

## SELEÇÃO DE MILHO PARA TOLERÂNCIA A ALUMÍNIO

*Ricardo Magnavaca e Antônio F.C. Bahia Filho<sup>1</sup>*

### RESUMO

Solos ácidos são freqüentes em áreas tropicais do mundo. Os solos que mais atingem a adaptação de plantas nessas regiões são os Oxisolos, que ocupam 8,11% das terras do planeta. São solos muito intemperizados e têm baixa capacidade de troca de cátions. É comum apresentarem deficiências de Ca e Mg, presença de alumínio trocável e possibilidade de fixação de fosfatos em minerais como sesquióxidos. Uma alta saturação de alumínio no solo é tóxico para o desenvolvimento de plantas. Alumínio afeta muitos processos fisiológicos, bioquímicos e metabólicos da planta e pode causar injúrias às raízes. Metodologias de solução nutritiva e teste no campo têm sido desenvolvidas para uso em melhoramento. Já foi detectada variabilidade para tolerância a alumínio em milho e tolerância é um caráter de herança quantitativa, embora evidências de genes maiores tenham sido relatadas. Híbridos e variedades melhoradas para tolerância a alumínio têm sido desenvolvidos e a tolerância tem sido adicionada a genótipos de alta produtividade e estáveis. Estuda-se também a associação de tolerância a alumínio com eficiência de fósforo em solos ácidos.

---

<sup>1</sup> Pesquisadores do CNPMS/EMBRAPA, Caixa Postal 151, 35701-970 Sete Lagoas, MG, Brasil.

## SELECTION FOR ALUMINIUM TOLERANCE IN MAIZE

*Ricardo Magnavaca e Antônio F.C. Bahia Filho<sup>1</sup>*

### ABSTRACT

Acid soils are frequent in the tropical areas of the world. Oxisols which show major mineral stress constraints in those areas, occupy 8.11% of the world's land area. They are strongly weathered soils and have low cation exchange capacity. Deficiency of cations like Ca and Mg are common, with the presence of exchangeable Al and possibility of fixation of P on sesquioxide minerals. A high percentage of Al saturation in soils is toxic to plant growth. Aluminium affects many physiological, biochemical and metabolic processes in plants and cause roots injury. Nutrient solution and field test methods have been developed for breeding purpose. Variability for aluminium tolerance was detected in maize and tolerance is a quantitatively inherited trait although evidences of a major gene has been reported. Aluminium tolerant hybrids and varieties were developed and Al tolerance was added to high yielding and stable genotypes. Association of Al tolerance with P efficiency in acid soils has also been studied.

---

<sup>1</sup> Pesquisadores do CNPMS/EMBRAPA, Caixa Postal 151, 35701-970 Sete Lagoas, MG, Brasil.

## INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da cultura do milho em solos ácidos, do Brasil, principalmente nos solos sob vegetação de cerrado, trouxe a necessidade de se desenvolver cultivares que permitam produtividade e estabilidade de produção compatíveis com uma exploração econômica e de menores riscos para os agricultores. No Brasil, 1,8 milhão de km<sup>2</sup> é de cerrado, que, entre outras características, contém alta concentração de alumínio no solo. Este alumínio é tóxico para as plantas e afeta muitos processos fisiológicos, bioquímicos e metabólicos nas plantas. Raízes de milho danificadas pelo alumínio tóxico são curtas, grossas e chegam a mostrar extremidades escurecidas.

O Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo, da EMBRAPA, tem desenvolvido um programa de melhoramento de milho para solos ácidos, a partir de 1975, cujas etapas do desenvolvimento e resultados alcançados serão relatados a seguir.

### Desenvolvimento de metodologias

#### a) Seleção em condições de campo

Na avaliação em campo, considerou-se o nível de saturação de Al em relação a CTC efetiva (m).

Assim:

$$m = \frac{\text{Al}}{\text{Al} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K}}$$

sendo  $\text{Al} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} = \text{CTC}$  efetiva. Tendo o Al quanto Ca e Mg são extraídos por KCl 1 N.

A saturação de Al de 45 a 50% é um nível que permite a separação de material tolerante do não tolerante, sem impor um estresse demasiado severo, que normalmente não discrimina os materiais.

Para obter-se a saturação desejada, normalmente utilizam-se curvas de incubação em laboratório, com quantidades crescentes de CaCO<sub>3</sub> suficientes para neutralizar 0,5; 1,0; 2,0 e 2,5 vezes o Al trocável extraído por KCl. São ajustadas equações de regressão entre saturação de

Al e níveis de correção do Al trocável. Determina-se, assim, a quantidade de corretivo necessária para obter-se o nível de saturação desejado.

As avaliações foram conduzidas em um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico fase cerrado (Tabela 1), fortemente ácido e com baixa disponibilidade de fósforo.

**TABELA 1.** Resultados da análise química de amostras de solo de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico, fase cerrado, em duas profundidades e três níveis de calcário.

Cal- cário (t/ha)	Profun- didade (cm)	pH (H <sub>2</sub> O)	Al <sup>1</sup>	Ca	Mg	K	P	Sat.Al
0	0-20	4,3	2,0	0,75	0,07	0,10	2	68
	20-40	4,3	1,75	0,48	0,10	0,09	1	72
2	0-20	4,9	1,05	1,90	0,20	0,10	2	32
	20-40	4,6	1,45	1,00	0,17	0,10	1	53
7	0-20	5,1	0,40	3,50	0,35	0,10	2	9
	20-40	4,7	0,98	1,68	0,33	0,09	1	32

<sup>1</sup>Al, Ca, Mg - Extrator KCl 1N relação solo: solução 1:10

K, P Extrator HCl 0,05N + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025N relação solo: solução 1:10

No primeiro ano de avaliação, utilizou-se uma adubação corretiva de 100 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 60 kg/ha de K<sub>2</sub>O e 5 kg/ha de Zn.

Nos anos subseqüentes, a adubação incluía a aplicação de 20-60-40 de N,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O e 40 kg/ha N em cobertura.

A avaliação em campo apresentou inúmeras dificuldades relativas à variação de microssítios de fertilidade, de ocorrência natural ou mesmo pelo acúmulo em áreas onde havia morte de plantas. As avaliações de plantas jovens em condição de estresse de água foram instrumento efetivo de separação de material tolerante e não tolerante.

