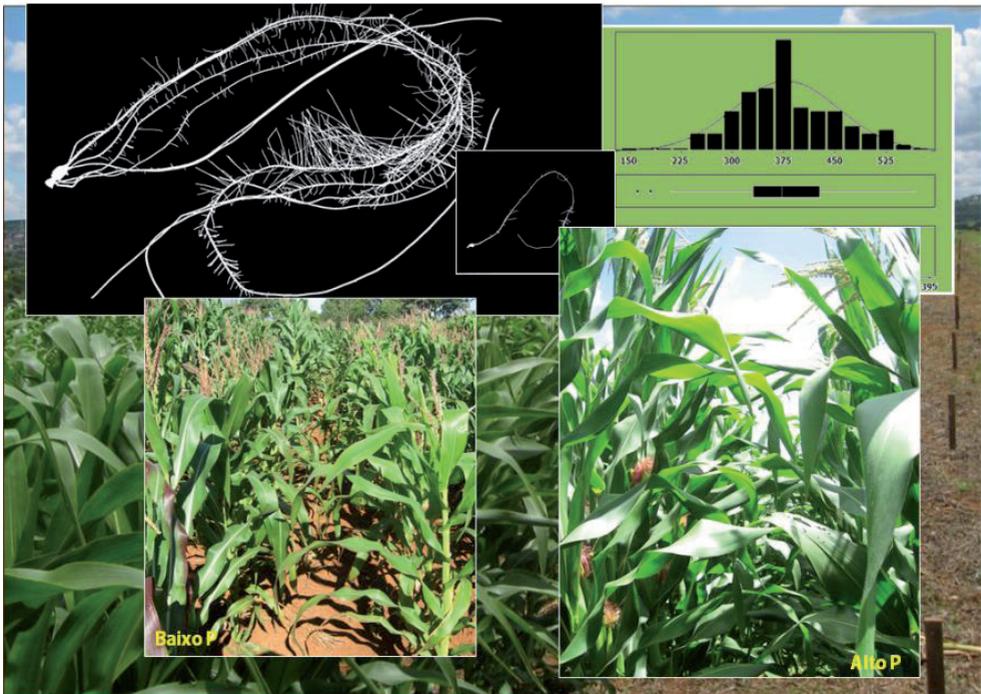


Morfologia do Sistema Radicular em Solução Nutritiva e Eficiência no Uso de P em Híbridos Testcrosses de Milho



ISSN 1679-0154
Dezembro, 2013

**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Milho e Sorgo
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 85

Morfologia do Sistema Radicular em Solução Nutritiva e Eficiência no Uso de P em Híbridos Testcrosses de Milho

Flávia Ferreira Mendes
Bárbara França Negri
Sylvia Morais de Sousa
Lauro José Moreira Guimarães
Sidney Netto Parentoni
Jurandir Vieira de Magalhães
Claudia Teixeira Guimarães

Embrapa Milho e Sorgo
Sete Lagoas, MG
2013

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Milho e Sorgo

Rod. MG 424 Km 45
Caixa Postal 151
CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG
Fone: (31) 3027-1100
Fax: (31) 3027-1188
Home page: www.cnpms.embrapa.br
E-mail: cnpms.sac@embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Sidney Netto Parentoni
Secretário-Executivo: Elena Charlotte Landau
Membros: Dagma Dionísia da Silva, Paulo Eduardo de Aquino Ribeiro,
Monica Matoso Campanha, Maria Marta Pastina, Rosângela Lacerda
de Castro e Antonio Claudio da Silva Barros.

Revisão de texto: Antonio Claudio da Silva Barros
Normalização bibliográfica: Rosângela Lacerda de Castro
Tratamento de ilustrações: Tânia Mara Assunção Barbosa
Editoração eletrônica: Tânia Mara Assunção Barbosa
Foto(s) da capa: Flávia Ferreira Mendes

1ª edição

1ª impressão (2013): on line

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Milho e Sorgo**

Morfologia do sistema radicular em solução nutritiva e eficiência
no uso de P em híbridos testcrosses de milho / Flávia Ferreira
Mendes... [et al.]. -- Sete Lagoas : Embrapa Milho e Sorgo,
2013.
31 p. : il. -- (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa
Milho e Sorgo, ISSN 1679-0154; 85).

1. *Zea mays*. 2. Fósforo. 3. Raiz. I. Mendes, Flavia Ferreira.
II. Série.

CDD 633.15 (21. ed.)

© Embrapa 2013

Sumário

Resumo	4
Abstract	6
Introdução	7
Material e Métodos	9
Resultados e Discussão	15
Conclusões	27
Agradecimentos	27
Referências	27

Morfologia do Sistema Radicular em Solução Nutritiva e Eficiência no Uso de P em Híbridos Testcrosses de Milho

Flávia Ferreira Mendes¹

Bárbara França Negri²

Sylvia Moraes de Sousa³

Lauro José Moreira Guimarães⁴

Sidney Netto Parentoni⁵

Jurandir Vieira de Magalhães⁶

Claudia Teixeira Guimarães⁷

Resumo

Os solos tropicais se caracterizam pelos baixos teores de fósforo (P) na forma disponível para as plantas. Nesse sentido, a busca por cultivares mais eficientes na aquisição do P do solo e na utilização interna desse nutriente é uma alternativa para aumentar a produtividade do milho, reduzindo a necessidade de uso de fertilizantes fosfatados. A alteração na morfologia radicular é um dos mecanismos que está relacionado com o aumento da eficiência de aquisição de P pelas plantas. Neste contexto, os objetivos deste trabalho foram caracterizar

¹Engenheira Agrônoma, Ph.D, Bolsista de Pós-Doutorado do CNPq, Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, flaviafmmendes@outlook.com

²Mestranda em Bioengenharia, Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, MG, babinegri@hotmail.com

