

GENÉTICA DA TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO EM MILHO CATETO (1)

EDUARDO SAWAZAKI (2, 4) e PEDRO ROBERTO FURLANI (3, 4)

RESUMO

Tem-se observado alta tolerância ao alumínio em milho Cateto. Devido à importância dessa característica nos híbridos comerciais e à divergência das informações disponíveis sobre a herança desse caráter, estudou-se a genética da tolerância ao alumínio nas linhagens Ip 48-5-3 (Cateto) e Col (22) (duro da Colômbia), e gerações F1, F2 e retrocruzamentos. Estes genótipos foram avaliados em solução nutritiva com 4,5 ppm de alumínio, em dois experimentos conduzidos em Campinas, em 1985. A característica de raiz mais adequada para o estudo foi o crescimento líquido da radícula (CLR). A distribuição de frequência da geração F2 foi contínua e unimodal, apresentando apenas classes do F1 e do pai tolerante. Deve-se a alta tolerância ao alumínio da linhagem Ip 48-5-3, principalmente, à ação de genes menores, de efeitos genéticos aditivos. A herdabilidade no sentido amplo e restrito foi alta, indicando que a seleção de genótipos tolerantes na geração F2 é eficiente.

Termos de indexação: milho Cateto, genética; alumínio, tolerância.

(1) Trabalho apresentado no XVI Congresso Nacional de Milho e Sorgo, realizado em Belo Horizonte (MG), de 4 a 8 de agosto de 1986. Recebido para publicação em 9 de outubro de 1986.

(2) Seção de Milho e Cereais Diversos, Instituto Agrônomo (IAC), Caixa Postal 28, 13001 Campinas (SP).

(3) Seção de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, IAC.

(4) Com bolsa de suplementação do CNPq.

1. INTRODUÇÃO

O milho Cateto é a única raça brasileira extensivamente utilizada em programas locais de milho híbrido, pela exibição de alta heterose em cruzamentos com outras raças (PATERNIANI & GOODMAN, 1977), e por conferir estabilidade de produção e rusticidade aos seus híbridos. Genes de tolerância ao calor e ao alumínio foram constatados em linhagens de milho Cateto (MIRANDA et al., 1984a, b). Avaliando 98 materiais comerciais, FURLANI et al. (1986) relataram que todos os cultivares foram menos tolerantes que um híbrido simples de Cateto utilizado como testemunha.

Os sintomas de toxicidade de alumínio em plantas de milho se manifestam nas folhas e raízes. Nas folhas, assemelham-se à deficiência de fósforo ou cálcio e, nas raízes, ocorrem crescimento reduzido, engrossamento, poucas ramificações e ineficiência na absorção de nutrientes e água (FOY et al., 1978).

A presença de alumínio no solo em níveis tóxicos para as culturas é comum em grande extensão das áreas agrícolas brasileiras. A correção do solo na camada superficial, aliada ao uso de cultivares tolerantes, oferece uma solução satisfatória e econômica ao problema (BAHIA FILHO et al., 1978).

A existência de variabilidade genética no milho para tolerância ao alumínio foi constatada por LUTZ et al. (1971); RHUE & GROGAN (1977); GALVÃO & SILVA (1978); BAHIA FILHO et al. (1978); GARCIA JÚNIOR et al. (1979); MAGNAVACA (1982), e FURLANI et al. (1986).

A herança dessa característica foi estudada por diversos autores, empregando diferentes técnicas de avaliação e germoplasmas, com resultados divergentes. Segundo RHUE et al. (1978) e GARCIA JÚNIOR & SILVA (1979), a tolerância ao alumínio é condicionada por um par de genes dominantes; MAGNAVACA (1982) encontrou mais evidência de uma herança quantitativa com tendência de a suscetibilidade ser dominante sobre a tolerância; finalmente, MIRANDA et al. (1984a) relataram que a tolerância é condicionada por dois pares de genes dominantes complementares. Quanto ao tipo de ação gênica envolvida, MAGNAVACA (1982) relata que, em cruzamentos de linhagens tolerantes com suscetíveis, a maior parte da variação genética foi aditiva, enquanto os efeitos de dominância foram menores e significativos, e os efeitos epistáticos foram significativos apenas em alguns cruzamentos. Em cruzamentos de linhagens não tolerantes, os efeitos genéticos de dominância representaram a maior parte da variação genética, seguidos pelos efeitos epistáticos e aditivos.

Esses resultados deixam dúvidas quanto ao número de genes e o tipo de ação genética envolvida na tolerância ao alumínio em milho. O objetivo deste trabalho é obter informações sobre a genética da tolerância ao alumínio em uma linhagem de milho Cateto de alta tolerância.