Por outro lado, análises de parcelas foram utilizadas como instrumento auxiliar para interpretação dos resultados.

Quanto ao aspecto das deficiências minerais, foram comuns as deficiências de P, Zn e, principalmente, Mg.

### **b) Seleção em solução nutritiva para tolerância a alumínio.**

A solução nutritiva e a técnica para o crescimento das plantas foram descritas por Furlani & Clark (1981) e Magnavaca (1982). Na Tabela 2, são mostrados os reagentes e concentrações da solução nutritiva.

Adicionam-se, ainda, 222 mol Al litro<sup>-1</sup> à fórmula  $KAl(SO_4)_2$ . O pH é ajustado inicialmente para 4,0 + 0,1, e não são feitos ajustes de pH até a colheita.

As sementes são tratadas com o fungicida Captan, enroladas em papel-toalha umedecido, para germinação, e mantidas em ambiente umedecido com água aerada. Após sete dias, as plântulas mais uniformes e sem classificação nas raízes são transferidas para uma placa de plástico opaco perfurado e colocadas em uma bandeja com oito litros da solução tratamento (49 plantas por bandeja). Adiciona-se água diariamente, para que o volume da solução seja mantido. Os experimentos podem ser montados em casa de vegetação, sem iluminação artificial, com temperatura variando de 25 a 35°C.

Quando as plântulas são transferidas para a solução-tratamento, mede-se o comprimento inicial da raiz seminal. As plantas desenvolvem-se por oito dias na solução nutritiva, medindo-se, então, o comprimento final da raiz seminal. O comprimento relativo da raiz seminal (CRRS) é obtido pela divisão do comprimento final da raiz seminal pelo inicial e transformado em percentagem em relação ao crescimento inicial. Magnavaca (1982) comparou vários parâmetros para avaliar tolerância a alumínio e recomendou CRRS como o melhor, principalmente quando se avaliam linhagens endogâmicas. Este parâmetro é o único que considera diferenças de vigor de plântula entre os genótipos testados e apresenta os menores coeficientes de variação para os ensaios.

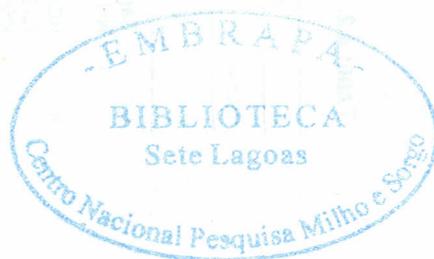


TABELA 2. Composição de solução nutritiva para crescimento de milho.

Solução estoque			Solução nutritiva para teste						
Nome	Químicos	Concentração	ml estoque litro <sup>-1</sup>	Cátion		Ânion		Composição total	
		g litro <sup>-1</sup>		-----mg elemento litro <sup>-1</sup> -----				elemento mg litro <sup>-1</sup>	M
Ca	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	270	3.08	Ca = 141.1 NH <sub>4</sub> -N = 18.2	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N = 98.6 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N = 18.2	Ca	141,1	3,27	
	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	33,8				K	90,1	2,310	
K	KCl	18,6	2.31	K = 22.5 K = 45.6 K = 22.0	Cl = 20.4 SO <sub>4</sub> -S = 18.7 NO <sub>3</sub> -N = 7.9	Mg	20,8	855	
	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	44,0				NO <sub>3</sub> -N	152,0	10,857	
	KNO <sub>3</sub>	24,6				NH <sub>4</sub> -N	18,2	1,300	
Mg	Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	142,4	1.54	Mg = 20.8	NO <sub>3</sub> -N = 24.0	P	1,4	45	
						S	18,8	587	
P	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	17,6	0.35	K = 1.7	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> = 1.4	B	0,27	25	
						C1	21,05	595	
Fe*	Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> · 9H <sub>2</sub> O	20,3	1.54	Fe = 4.3	NO <sub>3</sub> -N = 3.3 HEDTA=20.6	Fe	4,3	77	
	HEDTA	13,4				Mn	0,50	9,1	
Micro	MnCl <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	2,34	0.77	Mn = 0.50	Cl = 0.65 BO <sub>3</sub> -E = 0.27 SO <sub>4</sub> -S = 0.07 SO <sub>4</sub> -S = 0.02 MoO <sub>4</sub> -Mo = 0.08	Cu	0,04	0,63	
	H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub>	2,04				Mo	0,08	0,83	
	ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	0,88				Zn	0,15	2,29	
	CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	0,20				Cu	0,04		
	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	0,26				Na	0,04	1,74	
					HEDTA	20,06	75		

\* FeHEDTA (Fe hidroxietileno-diaminotriacetato) é preparado dissolvendo o HEDTA em água mais a adição de NaOH 1N. Depois de dissolvido, adiciona-se Fe (NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> à solução e dissolve-se, mexendo com estilete. O pH é ajustado para 4.0±0.2 por adições pequenas de NaOH 1N e depois completa-se o volume.

A técnica de solução nutritiva é exclusiva para a tolerância ao alumínio. Ela deve ser utilizada como auxiliar à avaliação de campo, tanto em solo fértil como em solos ácidos. Quando se avalia em solo fértil, pode-se detectar o potencial produtivo dos genótipos. Em solos ácidos, avalia-se para adaptação a essas condições e não necessariamente só para alumínio. A associação de resultados nessas três condições permite uma melhor previsão na avaliação.

### Identificação de fontes de tolerância a alumínio e variabilidade disponível

#### a) Identificação de linhagens tolerantes

Durante o ano agrícola de 1975/76, foram avaliadas 363 linhagens de milho da coleção do CNPMS, em solos com 55% de saturação de alumínio. Foram realizadas observações fenológicas durante três fases da cultura (15 e 60 dias após a germinação e na colheita). Nas observações de desenvolvimento vegetativo, utilizou-se escala de notas de 1 a 5, sendo 1 péssimo e 5 excelente (Bahia Filho et al., 1976).

A distribuição percentual de linhagens nas classes estabelecidas, nas duas primeiras avaliações, encontra-se na Tabela 3.