³Bióloga, Ph.D., Pesquisadora em Biologia Molecular da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, sylvia.sousa@embrapa.br

⁴Engenheiro Agrônomo, Ph.D., Pesquisador em Melhoramento Genético do Milho da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, lauro.guimaraes@embrapa.br

⁵Engenheiro Agrônomo, Ph.D., Pesquisador em Melhoramento Genético do Milho da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, sidney.parentoni@embrapa.br

⁶Engenheiro Agrônomo, Ph.D., Pesquisador em Genética Molecular da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, jurandir.magalhaes@embrapa.br

⁷Engenheira Agrônoma, Ph.D., Pesquisadora em Genética Molecular da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG, claudia.guimaraes@embrapa.br

uma população de *testcrosses* e obter correlações entre características radiculares e os índices de eficiência no uso de P. Para tanto, uma população de linhagens endogâmicas recombinantes (RILs) cruzada com um testador foi avaliada em solução nutritiva, para os parâmetros radiculares, e em campo, para os índices de eficiência ao P, obtidos com base na produtividade de grãos. Os resultados obtidos denotam que houve variabilidade dentro da população de *testcrosses* para morfologia do sistema radicular, produtividade de grãos e para os índices que medem a eficiência de aquisição e no uso de P. A acurácia seletiva e a herdabilidade para os parâmetros avaliados em solução nutritiva foram semelhantes aos obtidos para as características avaliadas em condições de campo. Não houve relação entre as características radiculares avaliadas em solução nutritiva com a produtividade de grãos e com os parâmetros de eficiência no uso de P. Contudo, os dados de fenotipagem podem ser utilizados para outros estudos futuros, como mapeamento de QTLs.

Palavras-chave: fósforo, RILs, raízes, hidroponia, produtividade

Root Morphology in Nutrient Solution and Phosphorus use Efficiency in Maize Testcross Hybrids

Flávia Ferreira Mendes¹

Bárbara França Negrí²

Sylvia Morais de Sousa³

Lauro José Moreira Guimarães⁴

Sidney Netto Parentoni⁵

Jurandir Vieira de Magalhães⁶

Claudia Teixeira Guimarães⁷

Abstract

Tropical soils are characterized for the low phosphorus (P) availability to plants. Thus, the development of more efficient cultivars in P acquisition and P internal utilization is an alternative to increase maize yield, and to reduce the need for phosphate fertilizers. Root morphology modification is one of the mechanisms developed by plants to improve P acquisition. In this context, our objectives were to characterize a testcross population and to obtain correlation coefficients among root traits and P efficiency indexes. For these purposes, a recombinant inbred lines population (RILs) was crossed with a tester and evaluated for root parameters in nutrient solution and for P use efficiency indexes based on grain yield in the field. The results showed that there was variability within the testcross population for root morphology, grain yield and the P use efficiency indexes. The selective accuracy and heritability for all parameters evaluated in nutrient solution were similar to those obtained for the traits evaluated under field conditions. There was no relationship between root traits evaluated in

nutrient solution with grain yield and P use efficiency indexes. However, the phenotype data may be used for future QTL mapping.

Key words: phosphorus, RILs, root, hydroponics, yield

Introdução

A deficiência de fósforo (P) disponível no solo é uma das principais limitações à produtividade de milho em regiões tropicais. Para obtenção de altas produtividades, altas doses de fertilizantes fosfatados são utilizadas, o que onera sobremaneira os custos de produção. Nesse sentido, o desenvolvimento de cultivares mais adaptadas às condições de deficiência nutricional e/ou que utilizem o fertilizante aplicado de forma mais eficiente tem recebido atenção nos programas de melhoramento em regiões tropicais. Na literatura, são relatadas variações consideráveis entre linhagens de milho para eficiência no uso de P, estimadas com base em dados de produtividade de grãos (PARENTONI; SOUZA JÚNIOR, 2008; PARENTONI et al., 2010; MENDES et al., 2011).

A maioria das cultivares de milho desenvolvida pelos programas de melhoramento é voltada para cultivo em ambientes favoráveis visando a obtenção de altas produtividades. Por outro lado, a identificação e a seleção de genótipos que usam o P de modo mais eficiente para produzir grãos devem ser realizadas com base na avaliação dos genótipos em condições de estresse por deficiência desse nutriente (PARENTONI et al., 2011). Além disso, os genótipos selecionados devem apresentar bom desempenho em ambiente sem estresse nutricional. Assim, a avaliação de genótipos em

ambientes contrastantes tem sido recomendada para avaliar a resposta deles quanto ao aumento da disponibilidade de nutrientes (FURLANI et al., 2002). Entretanto, esta estratégia aumenta os custos e o trabalho para avaliação dos genótipos nas fases iniciais de um programa de melhoramento. Neste contexto, a utilização de características correlacionadas e de alta herdabilidade pode ser uma alternativa para auxiliar na seleção de características complexas.

Em milho, a eficiência na aquisição do P tem sido apontada como crucial para o aumento da produção de grãos em condições de baixa disponibilidade de P (PARENTONI; SOUZA JÚNIOR, 2008). Como o P é um nutriente com pouca mobilidade no solo, as modificações na arquitetura radicular são estratégias que podem aumentar a aquisição de P pelas plantas (LYNCH, 2011; LYNCH; BROWN, 2012). A morfologia radicular é difícil de ser avaliada diretamente no solo, onde a escavação das raízes e a determinação de suas medidas necessitam de mão de obra intensiva, inviabilizando uma análise em alta escala, e ainda são pouco precisas ou muito caras (TRACHSEL et al., 2011). Portanto, a avaliação de plantas em estádios iniciais de desenvolvimento em solução nutritiva é uma alternativa que possibilita avaliar um maior número de genótipos. Além disso, a avaliação do sistema radicular em estádios fenológicos iniciais pode ser usada para mapear QTLs (*Quantitative Trait Loci*) responsáveis por características relacionadas à eficiência no uso de P.

