharia Agrônômica na Escola Superior de Agricultura de Lavras, concluindo-o em 1979.

Em janeiro de 1980, contratada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, foi colocada à disposição da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais.

Em março de 1981, iniciou o Curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas na Universidade Federal de Viçosa.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE QUADROS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS	x
EXTRATO	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. MATERIAL E MÉTODOS	6
2.1. Obtenção do Material Vegetal	6
2.2. Cinética de Absorção de Fosfato	8
2.3. Translocação de Fosfato	11
2.4. Composição Mineral dos Cultivares	11
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
3.1. Cinética de Absorção de Fosfato	13
3.2. Translocação de Fosfato	15
3.3. Composição Mineral dos Cultivares	17
4. RESUMO E CONCLUSÕES	26
BIBLIOGRAFIA	28
APÊNDICE(S)	36

LISTA DE QUADROS

QUADRO	Página
1 Fonte e Concentração dos Nutrientes Usados nas Soluções Nutritivas de Crescimento e de Absorção	7
2 Valores de V_{max} e K_m da Cinética de Absorção de Fosfato de Dois Cultivares de Trigo, um Sensível ('Anahuac') e Outro Resistente ('BH-1146') ao Alumínio. Média de Três Repetições	14
3 Influxo Estimado de Fosfato em Diferentes Concentrações Externas Deste Elemento, para Dois Cultivares de Trigo ('Anahuac' e 'BH-1146') e Dois Níveis de Alumínio (0 e 0,5 ppm). Média de Três Repetições	15
4 Efeito do Alumínio sobre a Concentração de Fósforo no Exsudato do Xilema de Dois Cultivares de Trigo, um Sensível ('Anahuac') e outro Resistente ('BH-1146') ao Alumínio. Média de Três Repetições	16
5 Peso da Matéria Fresca do Sistema Radicular dos Cultivares 'Anahuac' e 'BH-1146', no Experimento de Translocação de Fosfato. Média de Três Repetições	17

6	Efeito do Alumínio na Produção de Matéria Seca da Parte Aérea e Sistema Radicular dos Cultivares 'Anahuac' (Sensível) e 'BH-1146' (Resistente). Média de Duas Repetições	18
7	Teores de N, P, K, Ca, Mg, Zn, Fe, Mn e Cu na Parte Aérea dos Cultivares 'Anahuac' e 'BH-1146' na Presença e Ausência de Alumínio. Média de Duas Repetições	19
8	Teores de N, P, K, Ca, Mg, Zn, Fe, Mn e Cu no Sistema Radicular dos Cultivares 'Anahuac' e 'BH-1146' na Presença e Ausência de Alumínio. Média de Duas Repetições	20
1A	Valores de K_m e V_{max} , Calculados por Diferentes Transformações para o Cultivar 'BH-1146', Pré-Tratado com 0,5 ppm de Alumínio	39
2A	Equações de Regressão Linear e Potencial Ajustadas aos Dados de Absorção, segundo a Transformação Gráfico-Matemática. Média de Três Repetições	40
1B	Resumo da Análise de Variância dos Dados do Efeito do Alumínio na Produção de Matéria Seca da Parte Aérea e Sistema Radicular dos Cultivares 'Anahuac' e 'BH-1146'	41
2B	Resumo da Análise de Variância dos Dados do Efeito do Alumínio na Concentração de N, P, K, Ca e Mg da Parte Aérea dos Cultivares 'Anahuac' e 'BH-1146'	42
3B	Resumo da Análise de Variância dos Dados do Efeito do Alumínio na Concentração de Fe, Mn, Zn e Cu da Parte Aérea dos Cultivares 'Anahuac' e 'BH-1146'	43
4B	Resumo da Análise de Variância dos Dados do Efeito do Alumínio na Concentração de N, P, K, Ca e Mg do Sistema Radicular dos Cultivares 'Anahuac' e 'BH-1146'	44

5B	Resumo da Análise de Variância dos Dados do Efeito do Alu- mínio na Concentração de Fe, Mn, Zn e Cu do Sistema Radi- cular dos Cultivares 'Anahuac' e 'BH-1146'	45
----	---	----

LISTA DE ABREVIATURAS

Bq = Becquerel

K_m = Constante de Michaelis-Menten

k = Constante de Velocidade

μM = Micromolar

mM = Milimolar

V_{max} = Velocidade Máxima de Absorção

EXTRATO

ALVES, Vera Maria Carvalho, M.S., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 1984. Efeito do Alumínio sobre a Cinética de Absorção e Translocação de Fósforo e sobre o Crescimento e Composição Mineral de Dois Cultivares de Trigo. Professor Orientador: Roberto Ferreira de No_vais. Professores Conselheiros: Alemar Braga Rena e Nairam Félix de Barros.

Com o objetivo de caracterizar o efeito do alumínio sobre a cinética de absorção e translocação de fósforo e sobre a composição mineral de dois cultivares de trigo (Triticum vulgare L.), um sensível ('Anahuac') e outro resistente ('BH-1146') ao alumínio, conduziram-se três ensaios em solução nutritiva (pH 4,5), em condições de casa de vegetação e câ_mara de crescimento. Foram utilizados os níveis de 0 e 0,5 ppm de alu_mínio. O tratamento com alumínio consistiu na sua aplicação durante todo o período de crescimento das plantas, sendo retirado apenas durante os ensaios de cinética de absorção e de translocação de fósforo.

O alumínio reduziu o $V_{\max}$ dos dois cultivares, sendo esta redução maior para o 'BH-1146' que para o 'Anahuac'. Também reduziu ligeiramente o K_m do 'BH-1146', embora tenha aumentado o do 'Anahuac'.

A translocação de fósforo nos cultivares foi influenciada diferencialmente pelo alumínio, havendo redução na do 'Anahuac' e aumento na do 'BH-1146'.

Assim, os parâmetros cinéticos e a translocação de fosfato parecem estar associados com a resistência diferencial dos dois cultivares ao alumínio.

Observou-se diferença entre os cultivares quanto aos teores de Ca, Zn e Mn, na parte aérea, e de P, Mg e Fe, no sistema radicular, quando as plantas foram crescidas na presença de alumínio. De maneira geral, o 'BH-1146' apresentou maiores concentrações de cátions que o 'Anahuac', independentemente da presença ou não do alumínio na solução.

Conclui-se que um dos componentes da resistência diferencial ao alumínio entre os dois cultivares está relacionado com a absorção e translocação não apenas de fósforo, mas também de outros elementos minerais.

1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de toxidez de alumínio em plantas cultivadas é frequente em muitos solos brasileiros e, na maioria das vezes, está associada a solos lixiviados, pobres e de elevada acidez (OLMOS e CAMARGO, 1976). A calagem é a técnica normalmente adotada para contornar tal problema, mas a sua incorporação a horizontes subsuperficiais é bastante difícil. A restrição do sistema radicular ao horizonte superior do solo reduz a absorção de água e de nutrientes pelas plantas, com conseqüente decréscimo da produção e aumento da possibilidade de danos decorrentes de 'veranicos'. Por isso, os melhoristas de plantas têm procurado selecionar e desenvolver cultivares resistentes à toxidez desse elemento.

Considerando que o alumínio da solução do solo entra em contato direto com as proteínas estruturais e catalíticas das membranas celulares (WOOLHOUSE, 1969) e que se une fortemente às cargas negativas da superfície radicular (RORISON, 1965; KLIMASHEVSKY e DEDOV, 1975), é provável que a toxidez de alumínio decorra, fundamentalmente, dos seus efeitos sobre a absorção mineral.

Em diversos trabalhos, a resistência diferencial ao alumínio tem sido atribuída à maior ou menor capacidade da planta para absorver e/ou utilizar elementos minerais na presença desse elemento. Assim, a

resistência de cultivares de soja (ARMIGER et alii, 1968), feijão (FOY et alii, 1972), trigo e cevada (FOY et alii, 1967, 1969; LONG e FOY, 1970) ao alumínio está relacionada com a maior capacidade dessas plantas para absorver e transportar o cálcio na presença do alumínio. Já a maior sensibilidade do sorgo, quando comparada com a do milho, foi associada a uma maior redução na absorção de potássio (Chamura e Hoshi, 1960, citados por FOY, 1974). A maior resistência de certas variedades de batata ao alumínio foi associada com a capacidade diferencial das raízes para absorver magnésio e potássio (LEE, 1971).

Entretanto, os efeitos mais evidentes do alumínio têm sido verificados sobre a disponibilidade, absorção e utilização de fósforo, efeitos estes que têm sido motivo de controvérsias entre diversos autores.

Um dos efeitos primários do alumínio sobre a absorção de fósforo pelas plantas é a redução da disponibilidade deste elemento, que pode se dar na solução externa às raízes, por reações de precipitação e/ou adsorção (HSU e RENNIE, 1962; MAC LEOD e JACKSON, 1967; WHITE et alii, 1976). Entretanto, essa reação de adsorção/precipitação pode também ocorrer nas raízes, mais precisamente no espaço livre aparente, sendo, portanto, independente de processos metabólicos (RORISON, 1965; CLARKSON, 1966, 1967). Esta hipótese foi confirmada por RASMUSSEN (1968), ao observar que o alumínio absorvido de soluções ácidas precipitava-se na parede das células da epiderme de raízes de milho, sem penetrar no córtex. Ele também observou que a distribuição do fósforo era exatamente a mesma do alumínio, sugerindo sua precipitação por este elemento. Contudo, há evidências de que as paredes das células corticais também atuam como sítios de fixação de alumínio e fosfato (KLIMASHEVSKY et alii, 1972; MC CORNICK e BORDEN, 1974; KESAR et alii, 1975; MATSUMOTO et alii, 1976).

Trabalhos realizados por JONES (1961) e BARTLETT e RIEGO (1972) sugerem que, em espécies resistentes, ácidos orgânicos podem formar quelatos com o alumínio, prevenindo, assim, a precipitação do fósforo por esse elemento.