**TABELA 3.** Avaliação de desenvolvimento vegetativo de 363 linhagens de milho aos 15 e 60 dias após a germinação, em solo de cerrado com 55% de saturação de alumínio. CNPMS, 1975/76.

Classes	Distribuição (%)	
	15 dias	60 dias
Morta	19,3	68,7
1	35,5	7,0
2	30,0	12,2
3	10,7	8,4
4	3,6	3,6
5	0,7	0,0

Fonte: Bahia et al. (1976).

Já na primeira avaliação, podia-se identificar os materiais com maior tolerância, embora a distribuição em classes ficasse mais clara na

segunda observação. Foi possível selecionar 30 linhagens que obtiveram notas entre 4 e 5, apesar de quase 70% das linhagens terem morrido com 60 dias.

Este grupo de linhagens foi avaliado em solos ácidos, em três níveis de saturação de alumínio, em 1976/77 (Naspolini et al., 1981).

Três dessas linhagens selecionadas por seu tipo de resposta são encontradas na Tabela 4, para produção de grãos.

**TABELA 4.** Produção, em kg/ha, de linhagens de milho selecionadas em três níveis de calagem (0, 2, 7 t/ha) em solos ácidos. Sete Lagoas 1976/77.

Linhagem	Calcário (t/ha)		
	0	2	7
L 297	1.900	2.500	3.575
L 69	1.500	1.538	1.413
L 153	2.663	3.250	3.188

Adaptado de Naspolini et al. (1981).

As mesmas três linhagens foram posteriormente avaliadas por Magnavaca (1982), para tolerância a alumínio em solução nutritiva conforme é mostrado na Tabela 5.

**TABELA 5.** Comprimento relativo de raiz seminal (CRRS) de linhagens de milho avaliadas em solução nutritiva com diferentes níveis de alumínio.

Linhagens	Níveis de alumínio ( mol litro <sup>-1</sup> )			
	0	74	148	222
L 297	3,82	3,75	2,23	1,87
L 69	2,45	2,33	1,99	2,25
L 153	2,98	3,04	2,36	2,11

Adaptado de Magnavaca et al. (1982)

Verifica-se, comparando os dados das Tabelas 4 e 5, que as respostas em solos ácidos e solução nutritiva foram muito semelhantes.

A L 69 mostrou-se estável através dos níveis de Al nos dois ambientes, a L 297 foi a mais afetada por Al e a L 153 apresentou uma resposta intermediária.

Este grupo de linhagens brasileiras foi comparados com linhagens americanas, em solução nutritiva com diversos níveis de alumínio (Magnavaca et al., 1987), conforme dados da Tabela 6.

**TABELA 6.** Crescimento relativo de raiz seminal (CRRS) de linhagens de milho desenvolvidas em solução nutritiva com diferentes níveis de alumínio.

Origem	Linhagem	Níveis de alumínio (mol litro <sup>-1</sup> )			
		0	74	148	222
Brasil	L 69	2,45	2,33	1,99	2,25
	L 153	2,98	3,04	2,36	2,11
	L 297	3,82	3,75	2,23	1,87
Média		3,08	3,04	2,19	2,07
EUA	B 73	1,97	1,65	1,35	1,32
	Mo 17	2,99	2,59	1,99	1,64
	N 28	3,48	3,00	1,94	1,42
Média		2,81	2,41	1,76	1,46

Adaptado de Magnavaca et al. (1987 a).

Verifica-se maior tolerância das linhagens brasileiras do que as americanas. As linhagens brasileiras não foram originalmente selecionadas para solos ácidos, mas a fixação ao acaso desses genes para tolerância mostra a variabilidade das populações dessa origem para esse caráter, e o potencial dessas linhagens para a produção de híbridos tolerantes.

#### **b) Identificação de populações tolerantes.**

Em 1976/77, foram avaliadas 183 populações de milho de diversas origens, entre materiais melhorados e de Banco de Germoplasma. Optou-se pela seleção de cinco delas: CMS 36, CMS 30, CMS 13, CMS 04C e CMS 14C. A variedade CMS 36 foi formada pelo inter cruzamento entre linhagens tolerantes avaliadas dentro do programa. A CMS 30 é originária do Composto Amarelo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ) e já selecionada em solos ácidos por mais de dez ciclos de seleção. A CMS 13 se originou do inter cruzamento das melhores populações avaliadas em solos ácidos. A população CMS 14C é originária

do Pool 25 e a CMS 04C, da população 28, ambas do CIMMYT. As variedades CMS 36 e CMS 30 logo se destacaram pela sua tolerância, como é mostrado pelos dados da Tabela 7, adaptada de Lopes et al. (1988).

**TABELA 7.** Percentagem de crescimento relativo de raiz seminal (CRRS), em solução nutritiva com dois níveis de alumínio, e percentagem de decréscimo no crescimento relativo de raiz seminal (DCRS) entre esses níveis.

Populações	Níveis de alumínio (mol litro <sup>-1</sup> )		DCRS %
	0	222	
	CRRSC %		
CMS 36	88,9 cde	64,4 b	27,5 b
CMS 30	113,9 ab	71,4 ab	37,2 b
CMS 14 C	107,2 abc	23,7 c	77,8 a
CMS 04 C	81,7 de	17,2 c	78,9 a
CMS 105	81,9 de	25,2 c	69,3 a
BR 126	100,1 bc	24,3 c	75,7 a

Adaptado de Lopes, M.A. et al. 1986.

Os dados mostram a maior tolerância da CMS 36 e CMS 30 em relação aos demais materiais, sendo, portanto, excelentes fontes de genes para tolerância.

As mesmas cinco populações selecionadas para solos ácidos foram avaliadas em dois ambientes (1 meq Al e 0 meq Al), em Sete Lagoas (Gama et al., 1986), em comparação com cinco híbridos testemunhas (Tabela 8).

As variedades CMS 36 e CMS 30 mostraram sua superioridade quando plantadas em solos ácidos, sendo comparadas apenas ao híbrido experimental CMS 200X, que foi selecionado para solos ácidos. Verifica-se a pouca adaptação dos outros híbridos comerciais a solos ácidos e também a melhor resposta dos mesmos quando plantados em solos férteis sem alumínio tóxico.