Estudos têm mostrado variabilidade fenotípica para a morfologia do sistema radicular entre genótipos de milho contrastantes no uso de P (ALVES et al., 2000; ZHU et al., 2005a,b; 2006; BRASIL et al., 2007; JAIN et al., 2007; SOUSA

et al., 2012). Recentemente, Sousa et al. (2012) otimizaram as condições de cultivo em solução nutritiva com baixos níveis de P e determinaram parâmetros morfológicos do sistema radicular em linhagens de milho contrastantes para a eficiência na aquisição de P em condições de campo. Contudo, não há resultados sobre correlações entre as características do sistema radicular, avaliadas em estádio precoce, com os índices fenotípicos de eficiência ao P, obtidos com base na produtividade de grãos em condições de alto e baixo P no solo, em populações de milho sob cruzamento.

Neste trabalho, uma população de linhagens endogâmicas recombinantes (RILs) cruzada com um testador foi avaliada em solução nutritiva, para parâmetros radiculares, e em campo, para os índices de eficiência ao P obtidos com base na produtividade de grãos, com objetivo de: 1) caracterizar a população de *testcrosses* quanto aos parâmetros radiculares; 2) avaliar a população de *testcrosses* quanto à produtividade de grãos e aos índices que compõem a eficiência no uso de P; e 3) estimar a correlação entre as características radiculares e os índices de eficiência de P.

Material e Métodos

Material Genético

Uma população de 143 linhagens endogâmicas recombinantes (RILs) foi desenvolvida a partir do cruzamento entre as linhagens L3 e L22, classificadas como eficiente e ineficiente no uso de fósforo, respectivamente (PARENTONI et al., 2010). Essas linhagens são contrastantes para produtividade de grãos, precocidade, desenvolvimento vegetativo (PARENTONI;

SOUZA JÚNIOR, 2008; PARENTONI et al., 2010) e morfologia do sistema radicular (BRASIL et al., 2007; SOUSA et al., 2012). Posteriormente, todas as RILs foram cruzadas com um testador comum, a linhagem L53, considerada ineficiente no uso de P, originando 143 progênes *testcrosses*.

Caracterização Morfológica do Sistema Radicular

As progênes foram avaliadas em solução nutritiva para caracterização do sistema radicular e determinação de peso seco total, incluindo raízes e parte aérea. Para tanto, as sementes de milho foram desinfetadas com hipoclorito de sódio 0,5% por 5 minutos, lavadas com água deionizada e germinadas em papel de germinação, em câmara de crescimento. Após quatro dias, foram selecionadas três plântulas uniformes para cada uma das três repetições. Para garantir o estresse de P, foi retirado o endosperma, visando eliminar as reservas nutricionais da planta. Utilizou-se solução nutritiva de Magnavaca modificada (pH 5,65) (MAGNAVACA et al., 1987) com 2,5 μM de P em um sistema composto de pastas de arquivo forradas com papel de germinação (HUND et al., 2009; SOUSA et al., 2012).

Os experimentos foram realizados em câmara de crescimento com temperatura diurna média de 27 ± 3 °C, noturna de 20 ± 3 °C e fotoperíodo de 12 horas, sob aeração contínua. A solução nutritiva, em contato com aproximadamente 3 cm das pastas, foi trocada a cada três dias (SOUSA et al., 2012). Após 13 dias, o sistema radicular foi fotografado com uma câmera digital (Nikon D300S SLR). As imagens obtidas foram analisadas com o auxílio dos softwares RootReader2D e Winrhizo v. 4.0 (Regent Systems, Quebec, Canadá), sendo quantificadas quatro

características de morfologia radicular: comprimento radicular total (CR), em cm; diâmetro médio (D), em mm; área de superfície radicular total (SR), em cm^2 ; e, área de superfície de raízes finas (SRF) com diâmetro entre 1 e 2 mm (cm^2).

Depois de fotografadas, as raízes e a parte aérea das plântulas foram mantidas em estufa a 65 °C até atingirem peso constante, para determinar o peso seco de raízes e de parte aérea, compondo o peso seco total.

Análise da Produtividade de Grãos e da Eficiência no Uso de P

Das 143 combinações híbridas, 107 produziram sementes em quantidades adequadas para avaliação em experimentos de campo. A população de *testcrosses* mais três híbridos experimentais foram avaliados em dois ambientes contrastantes, um com baixa e outro com alta disponibilidade de fósforo (P) no solo. Os experimentos foram delineados em alpha látice 10x11, com quatro repetições em baixo P e três repetições em alto P. As parcelas foram constituídas por uma linha de 4 m de comprimento e espaçamento de 80 cm entre linhas. Os experimentos foram avaliados na safra de 2009/2010 na Embrapa Milho e Sorgo em Sete Lagoas, MG.

A adubação de plantio para o ambiente de alto P no solo foi realizada com aplicação de 400 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de 8-28-16 (32 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N, 112 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de P_2O_5 e 64 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de K_2O). Para o ambiente de baixa disponibilidade de P, a adubação de plantio consistiu na aplicação de 150 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de 20-00-20 suplementado com 60 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de cloreto de potássio (30 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N e 64 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de K_2O). A adubação de cobertura para os dois ambientes foi

realizada quando as plantas encontravam-se no estágio de V6, aplicando-se 200 kg.ha⁻¹ de ureia (90 kg.ha⁻¹ de N). Para a determinação da quantidade de fósforo fornecida para as plantas, amostras de solo foram coletadas para cada repetição dentro do experimento. Dessa maneira, foi possível estimar a quantidade de P fornecida pelo solo na camada de 0 de 60 cm, que foi acrescida da quantidade de P suprida via fertilizante. Para o ambiente de baixo P, a quantidade P foi em média 6,72 kg.ha⁻¹, sem suplementação, enquanto no ambiente de alto P, a quantidade de P no solo foi em média de 24,374 kg.ha⁻¹ + 48,9 kg.ha⁻¹ via fertilizante, totalizando 73,274 kg.ha⁻¹ de P.