2. MATERIAL E MÉTODO

Para o estudo genético da tolerância ao alumínio, utilizaram-se as linhagens Ip 48-5-3, originária da variedade de milho Cateto Assis Brasil (MIRANDA et al., 1977) e Col 2(22), obtida de milho duro branco da Colômbia, à qual foi transferida a cor amarela (MIRANDA et al., 1978), mais as respectivas gerações F1, F2 e retrocruzamentos, que foram avaliados em dois experimentos quanto à tolerância ao alumínio.

O grau de tolerância do material desses ensaios foi avaliado pelo método de solução nutritiva com 4,5 ppm de alumínio. Utilizaram-se dois experimentos em diferentes épocas, os quais foram conduzidos por dez dias em casa de vegetação, sem controle de luz e temperatura, com procedimento semelhante aos utilizados por FURLANI et al. (1986). Anotaram-se as seguintes características: crescimento inicial (CIR) e crescimento final da radícula (CFR), e, a partir desses dados, calculou-se o crescimento líquido (CLR = CFR - CIR) e o crescimento relativo da radícula (CRR = CFR/CIR).

Nos experimentos 1 e 2, inicialmente, obteve-se a correlação linear simples (r) entre as características CIR, CFR, CLR e CRR. Para cada experimento, calcularam-se as médias e variâncias do CLR dos genótipos na escala original e logarítmica.

O teste de escala e de escala conjunta (MATTER & JINKS, 1971) foram utilizados para testar a adequação dos dados para o modelo aditivo dominante. A natureza da ação gênica envolvida na tolerância ao alumínio foi estudada através do método de JINKS & JONES (1958). Os parâmetros estimados foram: média (\bar{m}), efeitos genéticos aditivos (\hat{a}), efeitos genéticos dominantes (\hat{d}) e efeitos genéticos epistáticos dos tipos: aditivo x aditivo (\hat{aa}), aditivo x dominante (\hat{ad}) e dominante x dominante (\hat{dd}). A herdabilidade no sentido amplo foi obtida pela fórmula de PETR & FREY (1966) e, no sentido restrito, pela de WARNER (1952). O grau de dominância foi obtido pelo método "potence ratio" de PETR & FREY (1966).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As linhagens Ip 48-5-3 e Col 2(22) foram escolhidas para o estudo de herança da tolerância ao alumínio pela grande diversidade entre ambas e pela importância dos seus genótipos no melhoramento. As médias das características de raiz, anotadas nos experimentos 1 e 2, encontram-se no quadro 1. Entre essas características, obteve-se o coeficiente de correlação linear simples, cujos valores se acham no quadro 2. Os dados de correlação mostram que o crescimento líquido da radícula (CLR) foi o menos afetado pelo crescimento inicial (CIR) e o mais correlacionado com o crescimento final (CFR) obtido em solução nutritiva com alumínio. Considerou-se o CLR como a mais eficiente característica para discriminar os genótipos de milho quanto ao grau de tolerância.

QUADRO 1. Médias do crescimento inicial (CIR), crescimento final (CFR), crescimento líquido (CLR) e crescimento relativo (CRR) da radícula de plantas das linhagens de milho Ip 48-5-3 e Col 2(22), das gerações F1, F2 e retrocruzamentos, em solução nutritiva com 4,5 ppm de alumínio. Campinas, 1985

Gerações	Experimento 1				Experimento 2			
	CIR	CFR	CLR	CRR	CIR	CFR	CLR	CRR
	cm				cm			
Ip 48-5-3	3,84	27,91	24,07	7,55	4,96	21,99	17,04	4,59
Col 2(22)	3,07	5,45	2,38	1,80	3,37	5,44	2,07	1,67
F1	7,03	18,88	11,85	2,77	10,03	17,96	7,93	1,82
F2	6,45	25,72	19,27	4,13	8,93	19,60	10,75	2,24
Rc _{Ip 48-5-3}	6,77	28,74	21,97	4,40	8,87	22,51	13,65	2,63
Rc _{Col 2(22)}	4,84	10,10	5,26	2,13	6,68	10,39	3,71	1,58

Nos quadros 3 e 4 encontram-se as médias, variâncias e distribuição dos dados de CLR, respectivamente, dos experimentos 1 e 2. O F1 teve um comportamento intermediário em relação aos pais, e a distribuição da geração F2 foi contínua e unimodal com assimetria negativa, apresentando apenas classes do F1 e do pai tolerante. As médias do crescimento líquido da radícula dos genótipos diferiram entre os experimentos 1 e 2, devido à variação das condições ambientais, uma vez que foram conduzidos em épocas diferentes.