A população CMS 30, original e no quarto ciclo de seleção para solos ácidos, foi comparada com populações americanas e populações americanas cruzadas com germoplasma tropical, em termos de CRRS (Tabela 9) (Magnavaca et al., 1987c).

**TABELA 8.** Médias de produção de espigas despalhadas (kg/ha) de dez cultivares de milho testadas em dois ambientes, em Sete Lagoas, MG. 1983/84 e 1984/85.

Cultivares	Produção (kg/ha)	
	Cerrado(1 meq.Al)	Solo Fértil (0 meq.Al)
CMS 14	2.579	7.871
CMS 36	4.521	6.547
CMS 30	3.122	7.051
CMS 04	2.186	7.656
CMS 13	1.796	6.745
CARGILL 511	2.648	7.515
CARGILL 111 S	3.980	8.335
AGROCERES 301	3.449	7.944
DINA 3030	3.237	8.991
CMS 200 X	4.020	6.875

Adaptado de: Gama, E.E.G. et al. 1986.

**TABELA 9.** Crescimento relativo de raiz seminal (CRRS) de seis populações de milho desenvolvidas em solução nutritiva com Al.

Populações	CRRS
CMS 30 original	2,09 a
CMS 30 - 4 ciclo	1,94 b
Corn Belt x Brazilian	1,27 c
Corn Belt x Caribbean	1,08 d
Hays Golden	1,12 d
Nebraska B synthetic	1,20 cd

Adaptado de Magnavaca et al. (1987 c).

Fica evidente a superioridade da CMS 30 original em quatro ciclos de seleção recorrente em solo ácido, em relação às populações americanas. A Corn Belt x Brazilian, que, depois de cruzada foi selecionada nos EUA, em solos sem alumínio, ainda mostra melhor adaptação quanto à tolerância a Al do que os outros materiais. Os dados, tanto de linhagem como de populações, evidenciam que a seleção nas condições brasileiras de certa forma induziu à seleção de genótipos mais tolerantes a Al, ainda que de forma não consciente. Esta variabilidade natural por certo irá permitir avanços nos programas de seleção para esse caráter.

### Herança para o caráter tolerância a alumínio

Magnavaca et al., (1987 b) utilizaram seis gerações ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $BC_1$ ,  $BC_2$ ) de seis diferentes cruzamentos entre linhas puras americanas, dentro de modelo definido por Mathers e Jinks, para estudar a herança da tolerância a alumínio, utilizando o parâmetro de crescimento relativo de raiz seminal, conforme dados da Tabela 10.

**TABELA 10.** Quadrados médios para CRRS obtidos de seis gerações, de 6 grupos diferentes de linhagens americanas.

Fonte de variação <sup>1</sup>	GL	Quadrados médios dos grupos					
		1	2	3	4	5	6
Gerações dentro grupo	5	0.6880**	0.0914**	0.0373**	0.0163**	0.0341**	0.0437**
Aditivo	1	0.22188**	0.2688**	0.1128**	0.0994	0.0382**	0.1733**
Dominância	1	0.1114**	0.1107**	0.0568**	0.0351**	0.0904**	0.0080
Espistasias	3	0.00270	0.0258**	0.0056	0.0123*	0.0140**	0.0124**
aditivo x aditivo	1	0.00001	0.0319**	0.0110	0.0040	0.0041	0.0008
aditivo x dominante	1	0.00800	0.0314**	0.0034	0.0012	0.0097	0.0116
dominante x dominante	1	0.00007	0.0141*	0.0024	0.0318**	0.0283	0.0249**

<sup>1</sup>Pârametros definidos por Mathers & Jink.

Fonte: Fonte Magnavaca et al. (1987 b).

O efeito genético aditivo explicou a maior parte da variação genética, mas o efeito genético de dominância sempre mostrou uma contribuição significativa, exceto para o grupo 6. Houve alguns efeitos significativos para as epistasias, embora sempre pequenos quando comparados com os efeitos aditivos e de dominância.

Esses mesmos seis grupos serviram para verificar a segregação entre plantas da geração  $F_2$ , usando o parâmetro CRRS. Todas as segregações foram contínuas, unimodais e típicos de um caráter herdado quantitativamente, indicando uma predominância de genes dominantes para susceptibilidade a alumínio.

O tipo de variância envolvida na tolerância a alumínio também pode ser inferido a partir da magnitude dos efeitos de capacidade geral e específica de combinação, a partir do cruzamento dialélico entre linhas puras ou populações de milho.

Na Tabela 11, é mostrada a magnitude desses efeitos para os estudos de Magnavaca et al., (1987 b), Naspolini Filho et al., (1981), Lopes et al., (1987) e Eleutério et al., (1988).

**TABELA 11.** Quadrados médios para os efeitos de capacidade geral e específica de combinação de dialélicos entre linhagens e populações, avaliados em solos e solução nutritiva.

Efeito	Solos (produção de grãos)		Solução nutritiva (CRRS)	
	10 linhagens <sup>1</sup>	5 populações <sup>2</sup>	8 linhagens <sup>3</sup>	5 populações <sup>4</sup>
Cap. Geral				
Comb.	3145840**	2.362.565**	0.8911**	394,28**
Cap. Esp.				
Comb.	662758**	2.204.482**	0.1251**	46,01*

Adaptado de:

- 1 - Naspolini et al., 1981
- 2 - Eleutério et al., 1988
- 3 - Magnavaca et al., 1987 b.
- 4 - Lopes et al., 1987

A variância para capacidade geral de combinação explica a maior parte da variação, mas a variância para capacidade específica de combinação sempre foi significativa, mostrando mais uma vez a importância dos efeitos aditivos e, em menor escala, dos de dominância. Esses resultados evidenciam que tolerância a alumínio é um caráter de herança quantitativa, permitindo ganhos na seleção recorrente e obtenção dos tipos intermediários para tolerância, quando se cruzam genótipos tolerantes e não tolerantes. No entanto, a grande diferença quanto à tolerância entre milhos do Brasil e Estados Unidos nos permite especular sobre a presença de um gene maior para tolerância.