De acordo com WRIGHT (1937, 1943) e WRIGHT e DONAHUE (1953), o pH fisiológico do protoplasma pode favorecer a precipitação interna do

fosfato pelo alumínio, induzindo deficiência de fósforo.

Entretanto, apenas a precipitação do fósforo pelo alumínio, tanto externa como internamente, não pode explicar os distúrbios na utilização do fosfato verificados na presença de alumínio (WALLIHAN, 1948). FOY e BROWN (1963, 1964) atribuíram ao alumínio a redução da permeabilidade do plasmalema, o que reduziria a absorção de fosfato.

A resistência diferencial de algumas espécies e variedades ao alumínio tem sido correlacionada com sua capacidade diferencial para absorver e utilizar fósforo na presença de alumínio (FOY, 1974). Nesta linha de pesquisas, HACKETT (1967) observou que a Deschampsia flexuosa, resistente ao alumínio, foi mais tolerante a baixos níveis de fósforo que o Lolium perene, que é mais sensível a fatores de solos ácidos, sobretudo ao alumínio. CLARKSON (1967) também demonstrou que a alta resistência do Agrotis setacea ao alumínio, comparada com a da A. canina e A. stolonífera, esteve associada com sua maior tolerância a baixos níveis de fósforo no meio de cultura. Resultados semelhantes foram obtidos para outras espécies por OTSUKA (1968 a, 1968 b), MEDAPA e DANA (1970) e MACLEAN e CHIASSON (1966).

Ikedo (1965), citado por FOY (1974), encontrou menor concentração de fósforo na parte aérea da variedade de trigo Monon, sensível ao alumínio, do que na parte aérea da variedade Atlas 66, resistente, quando cultivadas em solo com alto teor de alumínio trocável. Entretanto, isso não ocorreu quando as plantas foram cultivadas em solução nutritiva. Do mesmo modo, tanto o sistema radicular como a parte aérea da variedade de cevada Kearney, sensível ao alumínio, apresentaram concentrações de fósforo tão altas quanto a variedade Dayton, resistente, quando cultivadas em solução nutritiva na presença de alumínio (FOY et alii, 1967).

Alguns autores verificaram que, em algumas variedades e espécies de plantas, o alumínio, em baixas concentrações, estimula (RAGLAND e COLEMAN, 1962) ou inibe (LANCE e PEARSON, 1969) a absorção de fósforo, dependendo do tempo de exposição ao alumínio e da concentração de fosfato na solução. Estudando o efeito do alumínio sobre a absorção de fosfato,

ANDREW e VAN DEN BERG (1973) verificaram, em leguminosas, que as espécies mais resistentes ao alumínio apresentavam maior absorção de fósforo na presença de baixas concentrações desse elemento no meio de cultivo. O estímulo à absorção de fosfato provocado pelo alumínio pode ser da mesma natureza do efeito Viets (VIETS, 1944; RAGLAND e COLEMAN, 1962; RANDAL e VOSE, 1963) ou ocasionado pela neutralização de cargas negativas da parede celular, o que facilitaria a absorção de ânions (FRANKLIN, 1969, 1970, 1971; MULLETTE e HANNON, 1974).

Evidências de que pelo menos parte do estímulo à absorção de fosfato causada pelo alumínio é de natureza metabólica foram observadas por RANDAL e VOSE (1963), ao verificarem que o KCN causava acentuada inibição na absorção de fósforo estimulada por aquele elemento.

Indícios de que o alumínio também influencia, e de modo negativo, a translocação de fosfato para a parte aérea das plantas foram encontrados por diversos autores (FOY e BROWN, 1963; RANDALL e VOSE, 1963; McLEAN e CHIASSON, 1966; CLARKSON, 1966; LEE, 1971; ANDREW et alii, 1973; ANDREW e VAN DEN BERG, 1973). Entretanto, esse efeito não pode ser explicado apenas pela maior fixação do fosfato nas raízes; é possível que ocorram alterações no movimento radial de fosfato (CLARKSON, 1966).

Para estudar a absorção diferencial de fosfato entre espécies e variedades, comparações dos parâmetros cinéticos, K_m , V_{max} e C_{min} , têm sido normalmente empregadas (MACHADO, 1981). Trabalhos realizados por NOGGLE e FRIED (1960) mostraram que diferenças na absorção de fosfato entre alfafa, cevada e painço foram decorrentes, principalmente, das variações nos valores de V_{max} . De acordo com ANDREW (1966), a maior taxa de absorção de fosfato em Stylosanthes humilis, em relação a outras leguminosas forrageiras, deve-se ao maior giro do carregador, o que tende a aumentar V_{max} . Entretanto, em variedades de milho híbrido, com diferentes capacidades de acumulação de fosfato, verificou-se que as variedades que acumulam menos tendem a ter maiores valores de K_m e V_{max} (PHILLIPS et alii, 1971). MACHADO (1981), estudando a cinética de absorção e os mecanismos da ação do alumínio sobre a absorção de fosfato em Stylosanthes sp, observou que, na ausência do alumínio, o S. macrocephala, considerado

resistente ao alumínio, apresentou maiores taxas de absorção de fosfato em todas as concentrações usadas, um menor K_m e maior V_{max} na faixa de baixas concentrações de fósforo (até $30 \mu M$). Já o S. guianensis, sensível ao alumínio, apresentou menores taxas de absorção e maior valor de K_m e menor de V_{max} , possivelmente relacionados com a menor transferência do fosfato através do plasmalema. Nesse trabalho, também foi comprovado que um dos efeitos principais do alumínio sobre a absorção de fosfato, nas espécies testadas, parecia estar relacionado com a diminuição da capacidade do carregador para associar-se ao íon.

Este trabalho teve por objetivo estudar o efeito do alumínio sobre a absorção e translocação de fosfato e sobre a composição mineral de dois cultivares de trigo, um sensível ('Anahuac') e outro resistente ('BH-1146') a esse elemento.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Obtenção do Material Vegetal

Sementes de dois cultivares de trigo (Triticum vulgare L.), um resistente ('BH-1146') e outro sensível ('Anahuac') ao alumínio, foram tratadas com hipoclorito de sódio 1,0%, por 10 min, e, em seguida, lavadas abundantemente com água destilada. Foram, então, colocadas em câmara de germinação, a 25°C, em regime de semi-obscuridade.

Ao atingirem cerca de dois centímetros de altura, as plântulas foram selecionadas quanto à uniformidade e transferidas para caixas que continham 40 litros da solução nutritiva de crescimento (Quadro 1), pH 4,5, diluída a 1/2 força da concentração original e arejada continuamente. Decorridos quatro dias, as plantas foram novamente selecionadas e transferidas para caixas com 25 litros de solução de crescimento 1 força. Para cada cultivar, foram usadas quatro caixas: duas com solução nutritiva com 0,5 ppm de alumínio, na forma de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, e as outras duas com solução nutritiva sem alumínio. Em cada caixa, foram colocadas 25 plantas. O pH foi ajustado diariamente para $4,5 \pm 0,1$ e as soluções arejadas continuamente e trocadas semanalmente. As plantas permaneceram sob essas condições, em casa de vegetação, até 25 dias após a emergência.

QUADRO 1. Fonte e Concentração dos Nutrientes Usados nas Soluções Nutritivas de Crescimento e de Absorção

Solução Nutritiva de Crescimento (1 força) ^{1/}					
Elemento	Fonte	Concentração do Elemento	Elemento	Fonte	Concentração do Elemento
		mM			mM x 10 ⁻³
N - NH ₄	NH ₄ NO ₃	0,90	B	H ₃ BO ₃	19,00
N - NO ₃	Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O, NH ₄ NO ₃ , KNO ₃	5,23	Zn	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	2,00
P	KH ₂ PO ₄	0,07	Fe	FeEDTA	38,00
K	KNO ₃ , KH ₂ PO ₄	1,80	Mn	MnCl ₂ · 4H ₂ O	7,00
Ca	Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	1,30	Cu	CuSO ₄ · 5H ₂ O	0,50
Mg	MgSO ₄ · 7H ₂ O, MgCl ₂ · 6H ₂ O	0,60	Mo	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ · 4H ₂ O	0,60
S	MgSO ₄ · 7H ₂ O	0,50			
Solução de Absorção					
Experimento de Cinética de Absorção			Experimento de Translocação		
Elemento	Fonte	Concentração do Elemento	Elemento	Fonte	Concentração do Elemento
		mM			mM
P	KH ₂ PO ₄	0,02	P	KH ₂ PO ₄	0,03
Ca	CaCl ₂ · 6H ₂ O	1,00	Ca	CaCl ₂ · 6H ₂ O	1,00

^{1/} Solução proposta por CLARK (1975), modificada para conter 1,3 mM de Ca⁺².

2.2. Cinética de Absorção de Fosfato

Quarenta horas antes do início do estudo da cinética de absorção de fosfato, seis plantas de cada cultivar, cultivadas na ausência de alumínio, foram transferidas para vasos com 1,5 litro da solução de crescimento, em número de duas por recipiente (Quadro 1). Outras seis plantas cultivadas na presença de alumínio foram colocadas em vasos idênticos com solução de crescimento, à qual se adicionou 0,5 ppm de alumínio, na forma de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$. Em todos os tratamentos, o fósforo foi excluído da solução, visando a aumentar a capacidade das raízes para absorver este elemento (JUNGK, 1975).

O pH das soluções foi mantido em $4,5 \pm 0,1$ pela adição de HCl ou NaOH 0,1 N, durante o período de 40 horas.

Assim, a cinética de absorção de fosfato foi estudada mediante a combinação de dois níveis de alumínio (plantas crescidas na presença ou ausência de alumínio) e dois cultivares (sensível e resistente ao alumínio), em delineamento de casualização completa, com três repetições.

Após as quarenta horas, as plantas foram colocadas, durante uma hora, em solução de composição idêntica à que seria utilizada no experimento de cinética de absorção, mas contendo fosfato não marcado na concentração de $20 \mu\text{M}$ de fósforo. Procurou-se, com isto, obter as condições de estado estacionário da absorção de fosfato, requeridas para a aplicação do modelo cinético (EPSTEIN e HAGEN, 1952; HAGEN e HOPKINS, 1955).