A produtividade de grãos (PG) foi avaliada pela pesagem dos grãos de cada parcela, corrigida para umidade de 13% e estande ideal, e, posteriormente, transformada em kg.ha⁻¹. No momento da colheita dos grãos, cinco plantas, representativas de cada parcela, foram cortadas rente ao solo e seu peso determinado (incluindo colmos, folhas e brácteas das espigas). De cada parcela, foram retiradas amostras representativas de grãos, e, a partir das plantas colhidas, foram retiradas amostras de palhada. As amostras foram secas em estufa com ventilação forçada a 65 °C até peso constante, para a determinação da porcentagem de matéria seca de grãos e de palhada. Posteriormente, as amostras foram moídas, homogeneizadas e foram retiradas alíquotas para análise do teor de P nos grãos (TPG) e na palhada (TPP), pelo método de espectrofotometria com azul de molibdênio (SILVA, 1999). De posse dos resultados de campo e de laboratório foi possível obter, para cada parcela, conteúdo de fósforo nos grãos (PGR), conteúdo de fósforo na palhada (PPA) e a conteúdo de fósforo na planta inteira (PTOT = PGR + PPA).

Com base nesses componentes, foram calculados os seguintes índices (MOLL et al., 1981): eficiência de aquisição (EAQ), obtido pela expressão $EAQ = PTOT / PS$, que corresponde a kg de P na planta (PTOT) por kg de P disponível no solo (PS); eficiência de utilização interna de P (EUTIL), obtido pela expressão $EUTIL = MSG / PTOT$, que corresponde a kg de massa seca de grãos produzidos (MSG) por kg de P na planta; eficiência de uso de P (EUSO), obtido pelo produto das eficiências de aquisição e utilização interna de P ($EUSO = EAQ \times EUTIL$).

Análises Estatísticas dos Experimentos em Solução Nutritiva

Análises de variâncias foram realizadas utilizando o PROC GLM do SAS (SAS INSTITUTE, 1999). Todos os fatores do modelo foram considerados aleatórios, em razão da natureza da população. Foram estimados os componentes de variâncias e as herdabilidades no sentido amplo de acordo com Hallauer et

al. (2010): $\hat{h}^2 = \hat{\sigma}_g^2 (\hat{\sigma}_g^2 + \hat{\sigma}_e^2 / r)$, em que $\hat{\sigma}_g^2$ é a variância genética entre progênies, $\hat{\sigma}_f^2$ é a variância fenotípica entre progênies, $\hat{\sigma}_e^2$ é a variância residual, e r é o número de repetições.

A precisão experimental foi avaliada pela estimativa da acurácia seletiva para cada característica, de acordo com o seguinte estimador: $\hat{r}_{gg} = \sqrt{1 - 1/F}$, em que \hat{r}_{gg} é a acurácia seletiva (RESENDE, 2007) e F é o valor do teste F, da análise de variância, para efeito de progênies. A acurácia, segundo Resende (2007), pode ser classificada como muito alta ($\hat{r}_{gg} \geq 0,90$), alta ($0,70 \leq \hat{r}_{gg} < 0,90$), moderada ($0,50 \leq \hat{r}_{gg} < 0,70$) e baixa ($\hat{r}_{gg} < 0,50$).

Análises Estatísticas dos Experimentos de Campo

Os dados de produtividade de grãos e dos índices de eficiência no uso de P da população de *testcrosses* foram submetidos à análise de variâncias individuais, considerando os ambientes de baixo e alto P no solo. Herdabilidades no sentido amplo e acurácia seletiva foram estimadas como descrito anteriormente. Para verificar o efeito da interação progênies por ambientes, análises de variâncias conjuntas foram realizadas de acordo com o modelo: $Y_{ilk} = m + r_k + t_i + a_l + ga_{il} + \bar{e}_{ilk}$, em que, Y_{ilk} é a observação do *testcross* i avaliado no ambiente l na repetição k ; m é a média geral do experimento; r_k é o efeito da repetição k ($k = 1, \dots, 4$, para baixo P, $k = 1, 2, 3$ para alto P); t_i é o efeito do *testcross* i ($i = 1, \dots, 107$); a_l é o efeito do ambiente l ($l = 1, 2$); ga_{il} é o efeito da interação entre *testcross* e ambiente; \bar{e}_{ilk} é o erro experimental médio.

Análise de Correlação

Correlações fenotípicas (\hat{r}_f) e genéticas (\hat{r}_g) foram estimadas entre as características avaliadas em solução nutritiva, enquanto apenas as correlações fenotípicas foram estimadas entre as características avaliadas em solução nutritiva e das características avaliadas em condições de campo. As análises de correlação foram realizadas com auxílio do programa GENES (CRUZ, 2006).

Resultados e Discussão

Caracterização dos *Testcrosses* em Solução Nutritiva

Todos os parâmetros radiculares avaliados em solução nutritiva com baixo nível de P apresentaram efeito significativo ($p < 0,05$) para a fonte de variação genótipos (Tabela 1), indicando a existência de variabilidade na população de *testcrosses* [RILs_(L3 x L22) x L53] para comprimento radicular, área de superfície radicular, área de superfície de raízes finas, diâmetro radicular médio e peso seco total. As estimativas de variância genética foram superiores às de variância ambiental para todos os parâmetros radiculares, indicando que a maior parte da variação observada para os caracteres avaliados na população em questão, tem base em efeitos genéticos. Adicionalmente, as estimativas de acurácia seletiva (\hat{r}_{gg}) variaram 0,71 a 0,78, indicando alta precisão experimental, segundo classificação de Resende (2007), e, conseqüentemente, boa confiabilidade dos dados experimentais.