A presença de uma herança quantitativa é reforçada quando se cruzam populações tolerantes com não tolerantes, na forma de dialélico, e se avalia em solos sob cerrado e solução nutritiva com alumínio (Lopes et al., 1987 e Eleutério et al., 1988). As populações CMS 36 e CMS 30 recomendadas como fonte de genes para tolerância a Al, quando cruzadas com populações não tolerantes, mostraram os mais altos efeitos de capacidade geral de combinação e muita presença nos melhores cruzamentos específicos, principalmente em solução nutritiva (Tabela 12).

As populações avaliadas (Tabela 12) estão sendo selecionadas por seleção recorrente, em solos ácidos, onde se procura associar produtividade e tolerância a alumínio. Tem havido progresso na seleção recorrente para ambos os caracteres.

**TABELA 12.** Estimativa dos efeitos de capacidade geral de combinação (gi) e específica (sij) para CRRS, em solução nutritiva com 222 mol Al litro<sup>-1</sup> e peso de espiga (kg/ha) de ensaios em quatro locais.

Populações	sij					gi
	CMS 04C	CMS 14C	CMS 36	CMS 13	CMS 30	
	CRRS <sup>1</sup>					
CMS 04C		-0.560104	0.73999	-0.42664	-1.3266	-3.84002
CMS 14C			-2.2266	-1.89332	9.04002	-6.200669
CMS 36				-2.42667	-3.99332	7.16001
CMS 13					5.50668	-3.40665
CMS 30						6.3935
	Produção de grãos <sup>2</sup>					
CMS 04C		443.28	641.25	750.18	784.10	-475.25
CMS 14C			138.97	-353.21	209.71	30.24
CMS 36				471.87	-72.62	361.47
CMS 13					477.31	16.84
CMS 30						66.53

Adaptado de:

1 - Lopes et al. (1987)

2 - Eleutério et al. (1988)

### Obtenção de híbridos produtivos e tolerantes a alumínio

Um grupo de 2.102 linhagens S<sub>2</sub> de diversas populações foi avaliados per si e 429 foram cruzadas com um híbrido simples testador, com tolerância a alumínio. O objetivo foi selecionar linhagens que mostrassem adaptação a solos ácidos, possibilitando associar tolerância a Al com produtividade e estabilidade de produção. Procurou-se, na avaliação, selecionar locais que mostrassem um gradiente de resposta, o que foi conseguido, conforme dados da Tabela 13, que mostram dados de análise química de solos, e dados da Tabela 14, que mostram a média dos vários ensaios em que foram distribuídos os híbridos top-crosses e os índices ambientais, segundo a metodologia de análise de estabilidade de Eberhart e Russel (1966).

**TABELA13.** Sumário das análises químicas de amostras de solo coletadas nas áreas experimentais de Sete Lagoas (Campo Alegre e Cerrado), Goiânia, Ituiutaba e Monte Carmelo.

Locais	Profundidade (cm)	pH	meq/100cc			ppm		MO %	Sat. Al %
			Al	Ca	Mg	K	P		
Sete Lagoas/ MG	0 - 20	5.7	0.00	7.54	0.87	135	11	3.99	-
(Campo Alegre)	20 - 40	-	-	-	-	-	-	-	-
Sete Lagoas/ MG	0 - 20	4.9	0.90	1.62	0.41	63	4	3.75	28.8
(Cerrado)	20 - 40	4.8	1.05	1.09	0.30	46	3	3.22	41.0
Goiânia/ GO	0 - 20	5.7	0.00	1.98	0.59	36	1	1.93	-
	20 - 40	5.3	0.00	1.13	0.36	28	1	1.63	-
Ituiutaba/ MG	0 - 20	5.6	0.00	1.56	0.73	37	29	0.97	-
	20 - 40	5.1	0.15	0.89	0.50	23	4	0.85	9.16
Monte Carmelo/ MG	0 - 20	4.9	0.20	1.05	0.65	31	11	3.12	9.60
	20 - 40	4.9	0.23	0.38	0.29	24	2	2.52	23.45

**TABELA 14.** Produção média, em kg de espigas/ha, e índices ambientais da análise de estabilidade para quatro ensaios de avaliação de híbridos experimentais de milho conduzidos em diferentes locais.

Ensaio	Locais	Locais					Médias gerais dos ensaios
		Sete Lagoas MG (Campo Alegre)	Ituiutaba MG	Goiânia GO	Sete Lagoas MG (Cerrado)	Monte Carmelo MG	
Ensaio 1	Média de local	8.161	6.002	5.554	4.489	4.691	5.779
	Índice Ambiental	2.382	223	-225	-1.290	-1.088	-
Ensaio 2	Média de local	7.304	6.106	5.759	4.272	4.740	5.636
	Índice Ambiental	1.668	470	123	-1.364	-896	-
Ensaio 3	Média de local	7.821	6.086	5.567	4.247	4.619	5.668
	Índice Ambiental	2.153	418	-101	-1.421	-1.049	-
Ensaio 4	Média de local	-	5.809	5.607	4.212	4.083	4.928
	Índice Ambiental	-	881	679	-716	-845	-
Médias Gerais	Média de Local	7.763	6.001	5.622	4.304	4.533	-
	Índice Ambiental	2.068	498	120	-1.198	-920	-

Verifica-se uma variação intencional de saturação de Al e níveis de fósforo, o que possibilitou criar um gradiente, conforme mostram as médias dos ensaios e índice ambiental da Tabela 14, para 380 top-crosses distribuídos em quatro ensaios.

A estabilidade de produção dos top-crosses, medida pela metodologia de Eberhart & Russel (1966), mostra o tipo de resposta que se obtém nesse gradiente de ambientes. Na Tabela 15, pode-se observar a freqüência de distribuição dos híbridos quanto aos efeitos lineares e não lineares da análise de estabilidade fenotípica dos ensaios de top-crosses avaliados em cinco locais.

**TABELA 15.** Efeitos lineares e não lineares da análise de estabilidade de 380 top-crosses distribuídos em quatro ensaios e testados em cinco locais.

