

JAEVESON DA SILVA

**IDENTIFICAÇÃO DE GENITORES DE MILHO PARA SOLOS COM
BAIXA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2005

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S586i
2005
Silva, Jaeveson da, 1974-
Identificação de genitores de milho para solos com baixa
disponibilidade de fósforo / Jaeveson da Silva. – Viçosa :
UFV, 2005.
xv, 83f. : il. ; 29cm.

Orientador: Glauco Vieira Miranda.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de
Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 71-83.

1. Milho - Melhoramento genético. 2. Milho - Seleção.
3. Interação genótipo-ambiente. 4. Milho - Efeito do
fósforo. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 633.152

JAEVESON DA SILVA

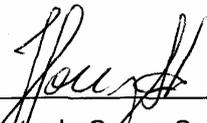
IDENTIFICAÇÃO DE GENITORES DE MILHO PARA SOLOS COM BAIXA
DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO

Tese apresentada à Universidade Federal
de Viçosa, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Fitotecnia, para obtenção do título de
Doctor Scientiae.

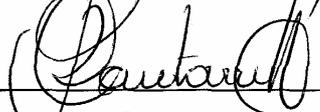
APROVADA: 08 de dezembro de 2005.



Prof. Paulo César Rezende Fontes



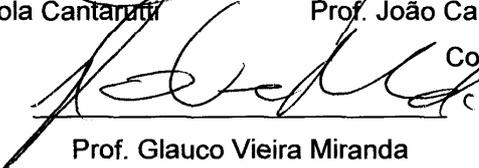
Prof. Fausto de Souza Sobrinho



Prof. Reinaldo Bertola Cantarini



Prof. João Carlos Cardoso Galvão
Conselheiro



Prof. Glauco Vieira Miranda
Orientador

“Quanto mais sábio foi o pregador, tanto mais sabedoria ensinou ao povo. Estudou, inventou, e compôs muitos provérbios. Procurou o pregador achar palavras certas, e o que escreveu é reto e verdadeiro. As palavras dos sábios são como agulhões, e como pregos bem fixados são as palavras coligidas dos mestres, as quais nos foram dadas pelo único pastor. Demais disto, filho meu, atenta: Não há limite para fazer livros, e muito estudar é enfado da carne.

De tudo o que se tem ouvido, a conclusão é: Teme a Deus, e guarda os seus mandamentos, pois isto é todo o dever do homem. Porque Deus há de trazer a juízo toda obra, inclusive tudo o que está encoberto, quer seja bom, quer seja mau.”

Eclesiastes, cap. 12, v.9-14 (Bíblia Sagrada)

Dedico esta obra a todos os meus familiares,
em especial à minha esposa, Achilles Sanches de Oliveira Silva,
e aos meus pais, Francisco Jayme da Silva e Maria Glória da
Silva, pois, com a perseverança e a atenção prestadas,
animaram meus pensamentos.

AGRADECIMENTO

Ao único e verdadeiro Deus, que com grande motivação dá sentido a tudo que somos e fazemos.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Fitotecnia, pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo e pelo apoio no projeto de tese.

Ao professor Dr. Glauco Vieira Miranda, pela orientação e amizade.

Ao professor Dr. Liovando Marciano da Costa, pela sua amizade e pelo aconselhamento.

Aos demais conselheiros da tese, pelas críticas e sugestões,

Ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da UFV, pela aceitação e por toda estrutura necessária no curso de doutorado.

Aos professores da UFV, pelo ensino e pelo apoio.

Aos colegas, alunos de Pós-Graduação da UFV, em especial ao Marcelo Cleon de Castro Silva, Franciscleudo Bezerra da Costa e Roberto Cleiton Fernandes de Queiroga, pelas gentilezas e pelos favores prestados.

BIOGRAFIA

JAEVESON DA SILVA, filho de Francisco Jaime da Silva e Maria Glória da Silva, nasceu em Mossoró, Estado do Rio Grande do Norte, em 5 de maio de 1974.