Tabela 1. Médias, acurácia seletiva (\hat{r}_{gg}), herdabilidade (h^2), variâncias genética ($\hat{\sigma}_G^2$) e fenotípica ($\hat{\sigma}_F^2$) e teste F para efeito de progênie de análises de variância para as características avaliadas em solução nutritiva.

Características	Média	\hat{r}_{gg}	h^2	$\hat{\sigma}_G^2$	$\hat{\sigma}_F^2$	$\hat{\sigma}_E^2$	Teste F
CR (cm)	387,91	0,77	0,59	3484,09	5866,73	2382,64	**
AS (cm ²)	105,05	0,76	0,58	207,56	358,50	150,94	**
ASF (cm ²)	38,44	0,73	0,53	28,14	53,35	25,21	**
D (mm)	0,8869	0,71	0,50	0,0009	0,0018	0,0009	**
PST (mg)	166,18	0,78	0,60	560,11	928,93	368,82	**

CR: comprimento radicular; AS: área de superfície radicular; ASF: área de superfície raízes finas; D: diâmetro médio de raízes; PST: peso seco total. ** Significativo ($p < 0,01$).

Os parâmetros radiculares e o peso seco total apresentaram padrão de distribuição normal, como esperado para características de herança quantitativa (Figura 1). A população de *testcrosses* apresentou uma amplitude de variação de 162,26 a 567,43 cm para comprimento radicular, com média de 387,91 cm. Para área de superfície radicular a variação foi de 51,69 a 147,11 cm², com média de 105,05 cm², enquanto a área de superfície de raízes finas variou de 21,35 a 53,69 cm², com média de 38,44 cm². Para o diâmetro médio de raízes foi observada uma média de 0,89 mm, com diâmetro mínimo de 0,77 cm e máximo de 1,02 cm. Com relação ao peso seco total, incluindo peso seco de raízes e de parte aérea, a amplitude de variação foi de 91,56 a 239,67 mg, e média de 166,18 mg.

Negri et al. (2012) estudaram a morfologia do sistema radicular da mesma população de RILs (L3 x L22) “per se” em condições experimentais semelhantes e verificaram valores de média inferiores para comprimento radicular, área de superfície radicular, área de superfície de raízes finas e peso seco total. Para o diâmetro radicular, as médias da população de RILs “per se”, obtidas por Negri et al. (2012), foram semelhantes às médias obtidas nesse trabalho para a população em cruzamento. O maior desenvolvimento radicular para a população de *testcrosses* foi, provavelmente, em razão do efeito de heterose, que é comum para características de herança quantitativa em milho (HALLAUER et al., 2010). A contribuição dos locos em heterozigose (desvios de dominância), para as médias de comprimento, área de superfície radicular, área de superfície de raízes finas e peso seco total, possivelmente, foi maior que a dos locos em homozigose (efeitos aditivos). Em relação ao diâmetro radicular, a contribuição dos locos em homozigose (efeito aditivo) foi maior do que a contribuição dos

locos em heterozigose, não se observando efeito de heterose para essa característica.

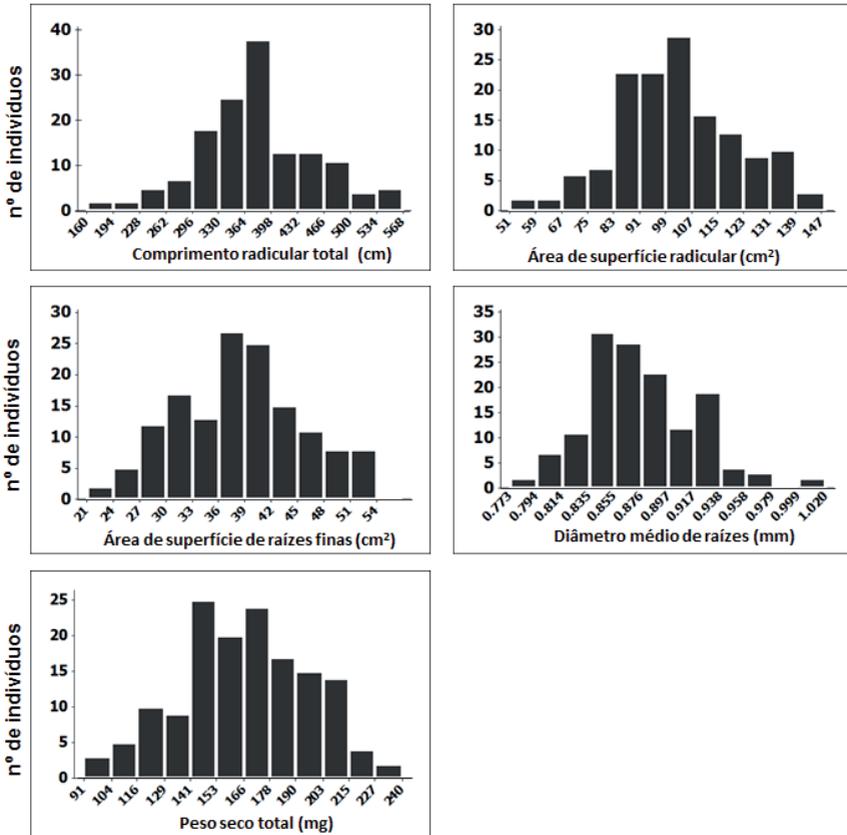


Figura 1. Distribuição de frequências das características radiculares e peso seco total da população de *testcrosses* avaliada em solução nutritiva.

A Figura 2 mostra dois genótipos contrastantes quanto à morfologia do sistema radicular. A progênie (L3xL22)-47 x L53

apresentou maiores médias para comprimento radicular total, área de superfície radicular, área de superfície de raízes finas e peso seco total, e menor média para o diâmetro médio de raízes, enquanto a progênie (L3xL22)-77 x L53 apresentou maior média para o diâmetro médio de raízes e menores médias para as demais características.