Ensaio	N de top-crosses por categoria			
	$b = 1 \text{ e } S^2_d = 0$	$b = 1 \text{ e } S^2_d > 0$	$b > 1 \text{ e } S^2_d = 0$	$b < 1 \text{ e } S^2_d = 0$
1	62	14	11	8
2	71	14	4	6
3	71	10	3	11
4	74	11	4	6

Cerca de 73% dos top-crosses testados apresentaram respostas crescentes com a melhoria de ambiente ( $b = 1$  e  $S^2_d = 0$ ), mas cerca de 8% foram pouco sensíveis à melhoria de ambiente e se adaptam melhor a condições desfavoráveis ( $b < 1$  e  $S^2_d = 0$ ). Ainda, 6% se ajustaram melhor a ambientes mais favoráveis ( $b > 1$  e  $S^2_d = 0$ ).

Esses mesmos 380 top-crosses foram avaliados em solução nutritiva para o parâmetro CRRS, e os resultados são mostrados na Tabela 16.

**TABELA16.** Síntese da avaliação de 380 híbridos experimentais quanto à tolerância ao alumínio, usando o método da solução nutritiva.

Ensaio		CRRS(%)		Híbridos (Teste F)	CV(%)
		Amplitude	Média		
Ensaio 1	A	17,3 - 70,9	43,3	9,87**	14,64
	B	18,8 - 61,2	41,3	6,88**	16,81
Ensaio 2	A	30,3 - 100,8	59,1	9,40**	11,61
	B	36,8 - 80,4	43,2	5,51**	13,11
Ensaio 3	A	35,3 - 76,0	55,9	5,30**	16,42
	B	39,3 - 76,5	59,1	5,14**	12,45
Ensaio 4	A	14,9 - 57,6	39,5	3,35**	21,07
	B	23,7 - 84,4	49,1	10,33**	14,66

\*\*Significativo a nível de 1% de probabilidade

Houve uma variação contínua dos top-crosses para tolerância a alumínio e, apesar de todas as linhagens terem sido cruzadas com um testador tolerante a alumínio, muitos top-crosses apresentaram baixa tolerância.

Na Tabela 17, são mostrados alguns tipos de respostas que foram encontradas na avaliação dos 380 top-crosses para produção de grãos e tolerância a alumínio, medidos pelo crescimento relativo de raiz seminal (CRRS), no ensaio 2.

**TABELA 17.** Percentagem em relação à maior produção do ensaio de avaliação de top-crosses, plantados em diferentes solos, e crescimento relativo de raiz seminal(CRRS), medido em solução nutritiva com 222 mol litro<sup>-1</sup> de Al.

Híbridos	Solo fértil			Solo ácido		Média dos ensaios	CRRS
	S.Lagoas	Ituiutaba	Goiania	S.Lagoas	M.Carmelo		
	MG	MG	GO	MG	MG		
TC 1	81,6	89,9	64,1	97,2	82,5	83	75
TC 45	78,8	85,3	90,6	84,8	73,4	83	69
TC 77	76,1	100,0	73,8	94,0	87,7	86	46
C 111 S	83,2	79,3	100,0	78,6	46,1	77	47
Ag 301	78,0	85,1	59,5	67,4	45,6	67	43

Observa-se que o TC1 mostrou alta tolerância a Al e produziu bem em solo ácido e fértil e possivelmente sentiu o baixo nível de fósforo do ambiente Goiânia. Já o TC 45 produziu bem em todos os ambientes e apresentou alta tolerância a Al em solução nutritiva. O TC 77 produziu bem em todos os ambientes, mas mostrou baixa tolerância a alumínio em solução nutritiva. A adaptação desse genótipo à condição de solos ácidos possivelmente é devido à sua melhor eficiência na utilização de fósforo, mas seria um genótipo a ser melhor estudado. Verifica-se que esses top-crosses mostraram-se superiores aos dois híbridos testadores em produtividade média, nos diversos ambientes, e em tolerância a alumínio, permitindo a associação das linhagens testadas na produção de híbridos comerciais com essas características.

Das 429 linhagens testadas em top-cross, as dez melhores, de diferentes tipos de grãos e grupos heteróticos, foram utilizadas para a síntese de híbridos duplos. Esses híbridos duplos (20) foram avaliados em cinco locais, de média a alta fertilidade, onde se procurou avaliar se a produtividade e a estabilidade dos híbridos tolerantes à toxidez de Al, quando plantados em solos mais férteis, são compatíveis com a produtividade e a estabilidade dos híbridos comerciais de menor tolerância. A tolerância a alumínio dos híbridos experimentais e testemunhas foi medida pelo parâmetro CRRS, e os resultados do trabalho de Magnavaca et al., (1988) são mostrados na Tabela 18.

Os híbridos duplos HD 7, HD 8 e HD 9 foram obtidos pelo cruzamento de três híbridos simples diferentes com o mesmo híbrido simples macho tolerante a alumínio, mas de produtividade limitada. Já os HD 14, HD 15 e HD 20 foram produzidos com um macho diferente, com menor formação de radículas em solução nutritiva, mas produtividade e prolificidade alta quando plantado em solos mais férteis. Houve uma menor produtividade dos híbridos do 1º grupo, mas apresentaram maior tolerância a toxidez de Al, e valores de  $b < 1$ . Os híbridos do 2º grupo mostraram produtividade maior,  $b$  acima de 1, e os híbridos HD 14 e HD 15 um nível alto de tolerância a alumínio. Os híbridos comerciais utilizados como testadores foram inferiores em produtividade e tolerância a alumínio, principalmente em relação ao HD 14. A tolerância a alumínio pode, portanto, ser incorporada a genótipos de alta produtividade e estabilidade de produção, que podem melhorar a produtividade em solos sob vegetação de cerrado, dada a sua ampla adaptação às variações de condições naturais ou de níveis de recuperação desses solos.

**TABELA 18.** Crescimento relativo de raiz seminal (CRRS) (%), peso médio de espigas (kg/ha), coeficiente de regressão linear (b) e desvios da regressão linear ( $S^2d$ ) de híbridos experimentais de milho testados em cinco locais. 1985/86.