Os resultados dos teste de escala e escala conjunta – Quadros 5 e 6 – respectivamente, mostram que as médias dos genótipos dos dados de CLR na escala original se ajustam ao modelo aditivo dominante, e não há evidência de interação alélica entre os genes que condicionam a tolerância ao alumínio. As estimativas dos parâmetros genéticos aditivos (\hat{a}) e de dominância (d), obtidas no teste de escala conjunta, indicam que os efeitos aditivos correspondem à maior parte da variação genética.

O grau de dominância foi próximo de zero, respectivamente de $-0,13$ e $-0,22$ nos experimentos 1 e 2, indicando uma tendência de a suscetibilidade ao alumínio ser parcialmente dominante sobre a tolerância.

QUADRO 2. Valores da correlação linear simples entre as características de crescimento inicial (CIR), crescimento final (CFR), crescimento líquido (CLR) e crescimento relativo da radícula (CRR)

Tratamento	Experimento 1				Experimento 2			
	N	CIR	CFR	CLR	N	CIR	CFR	CLR
Ip 48-5-3	60	CFR	0,55**		36	-0,17		
		CLR	0,34**	0,97**		-0,51**	0,93**	
		CRR	-0,78**	0,06		0,28*	-0,87**	0,59**
Col 2(22)	60	CFR	0,42**		35	0,87**		
		CLR	-0,02	0,71**		-0,60**	-0,12	
		CRR	-0,64**	0,10		0,75**	-0,88**	-0,57**
F1	60	CFR	0,43**		72	0,73**		
		CLR	-0,01	0,90**		0,12	0,77**	
		CRR	-0,61**	0,40**		0,75**	-0,62**	-0,02
F2	150	CFR	0,05		107	0,29**		
		CLR	-0,13	0,99**		-0,05	0,92**	
		CRR	-0,43**	0,59**		0,66**	-0,45**	0,69**
Rc _{Ip 48-5-3}	148	CFR	0,08		97	0,14		
		CLR	-0,12	0,98**		-0,21*	0,92**	
		CRR	-0,60**	0,72**		0,84**	-0,63**	0,64**
Rc _{Col 2(22)}	149	CFR	0,36**		118	0,70**		
		CLR	-0,10	0,91**		-0,19*	0,56**	
		CRR	-0,47**	0,50**		0,89**	-0,60**	0,11

*, ** = Significativos, respectivamente, a 5 e 1% pelo teste t

A distribuição de freqüência observada na geração F2 nos dois experimentos não é típica de genes de efeitos aditivos, evidenciando a presença de genes dominantes ou interação alélica. Considerando o modelo com interação alélica, estimaram-se os parâmetros genéticos pelo método de JINKS & JONES (1958), cujos resultados se encontram no quadro 7. Apenas os efeitos genéticos aditivos foram significativos, confirmando o resultado do teste de escala conjunta. Em um trabalho semelhante, MAGNAVACA (1982) constatou que os efeitos de dominância foram menores e significativas e, a epistasia, significativa em alguns cruzamentos. O comportamento da geração F2 pode ser devido à presença de gene(s) dominante(s) e interação alélica, cujos efeitos foram não-significativos.

QUADRO 3. Médias, variâncias, número de plantas e sua distribuição em classes de crescimento líquido da radícula (CLR) em populações parentais e segregantes de milho, em solução nutritiva com 4,5 ppm de alumínio, no experimento 1

População	Classes (1)														Médias (2)		Variâncias		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	N (2)	X	log X	X	log X
Ip 48-5-3						3	6	20	22	7	2				60	24,07	1,377	10,37	0,00372
Col 2(22)	53	7													60	2,38	0,365	0,32	0,01098
F1			8	30	12	5	5								60	11,85	1,059	9,78	0,01286
F2			10	17	23	20	18	18	18	15	7	2	2		150	19,27	1,251	52,27	0,03120
RcIp 48-5-3			2	11	14	16	18	26	29	16	10	4	1	1	148	21,97	1,319	43,59	0,02220
RcCol 2(22)	10	102	31	3	3										149	5,26	0,697	3,77	0,02050

(1) As classes referem-se a intervalos progressivos de 3 cm de crescimento da radícula (exemplo: 1 = 0 a 3, 2 = 3 a 6, ...). (2) N = número de plantas. (3) Crescimento líquido da radícula em centímetro.