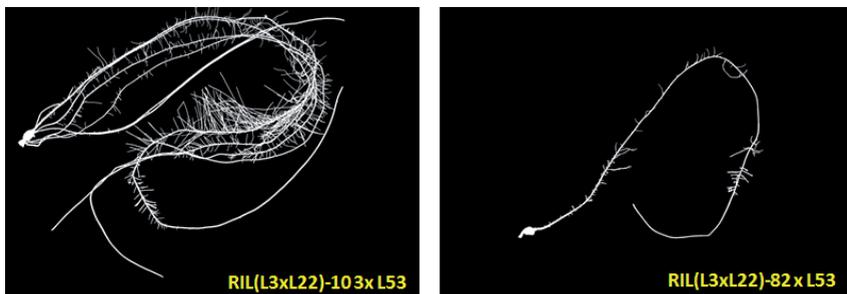


Figura 2. Ilustração de dois genótipos contrastantes quanto à morfologia do sistema radicular.

Correlações entre as Características Avaliadas em Solução Nutritiva

As estimativas de correlações fenotípicas foram positivas, de alta magnitude ($\hat{r}_f > 0,77$) e significativas ($p < 0,01$) entre o comprimento radicular, a área de superfície radicular, a área de superfície de raízes finas e o peso seco total, indicando uma estreita relação entre essas características (Tabela 2). Adicionalmente, estimativas de correlações genéticas de alta magnitude e positivas também foram observadas, indicando um possível efeito de ligação ou pleiotropia entre os genes responsáveis pela expressão dessas características.

Correlações negativas, de média magnitude eq 18 e significativas foram observadas entre o diâmetro radicular e as demais características, exceto entre o diâmetro radicular

e a área de superfície de raízes finas, que apresentou estimativas de \hat{r}_f não significativas ($p < 0,01$) (Tabela 2). A redução do diâmetro radicular elevaria a área radicular específica, mas na população em questão, o aumento da área de superfície de raízes finas baseou-se, principalmente, no aumento do comprimento radicular, uma vez que para estimar a área de superfície de raízes finas foram levadas em consideração somente raízes com diâmetro entre 1,0 e 2,0 mm. A magnitude da \hat{r}_g indicou que os genes responsáveis pelo diâmetro radicular médio e aqueles responsáveis pelo comprimento e pela área de superfície radicular apresentaram uma fraca ligação, mas não completamente independentes. Por outro lado, a ausência de correlação genotípica entre o diâmetro radicular e a área de superfície de raízes finas indicou independência entre os genes que controlam essas características na população em estudo.

Caracterização dos *Testcrosses* em Campo

As estimativas de acurácia seletiva variaram entre 0,63 a 0,72 para o ambiente sem estresse e de 0,66 a 0,74 para o ambiente com baixo P no solo (Tabela 3), indicando uma boa precisão experimental para os valores de produtividade de grãos e dos índices que compõem a eficiência no uso de P nos dois ambientes. As estimativas de herdabilidade foram de média magnitude, variando de 0,40 a 0,52 para o ambiente de alto P no solo, e de 0,43 a 0,55 para o ambiente de baixo P no solo (Tabela 3).

Tabela 2. Correlações fenotípicas (\hat{r}_f) e genotípicas (\hat{r}_g) entre as características avaliadas em solução nutritiva com baixo nível de P para a população de *testcrosses*.

CR: comprimento radicular; AS: área de superfície radicular; ASF: área de superfície raízes finas; D: diâmetro médio de raízes; PST: peso seco total. ** significativo a 1% pelo teste t.

Características	AS		ASF		D		PST	
	\hat{r}_f	\hat{r}_g	\hat{r}_f	\hat{r}_g	\hat{r}_f	\hat{r}_g	\hat{r}_f	\hat{r}_g
CR	0,98*	0,98	0,79**	0,78	-0,60**	0,58	0,87**	0,99
AS			0,89**	0,87	-0,47**	-0,42	0,91**	0,99
ASF					-0,12 ^{ns}	0,03	0,85**	0,99
D							-0,27**	-0,53

Diferenças significativas foram observadas entre progênies e entre ambientes para produtividade de grãos, com uma média de 7.365,8 kg.ha⁻¹ para o ambiente sem estresse e de 3.477,3 kg.ha⁻¹ para o ambiente com estresse (Tabela 3), o que representa uma redução de 53% na produtividade quando as progênies foram cultivadas em ambientes de baixa disponibilidade de P. Efeito significativo também foi observado para a interação progênies por ambientes, indicando que o desempenho das progênies não foi coincidente nos diferentes ambientes. Variabilidade genética entre as progênies e a existência de interação progênies por níveis de P encontradas neste trabalho são consistentes com outros estudos de campo para produtividade de grãos em milho (PARENTONI; SOUZA JÚNIOR, 2008; PARENTONI et al., 2010). A existência de interação progênies por ambientes reforça a necessidade de avaliar os materiais em ambientes contrastantes, uma vez que houve um comportamento diferencial das progênies nos ambientes com e sem estresse por deficiência de P no solo.

Tabela 3. Resumo das análises de variâncias de características avaliadas em campo para a população de *testcrosses*.

		PG	EAQ	EUTIL	EUSO
Média	Alto P	7 365,8	0,21	300,97	62,41
	Baixo P	3 477,3	0,36	478,99	168,07
Herdabilidade	Alto P	0,51	0,40	0,51	0,52
	Baixo P	0,53	0,52	0,43	0,55
Acurácia (\hat{r}_{gg})	Alto P	0,72	0,63	0,72	0,72
	Baixo P	0,73	0,72	0,66	0,74
Teste F	Progênes	1,73**	1,40**	1,43**	1,39**
	Ambientes	2289,75**	2289,75**	1071,04**	1051,29**
	Prog. x Amb.	1,74*	0,92 ^{NS}	1,00 ^{NS}	0,86 ^{NS}

PG: produtividade de grãos; EAQ: eficiência de aquisição de P; EUTIL: eficiência de utilização interna de P; EUSO: eficiência no uso de P. ^{NS, **} não significativo e significativo a 1%, respectivamente, pelo teste F da análise de variância.