Híbrido duplo	CRRS (%)	Produção (kg/ha)	b	$S^2d$
HD 7	130 a	6.616 k	0,79 + 0,08	-14.607
HD 8	73 bcd	7.264 j	0,84 + 0,04*	-12.9047
HD 9	107 ab	7.081 j	0,91 + 0,09	-2.049
HD 14	92 abc	8.712 ab	1,16 + 0,04*	-132.525
HD 15	76 bcd	8.870 a	1,17 + 0,10	62.595
HD 20	59 cd	8.408 cd	0,99 + 0,09	4.274
Cargill 111 S	48 de	7.817 hi	1,17 + 0,03*	-139.363
Dina 3030	61 cd	7.969 gh	1,09 + 0,11	77.103
Agroceres 401	46 de	7.245 j	0,98 + 0,06	-86.952
Pioneer 6875	16 e	8.050 efg	1,25 + 0,14	250.015

Adaptado de: Magnavaca et al. 1988.

A eficiência desses híbridos duplos de milho selecionados para tolerância a alumínio na absorção e utilização de fósforo foi avaliada por Alves et al., (1991). Em um solo de cerrado com originalmente 1 ppm de fósforo, em Sete Lagoas, foram avaliados 16 híbridos de milho, na dose de 100 kg/ha de  $P_2O_5$ , após o solo ter sido corrigido com calcário e adicionados os outros nutrientes na quantidade necessária. Os resultados constam da Tabela 19.

Pode-se verificar que os 4 híbridos duplos (HD 14, 15, 20 e 16) selecionados para solos ácidos foram considerados eficientes na utilização de fósforo, com base no intervalo de confiança para a média da produção dos híbridos estudados. Híbridos como HD 9 e HD 3, de tolerância a alumínio muito alta, mas com produtividade limitada, foram bem menos efetivos na utilização de fósforo. Algumas testemunhas, como Cargill 111 S e Pioneer 6875, foram medianas, apesar da baixa tolerância a alumínio já demonstrada anteriormente. Possivelmente híbridos como o HD 14 e HD 15, possuem um dos mecanismos de tolerância a Al, que se baseia na capacidade da planta de absorver e utilizar fósforo na presença do alumínio como relatado por Magnavaca (1982). Ficam evidenciadas, também, as vantagens de se associar este mecanismo a genótipos de potencial produtivo.

**TABELA 19.** Produção de grãos (kg/ha) de 16 híbridos duplos de milho na dose de 100 kg/ha P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Híbrido	Produção (kg/ha)	Classificação
HD 14	6.740	E
HD 15	6.134	E
HD 20	6.126	E
HD 16	5.906	E
PIONEER 6875	5.490	ME
CARGILL 111 S	5.390	ME
HD 353	5.140	ME
AGROCERES 303	5.120	ME
DINA 10	5.114	ME
HD 354	4.994	ME
HD 355	4.826	ME
HD 352	4.806	ME
HD 9	4.780	ME
HD 3	4.614	ME
CMS 350	4.520	I
CARGILL 601	4.366	I

I = ineficiente ME = medianamente eficiente E = eficiente

Fonte: Alves et al. 1991.

O híbrido duplo experimental HD 14 foi lançado comercialmente como BR 201. Apesar das vantagens de tolerância a alumínio e melhor eficiência na utilização, é importante verificar se esses fatores estão associados em um híbrido comercialmente competitivo e estável. Dados da Tabela 20, relativos ao Ensaio Nacional de Milho, para a média de vários locais, em três anos, mostram a produção de espiga despalhada em kg/ha do BR 201, em comparação a outros híbridos comerciais, muito utilizados no Brasil.

Verifica-se que o BR 201 apresentou produtividade competitiva com híbridos comerciais não selecionados para solos ácidos, quando avaliados em condições de melhor fertilidade. Este aspecto é importante, pois dificilmente este híbrido será comercializado exclusivamente para solos ácidos, pois as propriedades rurais possuem outros tipos de solos com menores restrições.

Este programa está tendo continuidade onde as características de produtividade e tolerância a alumínio são mantidas e procura-se melhorar em outros aspectos muito importantes, como resistência ao acamamento e

quebramento de plantas. Dados da Tabela 21 mostram o BR 201, híbrido simples BR 201F, considerado excepcional para tolerância ao acamamento e quebramento, e dois novos híbridos experimentais HD 8805 e HD 8906.

**TABELA 20.** Produção de espiga despalhada (kg/ha) de híbridos comerciais de milho do Ensaio Nacional de Milho, em vários locais e três anos.

Híbrido	86/87(26 locais)	87/88(45 locais)	88/89(47 locais)
Agromen 2001	7.423(100)	6.788(101)	8.410(114)
Agrocerec 303	8.453(114)	7.606(114)	8.642(117)
Agrocerec 405	8.570(115)	7.272(109)	7.930(108)
BR 201	8.773(118)	7.582(113)	8.625(117)
Cargill 511A	8.917(120)	7.300(109)	7.824(106)
Cargill 606	7.978(107)	6.572(98)	7.226(98)
Dina 70	9.588(129)	7.808(117)	9.188(125)
GO 847	8.180(110)	6.395(96)	7.716(105)
Pioneer 6875	8.100(109)	6.930(104)	7.919(108)
XL 560	8.443(114)	6.825(102)	8.223(112)
XL 599	8.415(113)	7.327(110)	8.215(111)
IAC 8222	7.434(100)	6.691(100)	7.353(100)
Média Geral	7.913	7.005	7.977

**TABELA 21.** Dados médios de peso de espigas (kg/ha), % de acamamento e quebramento de um grupo de híbridos experimentais do CNPMS. Média de 12 locais (1990/91).

Híbridos	Peso de espigas (Kg/ha)	Acamamento (%)	Quebramento (%)
HD 8805	7.925 (110)	19,1	15,5
HD 8906	7.638 (106)	12,6	7,0
BR 201	7.220 (100)	14,6	11,3
BR 201 F	7.154 (99)	7,6	3,6

Fonte: CNPMS (dados não publicados).

O HD 8805, com produtividade bem superior ao BR 201, na média de 12 locais, apresenta, porém, índices de acamamento e quebramento incompatíveis com um híbrido comercial. Porém, o HD 8906 é mais

produtivo e melhora muito em relação ao BR 201, nos aspectos de acamamento e quebramento. Este é um exemplo de problemas típicos de melhoramento de milho que não podem ser negligenciados quando se procura associar resistência a stress a genótipos comercialmente competitivos.