QUADRO 4. Médias, variâncias, número de plantas e sua distribuição em classes de crescimento líquido da radícula (CLR) em populações parentais e segregantes de milho, em solução nutritiva com 4,5 ppm de alumínio, no experimento 2

População	Classes (1)													N (2)	Médias (3)			Variâncias		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		X	log X	X	log X	X	log X
Ip 48-5-3							5	6	10	11	3	1		36	17,04	1,227	6,093	0,0042		
Col 2(22)	16	19												35	2,07	0,308	0,163	0,0070		
F1			9	33	19	8	2	1						72	7,93	0,886	4,180	0,0120		
F2			7	22	29	13	13	12	4	7				107	10,75	1,003	16,282	0,0252		
R _{Clp} 48-5-3			5	12	8	9	14	16	16	6	8	1	2	97	13,65	1,103	24,204	0,0312		
R _{Col} 2(22)	2	79	32	5										118	3,71	0,550	1,269	0,0141		

(1) As classes referem-se a intervalos progressivos de 2 cm de crescimento líquido da radícula (exemplo: 1 = 0 a 2, 2 = 2 a 4, ...). (2) N = número de plantas. (3) Crescimento líquido da radícula em centímetro.

QUADRO 5. Valores de A, B e C do teste de escala para as médias do crescimento líquido da radícula (CLR) dos experimentos 1 e 2

Experimento	A	B	C
cm			
1	8,020 ± 13,946	-3,710 ± 5,020	26,930 ± 29,770
2	2,930 ± 10,348	-2,580 ± 3,069	8,030 ± 16,837

QUADRO 6. Estimativas dos parâmetros \hat{m} , \hat{a} e \hat{d} do teste de escala conjunta para as médias do crescimento líquido da radícula (CLR) dos experimentos 1 e 2

Experimento	\hat{m}	\hat{a}	\hat{d}	χ^2	lp (1)
cm					
1	13,608 ± 1,584	11,279 ± 1,582	-2,532 ± 2,954	1,97	> 0,20
2	9,732 ± 1,203	7,708 ± 1,203	-2,711 ± 1,987	1,18	> 0,20

(1) lp = Limite de probabilidade de χ^2 .

QUADRO 7. Estimativas dos parâmetros genéticos \hat{m} , \hat{a} , \hat{d} , \hat{aa} , \hat{ad} e \hat{dd} , pelo método de JINKS & JONES (1958), para o crescimento líquido da radícula (CLR), em solução nutritiva com 4,5 ppm de alumínio, nos experimentos 1 e 2

Parâmetros	Experimento 1		Experimento 2	
cm				
\hat{m}	35,85	± 32,07	17,84	± 19,08
\hat{a}	10,85**	± 1,64	7,49**	± 1,25
\hat{d}	-42,31	± 71,30	-18,44	± 44,47
\hat{aa}	-22,62	± 32,03	-8,28	± 19,07
\hat{ad}	11,73	± 14,15	4,91	± 10,40
\hat{dd}	18,31	± 40,55	8,53	± 26,29

** = Significativamente diferente de zero para o nível de 0,01%.

As estimativas de herdabilidade no sentido amplo foram altas nos dois experimentos, em torno de 79%, enquanto no sentido restrito foram de 63 e 16%, respectivamente, nos experimentos 1 e 2. Estes valores evidenciam amplas possibilidades de seleção de genótipos tolerantes na geração F2 e o melhoramento por seleção recorrente.

Com relação às informações encontradas em literatura, esses resultados concordam com os dados de MAGNAVACA (1982) e deixam dúvidas quanto à existência de um gene maior dominante, relatado por RHUE et al. (1978) e GARCIA JÚNIOR & SILVA (1979). Entretanto, não permitem concordar com a hipótese de a herança da tolerância em linhagem de milho Cateto ser devida a dois genes dominantes complementares (MIRANDA et al., 1984a). A alta tolerância ao alumínio da linhagem de milho cateto lp 48-5-3 é condicionada principalmente por genes de efeitos aditivos: eles se concentram provavelmente na variedade de origem, em vista de o cultivo desse milho ter sido feito pelos indígenas e antigos agricultores, em áreas de solo com alto teor de alumínio.