Para os três índices de eficiência no uso de P foram observadas diferenças entre progênies e entre ambientes; por outro lado, não foram observadas interações progênies por ambientes significativas, indicando que não houve mudança significativa na classificação dos genótipos entre os dois ambientes para tais índices. Diante desses resultados, a avaliação das progênies em apenas um ambiente seria suficiente para identificar os genótipos superiores quanto aos índices de eficiência no uso de P. Parentoni et al. (2008) avaliaram diferentes linhagens de milho em alta e baixa disponibilidade de P no solo, e verificaram que não foi possível discriminar os genótipos eficientes e ineficientes em ambiente sem estresse, concluindo que a seleção de linhagens quanto aos índices de eficiência no uso de P deve ser realizada em solo com baixa disponibilidade de P.

Correlações entre Características Radiculares e de Campo na População de Testcrosses

Não foram observadas correlações significativas entre os parâmetros radiculares avaliados em solução nutritiva e os índices de eficiência no uso de P avaliados em campo sob baixa e alta disponibilidade de P no solo (Tabela 4). A eficiência no uso de P foi obtida com base na produtividade de grãos, que é uma característica quantitativa, controlada por vários genes de pequenos efeitos, e, normalmente, não apresenta correlações de alta magnitude com características secundárias (HALLAUER et al., 2010). Assim, a ausência de correlação entre os parâmetros radiculares com a produtividade de grãos e com os índices de eficiência ao P não permitem que seleções precoces sejam realizadas a fim de obter genótipos mais eficientes no uso de P. Contudo, mesmo na ausência de correlação,

podem existir genes ou QTLs responsáveis pela expressão de características radiculares que também influenciam, mesmo que em menor efeito, a produção de grãos em solos com baixos níveis de P. Liu et al. (2008) mapearam QTLs para diferentes parâmetros radiculares avaliados em milho cultivado com baixo nitrogênio e verificaram que mesmo na ausência de correlação entre o comprimento máximo de raiz axial e o número de raízes axiais, QTLs para ambas as características foram mapeados na mesma região cromossômica. Portanto, a caracterização da população de *testcrosses* quanto aos parâmetros radiculares em solução nutritiva e quanto aos índices de eficiência no uso de P em campo poderá ser utilizada como variável para mapeamento de QTLs de morfologia radicular que também estejam envolvidos com a eficiência no uso de P em milho. Esses QTLs, uma vez identificados e mapeados, podem ser úteis para seleção assistida, auxiliando no desenvolvimento de novas cultivares.

Tabela 4. Correlações entre as médias das características radiculares com produtividade de grãos e com os índices de eficiência ao P avaliados em campo na população de *testcrosses*

Características	CR		AS		ASF		D		PST	
	Baixo P									
Produtividade de grãos	-0,02 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,07 ^{ns}
Eficiência de aquisição de P	-0,08 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	-0,11 ^{ns}
Eficiência de utilização de P	0,09 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,05 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	0,06 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	0,06 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,06 ^{ns}
Eficiência de uso de P	-0,04 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	-0,09 ^{ns}
Alto P										
Produtividade de grãos	0,07 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,14 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,05 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,05 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,05 ^{ns}
Eficiência de aquisição de P	-0,06 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,07 ^{ns}
Eficiência de utilização de P	0,13 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,11 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,13 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,13 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,13 ^{ns}
Eficiência de uso de P	0,07 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,14 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,05 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,05 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,05 ^{ns}

CR: comprimento radicular; AS: área de superfície radicular; ASF: área de superfície raízes finas; D: diâmetro médio de raízes; PST: peso seco total.

Conclusões

Existe variabilidade dentro da população de *testcrosses* para características radiculares e peso seco total, avaliadas em solução nutritiva. A população também apresenta variabilidade para produtividade de grãos, eficiência de uso de P, eficiência de aquisição de P e eficiência de utilização interna de P, avaliadas em campo.

As avaliações para produtividade de grãos e para os índices de eficiência no uso de P em híbridos *testcrosses* podem ser realizadas apenas em ambiente com baixo P no solo.

Não foi observada relação entre as características avaliadas em estádio precoce com a produtividade de grãos, com a eficiência no uso de P, com a eficiência de aquisição de P e com a eficiência de utilização interna de P, considerando a população de *testcrosses* avaliada neste estudo.

Agradecimentos

Aos técnicos Fábio Rabelo Soares, Eduardo Elias de Faria e Gislene Rodrigues Braga Cristeli, pelo apoio na condução dos experimentos. À Embrapa, à Capes, ao CNPq, à Fapemig e ao GCP pelo apoio financeiro.

Referências

ALVES, V. M. C.; PARENTONI, S. N.; MARRIEL, I. E.;
VASCONCELLOS, C. A.; PITTA, G. V. E.; PURCINO, A. A. C.
Eficiência nutricional em milho: a experiência da Embrapa Milho e Sorgo. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 23.,

2000, Uberlândia. **Resumos expandidos**. Sete Lagoas: ABMS: Embrapa Milho e Sorgo; Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2000. 1 CD-ROM.

BRASIL, E. C.; ALVES, V. M. C.; MARRIEL, I. E.; PITTA, G. V.; CARVALHO, J. G. de. Dry matter and mineral nutrition in efficient corn genotypes in relation to phosphorus acquisition. **Ciência Agrotécnica**, v. 31, n. 3, p. 704-712, 2007.