Dentro deste programa, já foi possível também selecionar híbridos triplos superiores em produtividade ao BR 201, mantendo-se, porém, a melhor adaptação a solos ácidos. Dados da Tabela 22 mostram resultados da avaliação de cinco híbridos triplos para solos ácidos, em comparação ao BR 201, em quatro ambientes.

**TABELA 22.** Produção de espiga despalhada (kg/ha) em quatro locais, de híbridos triplos para solos ácidos.

Híbrido	Goiânia GO	Londrina PR	S.Lagoas MG (Fértil)	Média	S.Lagoas MG (Cerrado)
HT 1	7.248	6.790	12.054	8.697(4)	1.541(6)
HT 2	9.269	7.649	10.291	9.280(2)	2.628(4)
HT 3	8.330	8.754	11.110	9.398(1)	1.630(5)
HT 4	7.123	6.995	10.350	8.156(6)	3.050(3)
HT 5	8.519	7.784	11.421	9.241(3)	3.133(2)
BR 201	7.354	7.527	11.109	8.663(5)	3.251(1)
CV (%)	14,8	11,4	13,2		34,3

Fonte: CNPMS (dados não publicados).

O HT5 foi superior ao BR 201 na média dos três ambientes de solos férteis e equivalente ao BR 201 quando avaliado em solo de cerrado. Os novos híbridos duplos e triplos poderão ser lançados comercialmente, complementando o BR 201 que, no ano agrícola de 1991/92, já foi comercializado no equivalente a 12% do mercado brasileiro de sementes.

Pelo que foi exposto neste trabalho, a geração de genótipos comerciais com tolerância a alumínio teve que ser alicerçadas em conhecimentos básicos e no desenvolvimento da metodologia em todas as suas etapas, que, por serem típicos de regiões tropicais, nem sempre estão desenvolvidos em centros de pesquisas mais avançados de regiões temperadas do mundo. No entanto, isto foi possível pela definição clara dos objetivos do programa, a existência de uma equipe multidisciplinar de

pesquisa e a possibilidade de dispor dentro de um mesmo programa das fontes de resistência ao stress pretendido e linhagens elites já analisadas para outros caracteres importantes, como produtividade, ciclo mais precoce, resistência ao acamamento e quebramento, resistência a doenças, bom empalhamento e outros. A partir desses materiais elites e da disponibilidade de uma rede ampla de avaliação de cultivares, é que se torna possível o sucesso de um programa quando muitos fatores deverão ser associados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, V.C.A., VASCONCELLOS, C.A., MAGNAVACA, R. & PITTA, G.V.E. 1991. Eficiência de genótipos de milho na absorção e utilização de fósforo. Relatório Técnico Anual do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo 1985-1987. Sete Lagoas, EMBRAPA/CNPMS. 170p.
- BAHIA FILHO, A.F.C., FRANÇA, G.E., PITTA, G.V.E., MAGNAVACA, R., BAHIA, F.G.F.T.C. 1978. Avaliação de linhagens e populações de milho em condições de elevada acidez. In: Reunião Brasileira de Milho e Sorgo, 11., Piracicaba, 1976. Anais. Piracicaba, ESALQ. p.51-8.
- EBERHART, S.A. & RUSSEL, W.A. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6:36-50.
- ELEUTÉRIO, A., GAMA, E.E.G., MORAIS, A.R. 1988. Capacidade de combinação e heterose em híbridos intervarietais de milho adaptados às condições de cerrado. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 23(3):247-53.
- FURLANI, P.R. & CLARK, R.B. 1981. Screening sorghum for aluminum tolerance in nutrient solution. *Agron. J.*, 73:587-94.
- GAMA, E.E.G., MAGNAVACA, R., MORAIS, A.R. & OLIVEIRA, A.C. Comportamento de cinco populações de milho e de seus respectivos híbridos interpopulacionais em solos férteis e ácidos. In: Memoria da XII Reunion de Maiceros de la Zona Andina, Quito, Ecuador, 1986:p 77-96.
- LOPES, M.A., MAGNAVACA, R., BAHIA FILHO, A.F.C., GAMA, E.E.G. 1987. Avaliação de populações de milho e seus cruzamentos para tolerância à toxidez de alumínio em solução nutritiva. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 22 (3):257-63.
- MAGNAVACA, R. 1983. Genetic variability and the inheritance of aluminium tolerance in maize. Lincoln, University of Nebraska, 1982. 132p. Tese de PhD. Diss. Abstr. 43, 2.073B.

- MAGNAVACA, R., GARDNER, C.O. & CLARK, R.B. 1987 a. Evaluation of inbred maize lines for aluminium tolerance in nutrient solution. p 255-65. In. Genetic aspects of plant mineral nutrition. Eds. W.H. Gabelman and B.C. Loughman. Martinus Nijhoff Publishers/Dr. W. Junk Publ., The Hague, The Netherlands.
- MAGNAVACA, R., GARDNER, C.O. & CLARK, R.B. 1987 b. Inheritance of aluminium tolerance in maize. p 201-12. In. Genetic aspects of plant mineral nutrition. Eds. W.H. Gabelman and B.C. Loughman. Martinus Nijhoff Publishers/Dr. W. Junk Publ., The Hague, The Netherlands.
- MAGNAVACA, R., GARDNER, C.O. & CLARK, R.B. 1987 c. Comparisons of maize populations for aluminium tolerance in nutrient solution. p 189-99. In. Genetic aspects of plant mineral nutrition. Eds. W.H. Gabelman and B.C. Loughman. Martinus Nijhoff Publishers/Dr. W. Junk Publ., The Hague, The Netherlands.
- MAGNAVACA, R., GAMA, E.E.G., BAHIA FILHO, A.F.C. & FERNANDES, F.T. 1988. Obtenção de híbridos duplos de milho para tolerância a toxidez de alumínio. *Pesq. agropec. bras.*, 2(9):971-77.
- NASPOLINI FILHO, V., BAHIA FILHO, A.F.C., VIANNA, R.T., GAMA, E.E.G., VASCONCELLOS, C.A., MAGNAVACA, R. 1981. Comportamento de linhagens e de híbridos simples de milho em solos sob vegetação de cerrado. *Ci. e Cult.*, 33(5):722-7.