Em 1992, iniciou o curso superior em Agronomia da Escola Superior de Agricultura de Mossoró, Mossoró-RN, graduando-se em julho de 1997.

Em 1998, iniciou o Programa de Pós-Graduação de Mestrado em Fitotecnia da Escola Superior de Agricultura de Mossoró, sob a orientação do professor Paulo Sérgio Lima e Silva, defendendo tese em agosto de 2000.

Em 2001, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, em nível de Doutorado, na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

Desde outubro de 2003, atua como pesquisador da Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, em Cruz das Almas-BA, na área de Sistemas de Produção Vegetal.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
RESUMO.....	xii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1. Experimentos.....	15
3.1.1. Experimento em casa de vegetação	15
3.1.2. Experimentos em campo	18
3.2. Análises dos dados	19
3.2.1. Análise de variância	19
3.2.2. Análises genéticas.....	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
4.1. Experimentos em casa de vegetação.....	23
4.1.1. Análise de variância	23
4.1.2. Produtividade de biomassa	25
4.1.3. Teores e acúmulos de P na planta	28
4.1.4. Relação parte aérea/raiz	33
4.1.5. Índices de eficiência	35
4.1.6. Análise de correlação	41

	Página
4.1.7. Análises dialélicas	44
4.2. Experimento de campo.....	52
4.2.1. Análise de variância, produtividade de grãos e alturas de plantas e de espigas	52
4.2.2. Índices de eficiência	60
4.2.3. Análises dialélicas	63
4.3. Comparação de informações de campo e casa de vegetação..	68
5. CONCLUSÕES	70
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

LISTA DE TABELAS

		Página
1	Características dos cultivares utilizados no experimento	16
2	Caracterização geográfica, climática e de fertilidade do solo de Viçosa, Capinópolis, Coimbra e Florestal. Viçosa, 2003 ...	19
3	Esquema da análise de variância para os T tratamentos e D doses no esquema inteiramente casualizado.....	20
4	Esquema da análise de variância conjunta para os T tratamentos e A ambientes no esquema de blocos ao acaso	20
5	Resumo da análise de variância para biomassas secas da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e planta inteira (MSP) e de teor de fósforo nas biomassas secas da parte aérea (TTPA) e raiz (TPR) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003.....	24
6	Resumo da análise de variância para fósforo acumulado nas biomassas secas da parte aérea (PAPA), raiz (PAR) e planta inteira (PAP) e das relações parte aérea/raiz da biomassa seca (RPRMS) e de fósforo acumulado (RPRPA) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003	24
7	Biomassas secas da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e planta inteira (MSP) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003	26
8	Redução relativa das biomassas secas da parte aérea, raiz e planta inteira, de genótipos de milho cultivados em vaso, em relação ao solo com alto nível de P.....	27

	Página	
9	Teor de P na parte aérea (TPPA) e raiz (TPR) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003.....	29
10	Acúmulo de P na parte aérea (PAPA), raiz (PAR) e planta (PAP) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003 .	30
11	Redução relativa de P acumulado nas biomassas secas da parte aérea, raiz e planta inteira de genótipos de milho cultivados em vaso, em relação ao solo com alto nível de P. Viçosa, 2003.....	31
12	Relações parte aérea/raiz para biomassa seca (RPRMS) e P acumulado (RPRPA) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003	34
13	Índices de eficiência de produção de biomassa sob estresse (EU), resposta à utilização do nutriente (RU), eficiência de utilização (IE) translocação (ET), recuperação (ER), fisiológica (EF) e de suscetibilidade ao estresse (S) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003	37
14	Correlações de Pearson entre características da planta, em alta e baixa disponibilidade de P de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003.....	42
15	Correlações de Pearson entre características da planta e índices de eficiência e de suscetibilidade ao estresse de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003	43
16	Resumo da análise dialélica individual da biomassa seca da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e planta inteira (MSP), teores de P na parte aérea (TPPA) e raiz (TPPR), P acumulado na parte aérea (PAPA), raiz (PAR) e planta (PAP) e relações parte aérea/raiz da biomassa seca (RPRMS) e P acumulado (RPRPA) de genótipos de milho cultivados em vasos. Viçosa, 2003.....	45
17	Resumo da análise dialélica conjunta para a biomassa seca da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e planta inteira (MSP), teores de P na parte aérea (TPPA) e raiz (TPPR), P acumulado na parte aérea (PAPA), raiz (PAR) e planta (PAP) e relações parte aérea/raiz da biomassa seca (RPRMS) e P acumulado (RPRPA) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003	46
18	Capacidades geral (CGC) e específica (CEC) de combinação para biomassas secas da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e planta inteira (MSP) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003	47