As plantas foram, então, transferidas para a solução de absorção (Quadro 1) à qual se adicionaram $18,5 \times 10^4$ Bq de ^{32}P , na forma de $\text{NaH}_2^{32}\text{PO}_4$ livre de carregador. Essa solução continha fósforo e cálcio, para que não houvesse interferência de outros elementos na cinética de absorção de fosfato. Para assegurar a perfeita homogeneização, a solução foi agitada com bastão e arejada, durante 10 minutos, antes da introdução das plantas. Cada conjunto vaso-planta foi pesado antes do início da absorção.

O experimento teve início quatro horas após o término do período escuro de 8 horas, tendo sido realizado em câmara de crescimento, à temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 1$, umidade relativa de aproximadamente 45% e intensidade luminosa de 7500 lux. O pH da solução foi ajustado, inicialmente, em $4,5 \pm 0,1$ e o arejamento mantido constante.

Procedeu-se, então, à retirada de alíquotas de 1 ml da solução de cada vaso, a intervalos de 30 minutos, até que o nível de fósforo da solução atingisse uma concentração constante. As alíquotas foram levadas a um espectrômetro beta de cintilação líquida, Beckman LS 233, para contagem de ^{32}P , mediante o efeito Cerenkov (NASCIMENTO e LOBÃO, 1977). As contagens foram efetuadas no canal de contagem do trítio, com janela totalmente aberta, ganho de 340 e erro de contagem de 2% . Cada conjunto vaso-planta foi novamente pesado para cálculo da quantidade de água perdida por transpiração. As plantas foram, então, divididas em parte aérea e sistema radicular. As raízes foram lavadas e secadas com papel absorvente e foi determinado o peso da matéria fresca do sistema radicular e da parte aérea. Com base nos dados obtidos, os parâmetros cinéticos V_{max} e K_m foram calculados a partir do decréscimo da concentração de fósforo na solução com o tempo, conforme procedimento proposto por CLAASSEN e BARBER (1974) e adaptado por RUIZ^{1/}.

De acordo com esse processo, primeiro representa-se graficamente a concentração de fósforo na solução externa (C) versus o tempo de amostragem (t). A seguir, na região de maior declividade da curva, escolhem-se, em seqüência ininterrupta, os pontos que melhor se ajustam a uma reta, determinando-se a equação linear:

$$C = a_1 + b_1 t, \quad (a)$$

em que a_1 e b_1 são os valores da interseção e declividade, respectivamente.

^{1/} Prof. Hugo Ruiz (UFES). Comunicação pessoal.

2.3. Calcula-se, então, $V_{\max}$ pela equação:

$$V_{\max} = - \frac{b_1}{P_r}, \quad (b)$$

em que P_r é o peso da matéria fresca de raízes.

Na região curva do gráfico, determina-se a equação de regressão com melhor ajuste aos pontos experimentais. No presente experimento, ajustou-se uma equação potencial:

$$C = a_2 t^{b_2}. \quad (c)$$

K_m é a concentração que corresponde à quantidade C , no ponto em que a derivada da curva, definida pela equação (c), seja igual a $1/2 b_1$. Assim:

$$\frac{1}{2} b_1 = a_2 b_2 t_m^{(b_2 - 1)}, \quad (d)$$

sendo t_m o tempo para o qual a velocidade de absorção corresponde à meta de de $V_{\max}$. Calcula-se t_m :

$$t_m = \left(\frac{b_1}{2 a_2 b_2} \right)^{1/(b_2 - 1)}. \quad (e)$$

Substituindo-se t por t_m na equação (c), determina-se a concentração do íon para a qual a velocidade de absorção corresponde à metade de $V_{\max}$ (C_m), e esta concentração corresponde a K_m .

Pela conjugação dos valores de K_m e $V_{\max}$ na fórmula de Michaelis-Menten, estimou-se o influxo de fosfato em diferentes concentrações externas deste elemento.

No presente experimento, não se corrigiu a quantidade de água perdida por transpiração para o cálculo das concentrações de fósforo nos diversos tempos de amostragem, pois esta foi considerada desprezível.

2.3. Translocação de Fosfato

Após procedimento semelhante ao adotado para o estudo de cinética de absorção, diferindo apenas quanto ao número de plantas por vaso, que, neste experimento, foi de quatro e, na concentração de fósforo na solução de absorção, foi de $30\text{ }\mu\text{M}$, as plantas foram transferidas para a solução de absorção (Quadro 1), marcada com $18,5 \times 10^4\text{ Bq}$ de ^{32}P na forma de $\text{NaH}_2^{32}\text{PO}_4$ livre de carregador, por um período de duas horas, como utilizado por VALE (1982). Transcorrido esse tempo, as plantas foram seccionadas 1 centímetro acima do colo e o exsudato do xilema recolhido, por 30 minutos, com o uso de pipetas de Pasteur. Determinou-se o peso do exsudato produzido por conjunto de vaso-planta, pesando-se os frascos de cintilação antes e depois da coleta. A contagem do ^{32}P foi realizada conforme a metodologia já descrita. Feita a coleta do exsudato, os sistemas radiculares das plantas foram lavados e secados com papel absorvente, determinando-se, em seguida, o peso do material fresco. Com os dados obtidos, calculou-se a translocação de fosfato em μM de P para cada tratamento, em ambos os cultivares.

Este experimento teve início quatro horas após o término do período escuro e foi conduzido em câmara de crescimento, em condições semelhantes às do primeiro experimento.

2.4. Composição Mineral dos Cultivares

Plantas dos dois cultivares, remanescentes das oito caixas que continham os dois tratamentos com alumínio, foram coletadas e preparadas para a determinação da composição mineral de suas partes aéreas e raízes. Foram retiradas três plantas de cada uma das caixas existentes. As raízes foram lavadas com água destilada e as plantas separadas em sistema radicular e parte aérea. O material, após secado em estufa, a $70-80^\circ\text{C}$, por 72 horas, foi pesado e moído.

Os sistemas radiculares e as partes aéreas foram analisados individualmente, determinando-se os teores de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, zinco, ferro, cobre, manganês e alumínio. A dosagem do

nitrogênio foi feita pelo método de Kjeldahl. Nos extratos da mineralização nítrico-perclórica, o fósforo foi determinado colorimetricamente pelo método do ácido ascórbico (BRAGA e DEFELIPO, 1974) e o potássio por fotometria de emissão de chama. O cálcio, magnésio, zinco, ferro, cobre e manganês foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. A dosagem de alumínio foi realizada de acordo com o método de aluminon (CHENERY, 1948), modificado por BRAGA^{1/}.

O experimento foi constituído por um fatorial 2x2 (dois cultivares e dois níveis de alumínio), com duas repetições (três plantas por repetição), em delineamento inteiramente casualizado.

^{1/} Professor José Mário Braga (U.F.V.) - Comunicação pessoal.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Cinética de Absorção de Fosfato

As equações do método gráfico-matemático adaptado por RUIZ^{1/}, relacionando concentração de fósforo e tempo, ajustadas para cada tratamento, mostraram que esse método ajustou-se adequadamente aos dados obtidos. Os valores do coeficiente de determinação foram significativos a 1% de probabilidade, tanto para as equações lineares como para as potenciais.

Na ausência de alumínio, os dois cultivares de trigo apresentaram K_m e V_{max} semelhantes; entretanto, quando as plantas foram crescidas em solução nutritiva que continha alumínio, observou-se redução da V_{max} para ambos os cultivares (Quadro 2). Isto significa que o alumínio reduziu o giro e/ou a concentração efetiva do carregador nas raízes. A redução do valor de V_{max} do 'Anahuac' foi de 13,8%, enquanto a do 'BH-1146' foi de 26,2%. Por outro lado, o K_m do 'Anahuac' foi aumentado pelo tratamento com alumínio, ao passo que o K_m do 'BH-1146' sofreu uma pequena redução (Quadro 2). Pela variação de K_m pode-se dizer que, no cultivar sensível, o tratamento com alumínio reduziu a afinidade do fosfato para com seu carregador, ao passo que, no resistente, provocou pequeno aumento.

^{1/} Prof. Hugo Ruiz (UFES) - Comunicação pessoal.

QUADRO 2. Valores de $V_{\max}$ e K_m da Cinética de Absorção de Fosfato de Dois Cultivares de Trigo, um Sensível ('Anahuac') e outro Resistente ('BH-1146') ao Alumínio. Média de Três Repetições

Níveis de Alumínio	'Anahuac'		'BH-1146'	
	$V_{\max} \frac{1}{\mu \text{ moles P. g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}}$	$K_m \mu\text{M}$	$V_{\max} \frac{1}{\mu \text{ moles P. g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}}$	$K_m \mu\text{M}$
ppm				
0	0,811	3,090	0,867	3,047
0,5	0,699	3,586	0,640	2,929

1/ Com base no peso de matéria fresca do sistema radicular.

Assim, pode-se inferir que, em condições de baixos teores de fósforo e altos de alumínio, o 'BH-1146' leva certa vantagem sobre o 'Anahuac', por possuir um carregador que apresenta maior afinidade com o fosfato. Pela conjugação dos valores de K_m e $V_{\max}$ na fórmula de Michaelis-Menten, em concentrações mais baixas de fósforo (0,5 a 2,5 μM), o 'BH-1146', crescendo na presença de alumínio, apresentou maior influxo que o 'Anahuac' (Quadro 3). Entretanto, nas concentrações mais altas (5,0 a 20,0 μM), o 'Anahuac' passou a apresentar maior influxo que o 'BH-1146'.

Observa-se também que o pré-tratamento com alumínio reduziu o influxo de fosfato em ambos os cultivares (Quadro 3). Este resultado contrasta com dados obtidos por BRAUNER e SARRUGE (1980), que relataram um aumento do influxo de fosfato por cultivares de trigo causado pelo alumínio. Essa diferença poderia, em parte, ser explicada pelo fato de terem esses autores conduzido a cinética de absorção de fosfato com o alumínio presente na solução de absorção, enquanto, neste trabalho, o alumínio foi excluído da solução durante o estudo da cinética. Os resultados do trabalho de CAMBRAIA e CALBO (1980) reforçam essa explicação, uma vez que o aumento do influxo de fosfato em raízes destacadas de sorgo só ocorria, quando o alumínio estava presente na solução durante o estudo da cinética, e diminuía, quando o alumínio era excluído. Assim, o incremento por eles observado no influxo de fosfato teria sido causado por uma possível

QUADRO 3. Influxo Estimado de Fosfato em Diferentes Concentrações Externas Deste Elemento, para Dois Cultivares de Trigo ('Anahuac' e 'BH-1146') e Dois Níveis de Alumínio (0 e 0,5 ppm). Média de Três Repetições

Cultivares	Conc. Al	Conc. P na Solução Externa					
		μM					
		0,5	1,0	2,5	5,0	10,0	20,0
	ppm	Influxo					
		$\mu \text{ moles P} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$					
'Anahuac'	0,0	0,1156	0,1983	0,3682	0,5015	0,6199	0,7028
	0,5	0,0856	0,1525	0,2873	0,4073	0,5147	0,5930
'BH-1146'	0,0	0,1222	0,2142	0,3906	0,5386	0,6644	0,7522
	0,5	0,0933	0,1629	0,2947	0,4035	0,4949	0,5582

precipitação de fosfato de alumínio no sistema radicular. CLARKSON (1967a) também observou estímulos semelhantes na absorção de fósforo por segmentos de raízes de cevada na presença de alumínio e demonstrou que, praticamente, toda a absorção estimulada pelo alumínio era de natureza não-metabólica, não diminuindo na presença de dinitrofenol ou quando submetida a baixas temperaturas.

Neste trabalho, não se pode descartar a possibilidade de que os parâmetros cinéticos tenham sofrido influência de microrganismos, uma vez que o experimento não foi conduzido em condições esterilizadas. Entretanto, de acordo com BARBER (1972) e EPSTEIN (1968), o padrão de absorção não é alterado significativamente pela presença de microrganismos no meio.

3.2. Translocação de Fosfato

Os valores da concentração de fósforo na seiva xilemática (Quadro 4) são compatíveis com observações de RUSSEL e BARBER (1960) de que o fósforo encontra-se na seiva xilemática numa concentração $10^2 - 10^3$ vezes maior que na solução de absorção. O 'BH-1146' apresentou menor concentração

QUADRO 4. Efeito do Alumínio sobre a Concentração de Fósforo no Exsudato do Xilema de Dois Cultivares de Trigo, um Sensível ('Anahuac') e outro Resistente ('BH-1146') ao Alumínio. Média de Três Repetições

Tratamentos com Al	'Anahuac'	'BH- 1146'
ppm	————— μ M de P no exsudato —————	
0	1340	843
0,5	882	970

de fósforo no exsudato do xilema que o 'Anahuac', quando as plantas foram crescidas em solução sem alumínio (Quadro 4). Entretanto, quando as plantas foram pré-tratadas com alumínio, o cultivar sensível teve a concentração de fósforo no exsudato diminuída em 34%, ao passo que o resistente a teve aumentada em 15% (Quadro 4).

As plantas do cultivar 'BH-1146' apresentaram maior peso da matéria fresca do sistema radicular (Quadro 5). Conseqüentemente, como as plantas de todos os tratamentos foram submetidas à exclusão de fósforo das soluções nas 40 horas prévias ao estudo de cinética, é razoável pensar que as plantas do 'BH-1146', por possuírem maior peso da matéria fresca de sistema radicular, tenham sofrido maior "fome" de fósforo que as do 'Anahuac'. Talvez a diferença encontrada entre os cultivares, quanto à translocação de fosfato na ausência de alumínio, seja resultante de uma maior incorporação, pelo 'BH-1146', desse elemento nas frações de ácidos nucleicos, fosfolipídios e fosfoproteínas do que nas frações ácidas. Esta explicação é apoiada pelo fato de que BOWEN (1970), CARTWRIGHT (1972) e JUNGK (1975) observaram maior taxa de absorção de fosfato por plantas deficientes em fósforo, e CLARKSON *et alii* (1978) observaram o mesmo, com relação à translocação. Também, BOWEN (1969) e JAHROMI *et alii* (1976) observaram que plântulas de *Pinus*, deficientes em fósforo, apresentavam maior absorção de fosfato, com conseqüente maior incorporação nas raízes em frações de ácidos nucleicos, fosfolipídios e fosfoproteínas que nas frações solúveis em ácidos. Isso logicamente implicou

QUADRO 5. Peso da Matéria Fresca do Sistema Radicular dos Cultivares 'Anahuac' e 'BH-1146', no Experimento de Translocação de Fósforo. Média de Três Repetições

Cultivares	Conc. Al	Peso de Matéria Fresca do Sistema Radicular
	ppm	gramas
'Anahuac'	0,0	24,05
	0,5	19,82
'BH-1146'	0,0	42,82
	0,5	36,02

a menor translocação de fósforo para a parte aérea.

A maior redução na concentração de fósforo do exsudato no cultivar 'Anahuac', quando comparado com 'BH-1146', pré-tratados com alumínio, talvez esteja relacionada com uma maior precipitação de fósforo pelo alumínio no cultivar sensível.

Observou-se também que, no 'Anahuac', embora a concentração de fósforo na seiva xilemática tenha sido reduzida pelo pré-tratamento com alumínio, nesta situação ainda foi semelhante à do 'BH-1146', na ausência de alumínio. Deve-se considerar, entretanto, que o 'Anahuac' é tido como cultivar exigente em termos de fertilidade e que o 'BH-1146' é adaptado a solos pobres, chegando mesmo a acamar em solos mais férteis (SOUZA e SOBRINHO, 1983). Assim, é possível que o 'Anahuac', por ser talvez mais exigente em fósforo, não viesse a resistir à redução na translocação desse elemento, mesmo que permanecesse em níveis semelhantes aos do 'BH-1146'.

3.3. Composição Mineral dos Cultivares

A produção de matéria seca da parte aérea foi significativamente reduzida nos dois cultivares pela presença de 0,5 ppm de alumínio na solução de crescimento (Quadro 6). Entretanto, não houve alteração

QUADRO 6. Efeito do Alumínio na Produção de Matéria Seca da Parte Aérea e Sistema Radicular dos Cultivares 'Anahuac' (Sensível) e 'BH-1146' (Resistente). Média de Duas Repetições

Cultivares	Conc. Al	Produção de Matéria Seca	
		Parte Aérea	Raiz
	ppm	g	
'Anahuac'	0	3,56	0,96
	0,5	2,87	0,76
'BH-1146'	0	3,76	1,29
	0,5	3,28	1,02
F Cultivar		5,85 NS	14,92 *
F Al/'Anahuac'		15,52 *	3,35 NS
F Al/'BH-1146'		7,74 *	5,91 NS

NS: Não-significativo.

* : Significativo a 5% de probabilidade.

significativa do peso de matéria seca do sistema radicular dos cultivares, em decorrência do tratamento com alumínio.

Também não foi encontrada diferença significativa entre os cultivares quanto à produção de matéria seca pela parte aérea. Entretanto, quanto ao sistema radicular, o 'BH-1146', que é considerado resistente, apresentou maior peso de matéria seca que o 'Anahuac', tido como sensível. Talvez esta diferença seja um dos componentes da resistência diferencial ao alumínio entre esses cultivares, uma vez que este maior desenvolvimento pode possibilitar maior absorção de água e de elementos minerais na presença de alumínio.

A composição mineral da parte aérea e do sistema radicular também foi influenciada pela presença de alumínio na solução nutritiva (Quadros 7 e 8). Na parte aérea, o alumínio aumentou significativamente os teores de nitrogênio total em ambos os cultivares (Quadro 7). Resultados semelhantes têm sido encontrados por outros autores. Ota (1968), citado por FOY (1974), observou que o alumínio aumentou a concentração de

QUADRO 7. Teores de N, P, K, Ca, Mg, Zn, Fe, Mn e Cu na Parte Aérea dos Cultivares 'Anahuac' e 'BH-1146' na Presença e Ausência de Alumínio. Média de Duas Repetições

Cultivares	Conc. Al	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Fe	Mn	Cu
	ppm	% na matéria seca					ppm na matéria seca			
'Anahuac'	0	4,20	0,32	2,87	0,47	0,25	89	24	75	8
	0,5	4,49	0,37	2,98	0,30	0,14	63	29	56	8
'BH-1146'	0	4,42	0,30	3,56	0,60	0,29	98	30	127	11
	0,5	4,78	0,31	3,49	0,53	0,25	100	33	149	11
F Cultivar		8,70 *	6,13 NS	12,64 *	98,53 **	133,00 **	46,77 **	2,06 NS	415,80 **	62,17 **
F Al/'Anahuac'		7,67 *	5,00 NS	0,20 NS	43,84 **	36,75 **	30,35 **	1,05 NS	13,69 *	0,28 NS
F Al/'BH-1146'		8,55 *	0,27 NS	0,08 NS	7,00 NS	9,25 *	0,40 NS	0,61 NS	19,07 *	0,44 NS

NS: Não-significativo.

* : Significativo a 5% de probabilidade.

** : Significativo a 1% de probabilidade.

QUADRO 8. Teores de N, P, K, Ca, Mg, Zn, Fe, Mn e Cu no Sistema Radicular dos Cultivares 'Anahuac' e 'BH-1146' na Presença e Ausência de Alumínio. Média de Duas Repetições

Cultivares	Conc. Al	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Fe	Mn	Cu
	ppm	% na matéria seca					ppm na matéria seca			
'Anahuac'	0	3,29	0,28	2,29	0,20	0,07	115	119	172	16
	0,5	3,44	0,37	2,33	0,16	0,06	82	60	57	10
'BH-1146'	0	3,78	0,31	3,26	0,23	0,15	224	132	409	71
	0,5	3,66	0,33	3,02	0,20	0,12	197	110	420	69
F. Cultivar		10,04 *	0,59 NS	195,41 **	21,81 **	546,8 **	294,29 **	7,30 NS	638,42 **	106,21 **
F Al/'Anahuac'		0,92 NS	71,50 **	0,16 NS	10,89 *	4,2 NS	12,39 *	13,57 *	47,18 **	0,61 NS
F Al/'BH-1146'		0,61 NS	4,15 NS	7,50 NS	7,30 NS	54,0 **	8,87 *	1,85 NS	0,40 NS	0,04 NS

NS: Não-significativo.

* : Significativo a 5% de probabilidade.

** : Significativo a 1% de probabilidade.

nitrogênio total na parte aérea de plantas de arroz, e MOSQUIM (1978) encontrou que o alumínio aumentou os teores de aminoácidos livres totais e de proteínas no sistema radicular e na parte aérea de plantas de Stylosanthes humilis crescidas em solução com alumínio. Outros autores obtiveram resultados semelhantes para S. macrocephala (GONÇALVES, 1983; CORDEIRO, 1981) e para Eucalyptus alba (VALE, 1982). De acordo com resultados encontrados por GONÇALVES (1983), é possível que o alumínio aumente a absorção de nitrato no S. macrocephala mediante estímulo da atividade e/ou síntese da redutase do nitrato. O mesmo autor ponderou que, de forma análoga, é possível admitir que o alumínio estimule a absorção de amônio mediante um efeito modulador positivo que exerce sobre a síntese da L-glutamina das células radiculares do S. macrocephala. Já BASSIONI (1973) observou que o alumínio, em baixas concentrações, exerce efeito estimulante no estágio inicial de absorção de $N-NO_3^-$, promovendo maior absorção total, em razão da redução do potencial negativo da raiz.

A porcentagem de nitrogênio total do sistema radicular (Quadro 8) não foi influenciada pelo alumínio em ambos os cultivares; porém o cultivar resistente apresentou maior teor de nitrogênio total do que o sensível.

A concentração de fósforo na parte aérea de ambos os cultivares não foi alterada significativamente pela presença de alumínio na solução de crescimento (Quadro 7). Entretanto, no sistema radicular, apenas o cultivar sensível apresentou aumento significativo no teor de fósforo no tratamento com alumínio (Quadro 8). Isto sugere que, no cultivar 'Anahuac', pode ter havido precipitação de fósforo pelo alumínio nos tecidos radiculares. RORISON (1965) e CLARKSON (1966, 1967) sugeriram que a interação de alumínio e fosfato dá-se no espaço livre aparente das raízes por reações de adsorção-precipitação, sendo, portanto, independente de processos metabólicos. Esta hipótese foi confirmada por RASMUSSEN (1968), ao observar que o alumínio exaurido de soluções ácidas precipitava-se na parede das células da epiderme de raízes de milho, sem penetrar no córtex, e que a distribuição do fósforo era a mesma desse elemento, sugerindo, assim, a precipitação de fósforo pelo alumínio. Contudo, há

evidência de que as paredes das células corticais também atuam como sítios de fixação de alumínio (KLIMASHEVSKY et alii, 1972; MC CORNICK e BORDEN, 1974; KESAR et alii, 1975; MATSUMOTO et alii, 1976).

A diferença quanto à possível precipitação de fósforo pelo alumínio entre os dois cultivares poderia, talvez, ser atribuída à ação de ácidos orgânicos. JONES (1961) e BARTLETT e RIEGO (1972) verificaram que ácidos orgânicos podem formar quelatos com o alumínio, prevenindo, assim, a precipitação do fósforo por esse elemento. Entretanto, neste trabalho, essa hipótese possivelmente não se aplica, uma vez que não foram observadas maiores concentrações de alumínio na parte aérea do cultivar 'BH-1146', já que, de acordo com JONES (1961), o alumínio complexado por ácidos orgânicos pode ser translocado sem causar toxidez.

Os teores de potássio e de cobre, tanto na parte aérea como no sistema radicular, em ambos os cultivares, não foram modificados pelo alumínio (Quadros 7 e 8).

O teor de cálcio na parte aérea do cultivar sensível ('Anahuac') foi severamente reduzido pela presença de 0,5 ppm de alumínio na solução nutritiva (Quadro 7). Entretanto, para o cultivar resistente ('BH-1146'), não houve efeito significativo do alumínio.

Alguns trabalhos têm demonstrado que a resistência diferencial de alguns cultivares de soja (ARMINGER et alii, 1968); feijão (FOY et alii, 1972), trigo e cevada (FOY et alii, 1967, 1969; LONG e FOY, 1970) ao alumínio pode estar associada com a maior capacidade das plantas para absorver e transportar o cálcio para a parte aérea na presença de alumínio. Neste experimento, é possível que a diferença verificada quanto aos teores de cálcio da parte aérea e sistema radicular seja um dos componentes de resistência diferencial entre os dois cultivares, já que, na presença de alumínio, também a concentração de cálcio no sistema radicular (Quadro 8) foi reduzida no 'Anahuac' e não foi significativamente alterada no 'BH-1146'.

Os teores de magnésio na parte aérea sofreram redução pela presença de alumínio nos dois cultivares (Quadro 7). Embora a interação

cultivar x alumínio não tenha sido significativa, houve redução de 33% no cultivar sensível contra apenas 13% no resistente. Recentemente, alguns trabalhos têm enfatizado a relação Al/Mg na problemática de toxidez de alumínio em plantas. Em experimento realizado por CLARK (1977) com duas linhagens de milho, uma eficiente e outra menos eficiente quanto à absorção de magnésio, comprovou-se que as plantas da linhagem de menor eficiência foram mais sensíveis ao alumínio do que as da linhagem eficiente. Também foi ressaltado que, embora as deficiências de cálcio e de fósforo sejam comumente consideradas como sintomas de toxidez de alumínio, esta pode estar estreitamente associada ao magnésio. No sistema radicular, o alumínio provocou redução significativa no teor de magnésio do cultivar 'BH-1146', não afetando, porém, o 'Anahuac' (Quadro 8).

O alumínio também reduziu significativamente a concentração de zinco na parte aérea do cultivar 'Anahuac', não alterando, porém, a do 'BH-1146' (Quadro 7). Já no sistema radicular, o alumínio reduziu os teores de zinco, em ambos os cultivares, indistintamente (Quadro 8).

O alumínio também não alterou os teores de ferro na parte aérea dos cultivares (Quadro 7). Entretanto, reduziu significativamente os teores desse elemento no sistema radicular do 'Anahuac', não alterando, porém, os do 'BH-1146'. Os efeitos relatados na literatura do alumínio sobre os teores de ferro são bastante variáveis. Dependendo da espécie, idade da planta, composição da solução nutritiva e de outros fatores, pode-se ter aumento, diminuição ou mesmo nenhum efeito do alumínio no teor de ferro, tanto da parte aérea como do sistema radicular (OTSUKA, 1970; BROWN e JONES, 1977; ALAM e ADAMS, 1979; MUGWIRA, 1980; LEMOS FILHO, 1982). De acordo com os resultados obtidos por ALAM e ADAMS (1979), os menores teores de ferro, nas plantas submetidas a níveis tóxicos de alumínio, resultam de uma inibição do processo de redução do íon férrico a ferroso na superfície radicular, condição essencial para a absorção deste íon. Essa hipótese foi confirmada por LEMOS FILHO (1982), que observou que a capacidade das raízes para reduzir o íon férrico é inibida pela presença de alumínio.

Os teores de manganês, tanto na parte aérea como no sistema radicular, foram influenciados distintamente pelo alumínio nos dois cultivos. Na parte aérea, a concentração de manganês do 'BH-1146' aumentou no tratamento com alumínio e no 'Anahuac' reduziu (Quadro 7). Já no sistema radicular, o alumínio reduziu o teor de manganês no cultivar sensível e não afetou o do resistente (Quadro 8). ALAM e ADAMS (1979), LEE (1971) e Ota (1968), citado por FOY (1974), encontraram efeitos depressivos do alumínio sobre o conteúdo de manganês em aveia, batata e arroz, respectivamente. Tal fato conduziu à hipótese de que o alumínio compete com o manganês pelos mesmos sítios de absorção, o que resulta em menor absorção desse elemento. No presente trabalho, esse efeito depressivo do alumínio sobre o teor de manganês só foi observado no cultivar sensível.

De modo geral, observa-se que o 'BH-1146' apresentou maiores concentrações de cátions que o 'Anahuac', tanto no tratamento sem alumínio quanto no tratamento com 0,5 ppm de alumínio (Quadros 7 e 8). GARGANTINI *et alii* (1973) também observaram grande diferença entre as quantidades de nutrientes absorvidos pelos cultivares de trigo 'BH-1146' e 'IAS-3795'. O 'BH-1146', até os vinte dias de idade, absorveu mais potássio, cálcio e manganês que o 'IAS-3795'.

Os teores de alumínio em ambos os cultivares, em um mesmo tratamento, apresentaram grande variabilidade, principalmente no sistema radicular, quando o alumínio estava presente na solução nutritiva. Apesar disso, pôde-se observar que os dois cultivares acumularam alumínio no sistema radicular, sem ter ocorrido maior translocação desse elemento para a parte aérea.

Vários autores têm estudado a localização do alumínio nas raízes das plantas e sugerido possíveis mecanismos fisiológicos para a resistência ou sensibilidade a este elemento. Henning (1975), citado por FOY (1978), em estudos utilizando corantes, observou que a maior parte do alumínio absorvido por raízes de trigo penetrava entre o ápice e a coifa da raiz e se acumulava no citoplasma das células adjacentes a esta zona. Algum alumínio passou através da epiderme e córtex, mas consideráveis quantidades foram retidas nas células corticais. Embora a endoderme

pareça evitar o movimento do alumínio para dentro do cilindro central, foi proposto que algum alumínio poderia ter contornado a endoderme entrando no ápice da raiz e passando através das células meristemáticas do cilindro central. Esse autor também observou que o cultivar de trigo 'Atlas 66', resistente ao alumínio, necessitou de 100 a 200 vezes mais alumínio no meio do que o 'Brevor' (sensível), para que esse elemento ultrapassasse o plasmalema das células meristemáticas da raiz. Entretanto, uma vez no interior da célula, o alumínio foi igualmente prejudicial, tanto para o cultivar sensível quanto para o resistente. Isto levou à conclusão de que a resistência do trigo ao alumínio é devida à sua exclusão pelo plasmalema das células da raiz e que as diferenças entre os cultivares quanto à resistência ao alumínio são devidas a diferenças na estrutura molecular da membrana. Entretanto, de acordo com FOY (1978), não há diferença consistente quanto à concentração de alumínio na parte aérea de cultivares de trigo resistentes ou sensíveis a esse elemento, mas o sistema radicular de plantas resistentes muitas vezes contém menos alumínio que o de plantas sensíveis. Neste experimento, tal fato não pôde ser observado, dada a grande variabilidade no teor de alumínio entre as plantas de uma mesma repetição.

Deve-se levar em consideração que os resultados deste trabalho foram obtidos com 0,5 ppm de alumínio. É possível que os efeitos diferenciais do alumínio nos cultivares 'BH-1146' e 'Anahuac' sejam mais acentuados, quando forem utilizados níveis mais altos desse elemento.

4. RESUMO E CONCLUSÕES

Com o objetivo de caracterizar o efeito do alumínio sobre a cinética de absorção e translocação de fosfato e sobre a composição mineral de dois cultivares de trigo, um sensível ('Anahuac') e outro resistente ('BH-1146') ao alumínio, conduziram-se três ensaios em solução nutritiva (pH 4,5), em condições de casa de vegetação e câmara de crescimento. Foram utilizados os níveis de 0 e 0,5 ppm de alumínio. O tratamento com alumínio consistiu na sua aplicação durante todo o período de crescimento das plantas, sendo retirado apenas durante os ensaios de cinética de absorção e de translocação de fosfato.

Determinaram-se os parâmetros cinéticos da absorção de fosfato (K_m e V_{max}), pela diminuição da concentração de P, marcado com ^{32}P na solução externa, de acordo com o tempo. A presença do alumínio reduziu a V_{max} dos dois cultivares, sendo essa redução maior para o 'BH-1146'. Também reduziu ligeiramente o K_m do 'BH-1146', embora tenha aumentado o do 'Anahuac'.

O efeito do alumínio sobre a translocação de fosfato foi avaliado, determinando-se a concentração de P no exsudato do xilema, após as plantas absorverem uma solução com fosfato marcado com ^{32}P por 2,0 h. O alumínio reduziu a translocação de fosfato no 'Anahuac' e a aumentou no 'BH-1146'.

Assim, os parâmetros cinéticos e a translocação de fosfato parecem estar associados com a resistência diferencial dos dois cultivares ao alumínio.

Avaliaram-se os efeitos do alumínio sobre os teores de N, P, K, Ca, Mg, Zn, Fe, Mn, Cu e Al e sobre a produção de matéria seca, utilizando plantas dos dois cultivares em solução nutritiva que continha 0 e 0,5 ppm de alumínio. O alumínio alterou diferencialmente os teores de Ca, Zn e Mn, na parte aérea, e de P, Mg e Fe, no sistema radicular dos cultivares. De maneira geral, o 'BH-1146' apresentou maiores concentrações de cátions que o 'Anahuac', independentemente do nível de alumínio na solução.

Concluiu-se que um dos componentes da resistência diferencial ao alumínio entre os cultivares 'Anahuac' e 'BH-1146' está relacionado com a absorção e translocação não apenas de fósforo, mas também de outros elementos minerais.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

1. ALAM, S.M. & ADAMS, W.A. Effects of aluminium on nutrient composition and yield of oats. J. Plant Nutr., 1: 365-375. 1979.
2. ANDREW, C.S. A kinetic study of phosphate absorption by excised roots of Stylosanthes humilis, Phaseolus lathyroides, Desmodium uncinatum, Medicago sativa and Hordeum vulgare. Aust. J. Agric. Res., 17: 611-624. 1966.
3. ANDREW, C.S.; JOHNSON, A.D. & SANDLAND, R.L. Effect of aluminium on the growth and chemical composition of some tropical and temperate pasture legumes. Aust. J. Agric. Res., 24: 325-339. 1973.
4. ANDREW, C.S. & VAN DEN BERG, P.J. The influence of aluminum on phosphate sorption by whole plants and excised roots of some pasture legumes. Aust. J. Agric. Res., 24: 341-351. 1973.
5. ARMIGER, W.H.; FOY, C.D. & CALDWELL, B.E. Differential tolerance of soybean varieties to an acid soil high in exchangeable aluminium. Agron. J., 60: 67-70. 1968.
6. BARBER, D.A. 'Dual isotherms' for the absorption of ion by plant tissues. New Phytol., 71: 255-262. 1972.
7. BARTLETT, R.G. & RIEGO, D.C. Effect of chelation on the toxicity of aluminum. Plant Soil, 37: 419-423. 1972.
8. BASSIONI, N.H. On the mechanism of nitrate uptake by plant roots. II. Effect of the valence of the associated cation. Agrochimica, 17: 341-346. 1973.

9. BOWEN, G.D. The uptake of orthophosphate and its incorporation into organic phosphates along roots of Pinus radiata. Aust. J. Biol. Sci., 22: 1125-1135. 1969.
10. BOWEN, G.D. Early detection of phosphorus deficiency in plants. Soil Sci. Plant Anal., 1: 293-298. 1970.
11. BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solos e plantas. Rev. Ceres, 21: 73-85. 1974.
12. BRAUNER, J.L. & SARRUGE, J.R. Tolerância de cultivares de trigo (Triticum aestivum L.) ao alumínio e ao manganês. VI. Influência do alumínio e do manganês e do grau de tolerância a cada elemento na absorção de fósforo. Anais da E.S.A. 'Luiz de Queiroz', 37: 895-912. 1980.
13. BROWN, J.C. & JONES, W.E. Fitting plants nutritionally to soils. III. Sorghum. Agron. J., 69: 410-414. 1977.
14. CAMBRAIA, J. & CALBO, A.G. Efeito do alumínio sobre a absorção e sobre o transporte de fósforo em dois cultivares de sorgo (Sorghum bicolor L. Moench). Rev. Ceres, 27: 615-625. 1980.
15. CARTWRIGHT, B. The effect of phosphate deficiency on the kinetics of phosphate absorption by sterile excised barley roots and some factors affecting the ion uptake efficiency of roots. Soil Sci. Plant Anal., 3: 313-322. 1972.
16. CHENERY, E.M. Thioglycolic acid as an inhibitor for iron in the colorimetric determination of aluminum by means of 'aluminon'. Analyst., 73: 501-502. 1948.
17. CLAASSEN, N. & BARBER, S.A. A method of characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants. Plant Physiol., 54: 564-568. 1974.
18. CLARK, R.B. Characterization of phosphatase of intact maize roots. J. Agric. Food Chem., 23: 458-460. 1975.
19. CLARK, R.B. Effects of aluminum on growth and mineral elements of Al-tolerants and Al-intolerant corn. Plant Soil, 47: 653-662, 1977.
20. CLARKSON, D.T. Effect of aluminum on the uptake and metabolism of phosphorus by barley seedlings. Plant Physiol., 41: 165-172. 1966.
21. CLARKSON, D.T. Interaction between aluminium and phosphorus on root surfaces and cell wall material. Plant Soil, 27: 347-356. 1967a.

22. CLARKSON, D.T. Phosphorus supply and growth rate in species of Agrostis L. J. Ecol., 55: 111-118. 1967b.
23. CLARKSON, D.T.; SANDERSON, J. & SCATTERGOOD, C.B. Influence of phosphate-stress on phosphate absorption and translocation by various parts of the root system of Hordeum vulgare, L. (Barley). Planta, 139: 47-53. 1978.
24. CORDEIRO, A.T. Efeito de níveis de nitrato, amônio e alumínio sobre o crescimento e sobre a absorção de fósforo e de nitrogênio em Stylosanthes guianensis e Stylosanthes macrocephala. Viçosa, U.F.V., Imprensa Universitária, 1981. (Tese de M.S.).
25. EPSTEIN, E. & HAGEN, C.E. A kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots. Plant Physiol., 27: 457-474. 1952.
26. EPSTEIN, E. Microorganism and ion absorption by roots. Experientia, 24: 616-617. 1968.
27. FOY, C.D. Effects of aluminum on plant growth. In: Carson, E.W. (ed.). The Plant Root and Its Environment. University Press of Virginia. Charlottesville. 1974. p. 601-642.
28. FOY, C.D. & BROWN, J.C. Toxic factors in acid soils. I. Characterization of aluminum toxicity in cotton. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 24: 403-407. 1963.
29. FOY, C.D. & BROWN, J.C. Toxic factors in acid soils. II. Differential tolerance of plant species. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 28: 27-32. 1964.
30. FOY, C.D.; CHANEY, R.L. & WHITE, M.C. The physiology of metal toxicity in plants. Annu. Rev. Plant Physiol., 29: 511-566. 1978.
31. FOY, C.D.; FLEMING, A.L. & ARMIGER, W.H. Aluminum tolerance of soybean varieties in relation to calcium nutrition. Agron. J., 61: 505-511. 1969.
32. FOY, C.D.; FLEMING, A.L.; BURNS, G.R.; ARMIGER, W.H. Characterization of differential aluminum tolerance among varieties of wheat and barley. Agron. J., 31: 513-521. 1967.
33. FOY, C.D.; FLEMING, A.L. & GERLOFF, G.C. Differential aluminum tolerance in two snapbean varieties. Agron. J., 68: 815-818. 1972.
34. FRANKLIN, R.E. Effect of adsorbed cations on phosphorus uptake by excised roots. Plant Physiol., 44: 697-700. 1969.

35. FRANKLIN, R.E. Effect of adsorbed cations on phosphorus adsorption by various plant species. Agron. J., 62: 214-216. 1970.
36. FRANKLIN, R.E. Cation effects on chloride, sulfate and phosphate uptake by excised roots. Soil Sci., 112: 343-347. 1971.
37. GARGANTINI, H.; BLANCO, H.G.; HAAG, H.P.; MALAVOLTA, E. Absorção de nutrientes pelo trigo. Bragantia, 32: 285-307. 1973.
38. GONÇALVES, M.C. Influência do alumínio, nitrato e amônio na absorção e na assimilação do nitrogênio, em *Stylosanthes guianensis* e *S. macrocephala*. Viçosa, U.F.V., Imprensa Universitária, 1983. 38 p. (Tese de M.S.).
39. HACKETT, C. Ecological aspects of the nutrition of *Deschampsia flexuosa* (L.) Trin. III. Investigation of phosphorus requirement and response to Al in water culture and a study of growth in soil. J. Ecol., 55: 831-840. 1967.
40. HAGEN, C.E. & HOPKINS, H.T. Ionic species in orthophosphate absorption by barley roots. Plant Physiol., 30: 193-199. 1955.
41. HOFSTEE, B.H.J. On the evaluation of constants V_m and K_m in enzyme reactions. Science, 116: 329-333. 1952.
42. HSU, P.H. & RENNIE, D.A. Reaction of phosphate in aluminum systems. I. Adsorption of phosphate by X-ray amorphous "aluminum hydroxide". Can J. Soil Sci., 42: 197-209. 1962.
43. JAHROMI, S.T.; SMITH, W.H. & GODDARD, R.E. Genotype x fertilizer interactions in slash pine: variation in phosphate (^{33}P) incorporation. Forest Sci., 22: 21-30. 1976.
44. JONES, L.H. Aluminium uptake and toxicity in plants. Plant Soil, 13: 297-310. 1961.
45. JUNGK, A. Phosphate uptake characteristics of intact root systems in nutrient solution as affected by plants species age and P supply. Proc. 7th. Int. Collog. Plant Anal. Fert. Prob., Hannover, West Germany. p. 185-196. 1975.
46. KESAR, M.; NEUBAUER, B.F. & HUTCHINSON, F.E. Influence of aluminum ions on developmental morphology of sugar-beet roots. Agron. J., 67: 84-88. 1975.
47. KLIMASHEVSKY, E.L. & DEDOV, V.M. Localization of the mechanism of growth-inhibiting action of aluminum in elongating cell walls. Soviet Plant Physiol., 22: 1040-1046. 1975.

48. KLIMASHEVSKY, E.L.; MARKOVA, Y.A.; BERNATZKAYA, M.L.; MALYSHEVA, A.S. Physiological responses to aluminum toxicity in root zone of pea varieties. Agrochimica, 16: 487-496. 1972.
49. LANCE, J.C. & PEARSON, R.W. Effect of low concentration of aluminum on growth and water and nutrient uptake by cotton roots. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 33: 95-98. 1969.
50. LEE, C.R. Influence of aluminum on plant growth and mineral nutrition of potatoes. Agron. J., 63: 604-608. 1971.
51. LEMOS FILHO, J.P. Efeito do alumínio sobre os teores de alguns elementos minerais, sobre a fotossíntese e sobre a atividade de certas oxidasas em sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). Viçosa, U.F.V., Imprensa Universitária. 1982. 46 p. (Tese de M.S.).
52. LINEWEAVER, H. & BURK, D. The determination of enzyme dissociation constants. J. Am. Chem. Soc., 56: 658-666. 1934.
53. LONG, F.L. & FOY, C.D. Plant varieties as indication of aluminum toxicity in the A₂ horizon of a Norfolk soil. Agron. J., 62: 679-681. 1970.
54. MAC LEAN, A.A. & CHIASOON, T.C. Differential performance of two barley varieties to varying aluminum concentrations. Can. J. Soil Sci., 46: 147-154. 1966.
55. MAC LEOD, L.B. & JACKSON, L.P. Aluminum tolerance of two barley varieties in nutrient solution, peat, and soil culture. Agron. J., 59: 359-363. 1967.
56. MACHADO, A.M. Cinética da absorção de fosfato em *Stylosanthes guianensis* e *S. macrocephala* na presença do alumínio. Viçosa, U.F.V., Imprensa Universitária. 1981. 51 p. (Tese de M.S.).
57. MATSUMOTO, H.; HIRASAWA, E.; TORIKAI, H.; TAKAHASHI, E. Localization of absorbed aluminum in pea root and its binding to nucleic acids. Plant Cell Physiol., 17: 127-136. 1976.
58. MC CORNICK, L.H. & BORDEN, F.Y. The occurrence of aluminum phosphate precipitate in plant roots. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 38: 931-934. 1974.
59. MEDAPPA, K.C. & DANA, M.N. Tolerance of cranberry plants to manganese, iron and aluminum. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 95: 107-110. 1970.
60. MOSQUIM, P.R. Influência do alumínio sobre o crescimento e o metabolismo em plantas de *Stylosanthes humilis* H.B.K. Viçosa, U.F.V., Imprensa Universitária. 1978. 29 p. (Tese de M.S.).

61. MUGWIRA, L.W. Growth and Ca, Mg, K and P uptake by triticales, wheat and rye at four Al levels. J. Plant Nutr., 2: 591-606. 1980.
62. MULLETE, K.J. & HANNON, J.N. Insoluble phosphorus usage by eucalyptus. Plant Soil, 41: 199-205. 1974.
63. NASCIMENTO FILHO, V.F. & LOBÃO, A.O. Detecção de ³²P em amostras de origem animal e vegetal por efeito Cerenkov, cintilação líquida e detector GM. Bol. Cient., BC-048. CENA, Piracicaba, SP. 1977.
64. NOOGLE, J.C. & FRIED, M. A kinetic analysis of phosphorus absorption by excised roots of millet, barley, and alfafa. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 24: 33-35. 1960.
65. OLMOS, J.I.L. & CAMARGO, M.C. Ocorrência de alumínio tóxico nos solos do Brasil, sua caracterização e distribuição. Ciência e Cultura, 28: 171-170. 1976.
66. OTSUKA, K. Aluminum and manganese toxicity in plants. II. Effects of aluminum on growth of barley, wheat, oats, and rye seedlings. J. Sci. Soil Manure, 39: 469-474. 1968a.
67. OTSUKA, K. Aluminum and manganese toxicities for plants. III. Effects of aluminum-ion concentration on growth and phosphorus uptake of grafted tomatoes. J. Sci. Soil Manure, 39: 475-478. 1968b.
68. OTSUKA, K. Aluminum induced iron chlorosis. Aluminum and manganese toxicities for plants. IV. Soil Sci. Plant Nutr., 16: 140. Abstr. 2. 1970.
69. PHILLIPS, J.W.; BAKER, D.E. & CLAGETT, C.O. Kinetic of P absorption by excised roots and leaves of corns hybrids. Agron J., 63: 517-520. 1971.
70. RAGLAND, J.L. & COLEMAN, N.T. Influence of aluminum on phosphorus uptake by snap bean root. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 26: 88-90. 1962.
71. RANDALL, P.J. & VOSE, P.B. Effect of aluminum on uptake e translocation of phosphorus ³²P by perennial ryegrass. Plant Physiol., 38: 403-413. 1963.
72. RASMUSSEM, H.P. The mode of entry and distribution of aluminum in Zea mays: electron microprobe X-ray analysis. Planta, 81: 28-27. 1968.

73. RORISON, I.H. The effect of aluminum on the uptake and incorporation of phosphate by excised sainfoin roots. New Phytol., 64: 23-27. 1965.
74. ROVIRA, A. Plant root exudates. The Bot. Review, 35: 17-34. 1969.
75. RUSSEL, R.S. & BARBER, D.A. The relationship between salt uptake and the absorption of water by intact plants. Annu. Rev. Plant Physiol., 11: 127-140. 1960.
76. SOUZA, M.A. & SOBRINHO, J.S. Cultivares de trigo para Minas Gerais. Inf. Agropec., 9: 20-26. 1983.
77. VALE, F.R. Efeito do alumínio sobre a cinética de absorção de nitrato, amônio e fosfato em milho (Zea mays, L.) e em clone de Eucalipto (Eucalyptus alba). Viçosa, U.F.V., Imprensa Universitária. 1982. 71 p. (Tese de M.S.).
78. VIETS, F.G. Calcium and other polyvalent cation as accelerators of ion accumulation by excised barley roots. Plant Physiol., 19: 466-480. 1944.
79. VILELA, L. & ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética da absorção de fósforo em dois cultivares de soja afetados pela interação alumínio-fósforo. Rev. Bras. Ciên. Solo, 8: 91-96. 1984.
80. WALLIHAN, E.F. The influence of aluminum on the phosphorus nutrition of plants. Amer. J. Bot., 35: 106-112. 1948.
81. WHITE, R.E.; TIFFIN, L.O. & TAYLOR, A.W. The existence of polymeric complexes in dilute solutions of aluminum and orthophosphate. Plant Soil, 45: 521-529. 1976.
82. 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, H.D. et alii (ed.). Ecological aspects of the mineral nutrition of plants. Oxford and Edinburg, Blackwell Scientific Publications. 1969. p. 357-380.
83. WRIGHT, K.E. Effects of phosphorus and lime in reducing aluminum toxicity of acid soils. Plant Physiol., 12: 173-181. 1937.
84. WRIGHT, K.E. Internal precipitation of phosphorus in relation to aluminum toxicity. Plant Physiol., 18: 708-712. 1943.
85. WRIGHT, K.E. & DONAHUE, B.A. Aluminum toxicity studies with radioactive phosphorus. Plant Physiol., 28: 674-680. 1953.

APÊNDICE(S)

APÊNDICE A

ESCOLHA DO MÉTODO DE TRANSFORMAÇÃO PARA CÁLCULO DE K_m E V_{max}

No experimento de cinética de absorção de fosfato, foram comparadas várias transformações para o cálculo de K_m e V_{max} , para a escolha da qual a qual os dados melhor se ajustavam. Foram comparadas as transformações de Eadie-Hofstee (HOFSTEE, 1952), Lineweaver-Burk (LINEWEAVER, 1934), Hanes-Woolf e o método gráfico-matemático (RUIZ^{1/}).

Nas primeiras três transformações, ocorreram grandes variações de K_m e V_{max} entre as repetições e no caso de se retirar o primeiro ponto (Quadro 1A). Tais fatos aparentemente ocorreram, porque estas transformações são baseadas no cálculo do influxo (I), conforme a equação:

$$I = \frac{Q_{tx} - Q_{tx+1}}{Pr},$$

em que:

Q_{tx} = quantidade do íon na solução externa no tempo x;

^{1/} Prof. Hugo Ruiz (UFES) - Comunicação pessoal.

$Q_{tx} + 1$ = quantidade do íon na solução externa no tempo $x + 1$;

Pr = peso fresco do sistema radicular.

Para obter um perfeito ajuste, o influxo tem de decrescer uniformemente de acordo com o tempo. Como o intervalo de tempo entre amostras e os decréscimos do influxo eram pequenos e as plantas das repetições não eram inteiramente uniformes, mesmo após uma cuidadosa seleção, muitas vezes ocorreram as variações no K_m e V_{max} .

Já no método gráfico-matemático, o ajuste é feito, confeccionando-se um gráfico com a concentração do íon na solução externa (C) versus o tempo de exaustão (t), não se realizando, portanto, o cálculo do influxo (I), razão por que as variações de K_m e V_{max} foram menores.

Pelos motivos expostos, optou-se pelo método gráfico-matemático para cálculo de K_m e V_{max} , embora outros autores tenham obtido bons resultados com as transformações de Lineweaver-Burk (VALE, 1982) e Eadie-Hofstee (MACHADO, 1981).

QUADRO 1A. Valores de K_m e V_{max} , Calculados por Diferentes Transformações para o Cultivar 'BH-1146', Pré-Tratado com 0,5 ppm de Alumínio

	Eadie-Hofstee		Eadie-Hofstee, retirando-se um ponto	
	$K_m \frac{1}{\mu M}$	$V_{max} \frac{2}{\mu M g^{-1} h^{-1}}$	$K_m \frac{1}{\mu M}$	$V_{max} \frac{2}{\mu M g^{-1} h^{-1}}$
Rep. 1	5,861	0,522	4,677	0,440
Rep. 2	5,607	0,501	4,871	0,451
Rep. 3	4,428	0,407	2,990	0,327
Média	6,151	0,512	4,882	0,438
	Lineweaver-Burk		Lineweaver-Burk, retirando-se um ponto	
	$K_m \frac{1}{\mu M}$	$V_{max} \frac{2}{\mu M g^{-1} h^{-1}}$	$K_m \frac{1}{\mu M}$	$V_{max} \frac{2}{\mu M g^{-1} h^{-1}}$
Rep. 1	5,017	0,464	4,492	0,423
Rep. 2	6,016	0,519	5,775	0,501
Rep. 3	12,703	0,748	13,566	0,792
Média	9,444	0,660	7,802	0,577
	Hanes Woolf		Hanes Woolf, retirando-se um ponto	
	$K_m \frac{1}{\mu M}$	$V_{max} \frac{2}{\mu M g^{-1} h^{-1}}$	$K_m \frac{1}{\mu M}$	$V_{max} \frac{2}{\mu M g^{-1} h^{-1}}$
Rep. 1	7,178	0,579	4,499	0,430
Rep. 2	6,592	0,546	5,141	0,464
Rep. 3	4,484	0,546	2,774	0,340
Média	5,962	0,513	4,014	0,404
	gráfico-matemático ^{3/}		gráfico-matemático, retirando-se um ponto ^{3/}	
	$K_m \frac{1}{\mu M}$	$V_{max} \frac{2}{\mu M g^{-1} h^{-1}}$	$K_m \frac{1}{\mu M}$	$V_{max} \frac{2}{\mu M g^{-1} h^{-1}}$
Rep. 1	2,793	0,621	2,980	0,675
Rep. 2	2,760	0,593	2,526	0,528
Rep. 3	2,735	0,550	2,508	0,491
Média	2,928	0,639	2,656	0,563

^{1/} μM
^{2/} $\mu M g^{-1} h^{-1}$

^{3/} Prof. Hugo Ruiz (UFES) - Comunicação pessoal.

QUADRO 2A. Equações de Regressão Linear e Potencial Ajustados aos Dados de Absorção, segundo a Transformação gráfico-matemática^{1/}. Média de Três Repetições

Cultivar	Conc. Al ppm	Equações	
		Linear	Potencial
'Anahuac'	0	$C = 20,5655 - 7,1242 t \ (r^2 = 0,991 \ **)$	$C = 61,8714 t^{-3,0648} \ (r^2 = 0,994 \ **)$
	0,5	$C = 19,9700 - 3,8790 t \ (r^2 = 0,999 \ **)$	$C = 252,2815 t^{-2,6665} \ (r^2 = 0,979 \ **)$
'BH-1146'	0	$C = 19,7617 - 14,4353 t \ (r^2 = 0,996 \ **)$	$C = 5,2572 t^{-2,8651} \ (r^2 = 0,952 \ **)$
	0,5	$C = 19,5013 - 8,3704 t \ (r^2 = 0,990 \ **)$	$C = 50,1761 t^{-3,3428} \ (r^2 = 0,993 \ **)$

^{1/} Prof. Hugo Ruiz (UFES) - Comunicação pessoal.

** Significativo a 1% de probabilidade.

APÊNDICE B

QUADRO 1B. Resumo da Análise de Variância dos Dados do Efeito do Alúminio na Produção de Matéria Seca da Parte Aérea e Sistema Radicular dos Cultivares 'Anahuac' e 'BH-1146'

F.V.	G.L.	Quadrados Médios	
		Parte Aérea	Sistema Radicular
Variedade	1	0,5490 NS	0,5251 *
Al/'Anahuac'	1	1,4560 *	0,1180 NS
Al/'BH-1146'	1	0,7264 *	0,2080 NS
Erro	4	0,0938	0,0351
C.V. %		9,43	17,43

NS = Não-significativo.

* = Significativo a 5% de probabilidade.

QUADRO 2B. Resumo da Análise de Variância dos Dados do Efeito do Alumínio na Concentração de N, P, K, Ca e Mg da Parte Aérea dos Cultivares 'Anahuac' e 'BH-1146'

F.V.	G.L.	Quadrados Médios				
		N	P	K	Ca	Mg
Variedade	1	0,3953 *	0,0092 NS	2,1901 *	0,1872 **	0,0532 **
Al/'Anahuac'	1	0,3480 *	0,0075 NS	0,0352 NS	0,0833 **	0,0147 **
Al/'BH-1146'	1	0,3888 *	0,0004 NS	0,0133 NS	0,0133 NS	0,0037 *
Erro	4	0,0454	0,0015	0,1732	0,0019	0,0004
C.V. %		3,46	5,03	10,34	7,09	8,70

NS = Não-significativo.

* = Significativo a 5% de probabilidade.

** = Significativo a 1% de probabilidade.

QUADRO 3B. Resumo da Análise de Variância dos Dados do Efeito do Alumínio na Concentração de Fe, Mn, Zn e Cu da Parte Aérea dos Cultivares 'Anahuac' e 'BH-1146' :

F.V.	G.L.	Quadrados Médios			
		Fe	Mn	Zn	Cu
Variedade	1	140,1670 NS	31.176,0000 **	3.185,5100 **	73,5000 **
Al/'Anahuac'	1	71,2967 NS	1.026,7500 *	2.067,1875 **	0,3333 NS
Al/'BH-1146'	1	41,2552 NS	1.430,0833 *	27,0000 NS	0,5208 NS
Erro	4	68,1196	74,9792	68,1147	1,1822
C.V. %		12,95	6,03	8,51	12,35

NS = Não-significativo.

* = Significativo a 5% de probabilidade.

** = Significativo a 1% de probabilidade.

QUADRO 4B. Resumo da Análise de Variância dos Dados do Efeito do Alumínio na Concentração de N, P, K, Ca e Mg do Sistema Radicular dos Cultivares 'Anahuac' e 'BH-1146'

F.V.	G.L.	Quadrados Médios				
		N	P	K	Ca	Mg
Variedade	1	0,73851 *	0,00020 NS	4,12510 **	0,00807 **	0,02734 **
Al/'Anahuac'	1	0,06750 NS	0,02431 **	0,00333 NS	0,00403 *	0,00021 NS
Al/'BH-1146'	1	0,03741 NS	0,00141 NS	0,15832 NS	0,00270 NS	0,00270 **
Erro	4	0,07357	0,00034	0,02111	0,00037	0,00005
C.V. %		7,60	9,41	9,50	11,56	6,00

NS = Não-significativo.

* = Significativo a 5% de probabilidade.

** = Significativo a 1% de probabilidade.

QUADRO 5B. Resumo da Análise de Variância dos Dados do Efeito do Alumínio na Concentração de Fe, Mn, Zn e Cu do Sistema Radicular dos Cultivares 'Anahuac' e 'BH-1146'

F.V.	G.L.	Quadrados Médios			
		Fe	Mn	Zn	Cu
Variedade	1	5.781,5100 NS	540.000,0000 **	75.264,0000 **	19.722,7000 **
Al/'Anahuac'	1	10.743.0750 *	39.905,3333 **	3.168,7500 *	114,0833 NS
Al/'BH-1146'	1	1.463,0200 NS	341,3333 NS	2.268,7500 *	8,3333 NS
Erro	4	791,7810	845,8335	255,7501	185,6877
C.V. %		6,67	5,11	6,99	13,67

NS = Não-significativo.

* = Significativo a 5% de probabilidade.

** = Significativo a 1% de probabilidade.