SUMMARY

GENETICS OF ALUMINUM TOLERANCE IN MAIZE CATETO

Maize Cateto inbred line has shown high aluminum tolerance. Due to the importance of this trait in commercial hybrids as well as the lack of consistent informations about the inheritance mechanism involved, the genetics of aluminum tolerance in one maize Cateto inbred line was studied. The inbred lines lp 48-5-3 (Cateto), Col 2(22) (flint from Colombia) and the F1, F2 and backcrosses generations were used. Two replicated experiments were carried out at Campinas, State of São Paulo, Brazil, in 1985, to evaluate these genotypes grown in nutrient solutions containing 4.5 ppm of Al. Radicle net growth (CLR) was the most adequate measurement to distinguish maize genotypes for Al tolerance. The F2 frequency distribution was continuous, unimodal and yielded only classes resembling those of the F1 and the tolerant parent. The high Al tolerance of the maize inbred line lp 48-5-3 was due to the action of additive minor genes. Both broad and narrow sense heritabilities were high, indicating that plant selection in F2 generation for Al tolerance is efficient.

Index terms: maize Cateto, genetics, aluminum, tolerance.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAHIA FILHO, A.F.C.; FRANÇA, G.E.; PITTA, G.V.E.; MAGNAVACA, R.; MENDES, J.F.; BAHIA F.G.T.C. & PEREIRA, P. Avaliação de linhagens e populações de milho em condições de elevada acidez. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MILHO E SORGO, 11, Piracicaba, editado por E. Paterniani. Anais. Piracicaba, ESALQ, Departamento de Genética, 1978. p.51-58.

- FOY, C.D.; CHANEY, R.L. & WITHE, C. The physiology of metal toxicity in plants. *Annual Review Plant Physiology, Palo Alto*, **29**:511-566, 1978.
- FURLANI, P.R.; LIMA, M.; MIRANDA, L.T. de; MIRANDA, L.E.C. de; SAWAZAKI, E. & MAGNAVACA, R. Avaliação de linhagens, materiais comerciais e duas populações de milho para tolerância ao alumínio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília*, **21**(6):655-660, 1986.
- GALVÃO, J.D. & SILVA, J.C. Herança da tolerância ao alumínio na variedade de milho Piranão. *Revista Ceres, Viçosa*, **25**(137):71-78, 1978.
- GARCIA JÚNIOR, O. & SILVA, W.J. Análise genética da tolerância ao alumínio em milho. *Ciência e Cultura, São Paulo*, **31**:585, 1979. (Resumo)
- ; ——— & MASSEI, M.A.S. An efficient method for screening maize inbreds for aluminum tolerance. *Maydica, Bergamo*, **24**:75-82, 1979.
- JINKS, J.L. & JONES, R.M. Estimation of the components of heterosis. *Genetics*, **43**:223-239, 1958.
- LUTZ, J.A.; HAWKIN, G.W. & GENTER, C.F. Differential response of corn inbreds and single crosses to certain properties of an acid soil. *Agronomy Journal*, **63**:803-805, 1971.
- MAGNAVACA, R. Genetic variability and the inheritance of aluminum tolerance in maize (*Zea mays* L.). Lincoln, University of Nebraska, 1982. 135p. Tese (Ph.D.)
- MATHER, K. & JINKS, J.L. Biometrical genetics. The study of continuous variation. 2.ed. London, Chapman and Hall, 1971. 382p.
- MIRANDA, L.T. de; FURLANI, P.R.; MIRANDA, L.E.C. de & SAWAZAKI, E. Genetics of environmental resistance and super genes: latente aluminum tolerance. *Maize Genetics Cooperation News Letter, Columbia*, **58**:46-48, 1984a.
- ; MIRANDA, L.E.C. de; POMMER, C.V. & SAWAZAKI, E. Oito ciclos de seleção entre e dentro de famílias de meios-irmãos no milho IAC-1. *Bragantia, Campinas*, **36**(18):187-196, 1977.
- ; ———; ——— & ———. Melhoramento de cultivar de milho IAC-1. *Bragantia, Campinas*, **37**(18):64-70, 1978.
- ; ——— & SAWAZAKI, E. Genética ecológica e melhoramento do milho. *Campinas, Fundação Cargill*, 1984b. 30p.
- PATERNIANI, E. & GOODMAN, M.M. Races of maize in Brasil and adjacent areas. México, CIMMYT, 1977. 95p.
- PETR, F.C. & FREY, K.J. Genotypic correlations, dominance and heritability of quantitative characters in oats. *Crop Science*, **6**:259-262, 1966.
- RHUE, R.D. & GROGAN, C.O. Screening corn for aluminum tolerance using different Ca and Mg concentration. *Agronomy Journal*, **69**:755-760, 1977.
- ; ———; STOCKMEYER, E.W. & EVERETT, H.L. Genetic control of aluminum tolerance in corn. *Crop Science*, **18**:1063-1067, 1978.
- WARNER, J.N. A method for estimating heritability. *Agronomy Journal*, **44**:427-430, 1952.