	Página
19 Capacidades geral (CGC) e específica (CEC) de combinação para teores de P na parte aérea (TPPA) e raiz (TPR) de genótipos de milho, em vaso. Viçosa, 2003.....	49
20 Capacidades geral (CGC) e específica (CEC) de combinação para P acumulado na parte aérea (PAPA), raiz (PAR) e planta (PAP) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003	50
21 Capacidades geral (CGC) e específica (CEC) de combinação para relações parte aérea/raiz da biomassa seca (RPRMS) e P acumulado (RPRPA) de genótipos de milho, em vaso. Viçosa, 2003.....	51
22 Resumo da análise de variância individual para produtividade de grãos (kg ha ⁻¹) e alturas da planta e da espiga (cm) de genótipos de milho cultivados em campo, nas localidades de Viçosa (1, 2 e 3), Capinópolis (4), Coimbra (5) e Florestal (6), em 2003.....	53
23 Resumo da análise de variância conjunta, para produtividade de grãos e de espigas (kg ha ⁻¹) e alturas da planta e da espiga (cm) de genótipos de milho cultivados em campo, em 2003.....	54
24 Médias de produtividade de grãos (t ha ⁻¹) de genótipos de milho cultivados em campo, nas localidades de Viçosa (1, 2 e 3), Capinópolis (4), Coimbra (5) e Florestal (6), em 2003 ...	55
25 Redução (%) da potencial produtivo de genótipos de milho cultivados em campo, nas localidades de Viçosa (1, 2 e 3), Capinópolis (4), Coimbra (5) e Florestal (6), em relação ao experimento com alto nível de P	56
26 Alturas da planta e da espiga (cm) de genótipos de milho cultivados em campo, nas localidades de Viçosa (3), Capinópolis (4), Coimbra (5) e Florestal (6).....	59
27 Produtividade de grãos (t ha ⁻¹) em alta e baixa disponibilidade de P (EU), a resposta à utilização de P (RU) e índice de suscetibilidade ao estresse (S) de genótipos de milho cultivados em campo, em 2003	61
28 Correlação entre produtividade de grãos e índices de eficiência de genótipos de milho cultivados em campo, em 2003	63

	Página	
29	Resumo da análise dialélica individual para produtividade de grãos de genótipos de milho cultivados em campo, nas localidades de Viçosa (1, 2 e 3), Capinópolis (4), Coimbra (5) e Florestal (6) (Quadrados médios), em 2003.....	64
30	Resumo da análise dialélica conjunta para produtividade de grãos de genótipos de milho cultivados em campo, com desdobramento do efeito de combinações híbridas em capacidade geral e específica de combinação para CGC e CEC, respectivamente, em 2003.....	64
31	Capacidade geral (CGC) e específica (CEC) combinação (CGC) de produtividade de grãos ($t\ ha^{-1}$) de genótipos de milho cultivados em campo, nas localidades de Viçosa (1, 2 e 3), Capinópolis (4), Coimbra (5) e Florestal (6)	65
32	Correlação entre produtividade de grãos (PG) e capacidade específica de combinação (CEC) em locais de intensidade contrastantes de estresse.....	67
33	Correlação entre a produtividade de grãos (PG) cultivados em campo, e a biomassa seca da parte aérea (MS), em vasos, de genótipos de milho, em 2003	69