CRUZ, C. D. **Programa Genes**: biometria. Viçosa, MG: UFV, 2006. 382 p.

FURLANI, A. M. C.; FURLANI, P. R.; TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A.; DELGADO, M. das D. P. Variability of soybean germplasm in relation to phosphorus uptake and use efficiency. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, n. 3, p. 529-536, 2002.

HALLAUER, A. R.; CARENA, M. J.; MIRANDA FILHO, J. B. **Quantitative genetics in maize breeding**. New York: Springer, 2010. 663 p.

HUND, A.; TRACHSEL, S.; STAMP, P. Growth of axile and lateral roots of maize: development of a phenotyping platform. **Plant and Soil**, The Hague, v. 325, p. 335-349, 2009.

JAIN, A.; VASCONCELOS, M. J.; SAHI, S. V.; RAGHOTHAMA, K. G. Molecular mechanisms of plant adaptation to phosphate deficiency. **Plant Breeding Reviews**, New York, v. 29, p. 359-419, 2007.

LIU, J.; LI, J.; CHEN, F.; ZHANG, F.; REN, T.; ZHUANG, Z.; MI, G. Mapping QTLs for root traits under different nitrate levels at the seedling stage in maize (*Zea mays* L.). **Plant and Soil**, The Hague, v. 305, p. 253-265, 2008.

LYNCH, J. P. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: tools for future crops. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 156, p. 1041-1049, 2011.

LYNCH, J. P.; BROWN, K. M. New roots for agriculture: exploiting the root phenome. **Philosophical Transactions**, London, v. 367, p. 1598-1604, 2012.

MAGNAVACA, R.; GARDNER, C. O.; CLARCK, R. B. Evaluation of maize inbred lines for aluminum tolerance in nutrient solution. In: GABELMAN, H. W.; LONGHMAN, B. C. (Ed.). **Genetic aspects of plant mineral nutrition**. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1987. p. 255-265.

MENDES, F. F.; PARENTONI, S. N.; GUIMARAES, L. J. M.; GUIMARAES, P. E. O.; GOMES, P. H. F.; OLIVEIRA, K. G. de; REIS, D. P.; TAVARES, R. B. Seleção simultânea para eficiência de uso e resposta ao fósforo em híbridos de milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, 6., 2011, Búzios. **Panorama atual e perspectivas do melhoramento de plantas no Brasil**. [Búzios]: SBMP, 2011. 1 CD-ROM.

MOLL, R. H.; KAMPRATH, E. J.; JACKSON, W. A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, n. 3, p. 562-564, 1981.

NEGRI, B. F.; AZEVEDO, G. C.; MATOS, F. M.; GUIMARÃES, C. T.; SOUSA, S. M. de. **Morfologia do sistema radicular de linhagens recombinantes endogâmicas de milho sob baixo nível de fósforo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 50).

PARENTONI, S. N.; SOUZA JÚNIOR, C. L. de. Phosphorus acquisition and internal utilization efficiency in tropical maize genotypes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 7, p. 893-901, 2008.

PARENTONI, S. N.; SOUZA JÚNIOR, C. L. de; ALVES, V. M. C.; GAMA, E. E. G.; COELHO, A. M.; OLIVEIRA, A. C. de; GUIMARÃES, C. T.; VASCONCELOS, M. J. V. de; PACHECO, C. A. P.; MEIRELLES, W. F.; MAGALHÃES, J. V. de; GUIMARÃES, L. J. M.; SILVA, A. R. da; MENDES, F. F.; SCHAFFERT, R. E. Inheritance and breeding strategies for phosphorus efficiency in tropical maize (*Zea mays* L.). **Maydica**, Bergamo, v. 55, n. 1, p. 1-15, 2010.

PARENTONI, S. N.; MENDES, F. F.; GUIMARÃES, L. J. M. Melhoramento para eficiência no uso de P. In: FRITSCHÉ NETO, R.; BORÉM, A. (Ed.). **Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos**. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2011. p. 250-255.

RESENDE, M. D. V. **Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético**. Colombo: Embrapa Florestas, 2007. 561p.

SILVA, F. C. da (Org.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, DF : Embrapa Comunicação para

Transferência de Tecnologia; Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 1999. 370 p.

SOUSA, S. M. de; RANDY, T.; CLARK, R. T.; MENDES, F. F.; OLIVEIRA, A. C.; VASCONCELOS, M. J. V.; PARENTONI, S. N.; KOCHIAN, L. V.; GUIMARÃES, C. T.; MAGALHÃES, J. V. A role for root morphology and related candidate genes in P acquisition efficiency in maize. **Functional Plant Biology**, Victoria, v. 39, n. 11, p. 925-935, 2012.

SAS INSTITUTE. **SAS STAT 9.2 user's guide**. Cary, 1999. v. 6.

TRACHSEL, S.; KAEPLER, S. M.; BROWN, K. M.; LYNCH, J. P. Shovelomics: high throughput phenotyping of maize (*Zea mays* L.) root architecture in the field. **Plant and Soil**, The Hague, v. 341, p. 75-87, 2011.

ZHU, J.; MICKELSON, S. M.; KAEPLER, S. M.; LYNCH, J. P. Detection of quantitative trait loci for seminal root traits in maize (*Zea mays* L.) seedlings grown under differential phosphorus levels. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 113, p. 1-10, 2006.

ZHU, J. M.; KAEPLER, S. M.; LYNCH, J. P. Mapping of QTL controlling root hair length in maize (*Zea mays* L.) under phosphorus deficiency. **Plant and Soil**, The Hague, v. 270, p. 299-310, 2005a.

ZHU, J. M.; KAEPLER, S. M.; LYNCH, J. P. Mapping of QTLs for lateral root branching and length in maize (*Zea mays* L.) under differential phosphorus supply. **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 111, p. 688-695, 2005b.



Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento