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Eficiência no uso e resposta à aplicação de fósforo de genótipos de milho, em vaso (eixo das abscissas: EU; eixo das ordenadas: RU).	38
2 Eficiência no uso e resposta à aplicação de fósforo de genótipos de milho, em campo (eixo das abscissas: EU; eixo das ordenadas: RU), no ano de 2003	62

RESUMO

SILVA, Jaeveson da, D.S., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2005. **Identificação de genitores de milho para solos com baixa disponibilidade de fósforo.** Orientador: Glauco Vieira Miranda
Conselheiros: Liovando Marciano da Costa e João Carlos Cardoso Galvão.

A alta demanda por alimentos pode trazer sérios riscos à qualidade de vida da população mundial. No entanto, o crescimento da oferta dos produtos agrícolas pode ser obtido através do aumento da área e, ou, da produtividade. Um meio economicamente viável para atingir esta meta é utilizar cultivares que sejam produtivos em ambientes tecnificados e, ou, que não reduzam sua produção quando na presença de algum tipo de estresse. Em geral, as novas áreas agrícolas não têm condições ideais para o cultivo. O manejo do solo tem se apresentado como um dos principais componentes para melhorar o ambiente, aliado ao uso de variedades de plantas que adquiram e utilizem eficientemente os nutrientes disponíveis na solução e sob adsorção nos minerais do solo, principalmente o fósforo (P). Os objetivos deste trabalho também foram identificar genótipos de milho produtivos em solo com baixa disponibilidade de P e verificar a eficácia dos métodos de classificação na seleção das plantas produtivas e eficientes e na seleção precoce de plantas (casa de vegetação). Dois experimentos foram conduzidos em Viçosa-MG, um em casa de vegetação (seleção precoce), em 2002, e o outro em campo, em

2002/2003, considerando dois níveis de disponibilidade de P no solo. Outros quatro experimentos foram realizados em condições de campo, em Viçosa, Capinópolis, Coimbra e Florestal (Minas Gerais), considerando os níveis de adubação utilizados pelos agricultores. Como tratamentos foram considerados 23 genótipos de milho, sendo 15 combinações híbridas (CH) e oito cultivares. As 15 CH foram advindas da combinação de seis desses cultivares. Nos genótipos foram avaliados, em casa de vegetação, as massas secas e os teores e acúmulos de P na parte aérea, raiz e planta inteira, como também as relações parte aérea/raiz de massa seca e P acumulado. Em campo, foram avaliadas a produtividade de grãos e as alturas de planta e de espiga. Os dados foram submetidos às análises de variância simples e conjunta, ao teste de médias e às análises de correlação e dialélicas, bem como a alguns índices de eficiência nutricionais (IEN), para comparação dos genótipos quanto à tolerância e ao uso de P. Na seleção precoce de plantas, considerando a massa seca da parte aérea, as combinações híbridas CH 3 x 6 e CH 3 x 5 e os genitores AG 9010 e Caiano foram classificados como importantes para obtenção de cultivares produtivos quando em baixa disponibilidade de P. Em campo, quanto à produtividade de grãos, destacaram-se novamente os genótipos CH 3 x 6, AG 9010 e, também, o CH 1 x 3. A seleção precoce foi eficiente, pois possibilitou a presença de diferenças entre plantas quanto à aquisição e ao uso de P, assemelhando-se, em alguns casos, com os resultados obtidos em campo. Houve diferença na classificação dos genótipos, dependendo dos IEN, portanto devem-se utilizar aqueles com maior correlação com os dados de produtividade.

ABSTRACT

SILVA, Jaeveson da, D.S., Universidade Federal de Viçosa, December, 2005.
Identification of corn genitors for soils with low phosphorus availability.
Adviser: Glauco Vieira Miranda. Committee members: Liovando Marciano da Costa and João Carlos Cardoso Galvão.

The high demand for foods can lead to severe risks to the quality of life of the worldwide population. However, the increase in the supply of agricultural products can be obtained by the increase of the area and / or yield. An economically viable method to reach this goal is to use high yielding cultivars in technified environments and / or that do not reduce its yield in the presence of some type of stress. In general, new agricultural frontiers do not have the ideal conditions for cultivation. Soil management has presented as one of the main components to improve the environment, along with the use of plant varieties that acquire and use the available nutrients efficiently in the solution and under adsorption in soil minerals, especially phosphorus (P). The objectives of this work were also to identify high yielding corn genotypes in soils presenting low P availability and verify the efficacy of the methods of classification in the selection of high yielding and efficient plants and of the early selection of plants (greenhouse). Two experiments were conducted in Viçosa-MG: one under greenhouse conditions (early selection), in 2002, and the other in the field, in 2002/2003, considering two levels of P availability in the soil. Other four experiments were conducted under field conditions, in Viçosa, Capinópolis,

Coimbra and Florestal (Minas Gerais), considering the levels of fertilizers used by the producers. Twenty-three corn genotypes were considered as the treatments, being 15 hybrid combinations (HC) and eight cultivars. The 15 HC proceeded from the combination of six of these cultivars. For the genotypes under greenhouse conditions, the dry matter and the amount of P accumulated in the canopy, root and entire plant, as well as the canopy/root ratio of dry matter and accumulated P, were evaluated. In the field, grain yield and plant and ear height were evaluated. The data was submitted to simple and combined variance analysis, average tests and diallel and correlation analysis as well as to some nutritional efficiency indexes (NEI), for the comparison of the genotypes regarding tolerance and P use. In the early selection of plants, considering dry matter of canopy, the hybrid combinations HC 3 x 6 and HC 3 x 5 and the genitors AG 9010 and Caiano, were considered important for the obtainment of productive cultivars under low P availability. In the field, regarding grain yield, again, the genotypes HC 3 x 6, AG 9010 and also HC 1 x 3, were pointed out. The early selection was efficient, for it enabled the obtainment of differences between plants regarding the acquisition and use of P, resembling, in some cases, the results obtained in the field. There was difference in the classification of the genotypes depending on the NEI, therefore, those presenting greater correlation with the yield data should be used.

1. INTRODUÇÃO

A alta demanda por alimentos pode trazer sérios riscos à qualidade de vida da população mundial. No entanto, o crescimento da oferta dos produtos agrícolas pode ser obtido através do aumento da área e, ou, da produtividade. Em geral, as novas áreas agrícolas não têm condições ideais para o cultivo. O manejo do solo tem se apresentado como um dos principais componentes para melhorar esse ambiente de cultivo, aliado ao uso de variedades de plantas que adquiram e utilizem eficientemente os nutrientes disponíveis na solução e sob adsorção nos minerais do solo, principalmente o fósforo (P).

Os solos de zonas tropicais sob vegetação de cerrado apresentam acidez elevada e baixa disponibilidade de nutrientes. Estas características são dependentes da natureza do solo e do alto grau de intemperismo ocasionado por fatores climáticos (KER *et al.*, 1992). O uso de sistemas e práticas de cultivos inadequados para esses solos promove a redução da qualidade do solo, principalmente quanto à fertilidade, impedindo as plantas de atingirem o potencial produtivo, além de reduzir o retorno econômico e a sustentabilidade ambiental e social (CECCARELLI, 1996; PRASAD, 1996; FAGERIA, 1998; HAMMOND *et al.*, 2004).

O fósforo, dentre os macronutrientes, é um dos principais limitantes da produtividade, mesmo sendo requerido pela planta em menores quantidades, comparado com o nitrogênio e potássio. No solo, a deficiência de P é devido ao baixo teor natural e à sua retenção pelos minerais de argila, principalmente os

que contêm óxidos de ferro e alumínio, geralmente em condições de acidez. Nesse último caso, para aumentar a fertilidade dos solos utilizam-se, freqüentemente, a calagem e a adubação mineral. No entanto, a eficiência de adubação com P geralmente tem sido baixa, uma vez que, do total adicionado ao solo, a maior parte torna-se imóvel ou indisponível (SANCHEZ e SALINAS, 1981; MARSCHNER, 1995; BRADY e WEIL, 1996; HOLFORD, 1997).

Atualmente, a adoção de práticas apropriadas de manejo de solo e da planta e o uso de sistemas sustentáveis de cultivo, como plantio direto, rotação de culturas e adubação orgânica, têm possibilitado a adequação de cultivo em solos de baixa fertilidade. Adicionalmente, o uso também de cultivares tolerantes e produtivos à baixa disponibilidade de nutrientes do solo (alta eficiência nutricional) e as condições climáticas não-otimizadas têm sido importantes para o aumento da eficiência e rentabilidade desses sistemas sustentáveis de cultivo (MAGALHÃES *et al.*, 1991; FAGERIA, 1998; VASCONCELLOS *et al.*, 1999; BETRÁN *et al.*, 2003; FIDELIS, 2003; SOUZA, 2003; HAMMOND *et al.*, 2004). Comparativamente ao manejo do solo, o uso desses cultivares, além de apresentar custo inferior, não tem causado impacto negativo ao ambiente e não exige mudanças bruscas nas práticas de cultivo. Estas características, possivelmente, têm facilitado a sua adoção pelos agricultores.

No melhoramento do milho, a maior prioridade foi para o desenvolvimento de cultivares mais produtivos em condições tecnificadas. No entanto, com a necessidade de utilizar uma agricultura sustentável, que contempla todas as categorias de produtores, e o advento da biotecnologia com processos seletivos mais eficientes, os melhoristas também têm despertado interesse para o melhoramento produtivo dessa cultura, e de outras, em locais com limitações climáticas e nutricionais (HORST *et al.*, 1993; CECCARELLI, 1996, OLIVEIRA *et al.*, 1999; FURLANI *et al.*, 2002). As técnicas de biotecnologia, principalmente com a identificação de genes patenteáveis, têm incentivado a descoberta de novos procedimentos para seleção de plantas em condições de estresses abióticos (restrições edafoclimáticas para o ótimo desenvolvimento da planta).

As técnicas de classificação e, ou, seleção de plantas sob estresses abióticos ainda necessitam ser mais bem estabelecidas, principalmente em

virtude da presença de maiores interações dos genótipos com o ambiente, sob pena de haver ineficiência do processo de melhoramento na obtenção de melhores plantas quanto ao caráter de interesse. A identificação do controle genético da eficiência nutricional (absorção e utilização do nutriente) e de métodos experimentais para seleção das plantas são fatores que também determinarão a eficiência dos métodos de melhoramento (SCOTT e FISHER, 1993).

A seleção de plantas em condições de estresse abiótico geralmente se baseia em experimentos onde os genótipos são submetidos a situações contrastantes do estresse (nutricional ou climático), simulando vários níveis do estresse ou simplesmente condições de ausência e presença deste. O uso de delineamentos que reduzem eficientemente a variação ambiental, como mencionado, deve ser priorizado nesses experimentos (BÄNZIGER e LATIFFE, 1997). Os métodos de seleção estabelecidos para as plantas nos primeiros estádios de desenvolvimentos (seleção precoce) podem ser importantes, pois, além de reduzirem o intervalo entre gerações, podem testar número elevado de genótipos (MACHADO *et al.*, 2004).

A escolha dos melhores cultivares, que está relacionada principalmente com a produtividade, pode e deve também estar apoiada nos resultados experimentais e nas estimativas de parâmetros genéticos relacionados aos possíveis mecanismos de tolerância (GOURLEY *et al.*, 1993; HOHLS, 2001). Parâmetros genéticos como adaptabilidade, capacidades de combinação geral (CGC) e específica (CEC), herdabilidades e correlações são importantes para inferir sobre o controle genético, na escolha dos métodos de melhoramento e na indicação dos novos cultivares (FAGERIA, 1998; OLIVEIRA *et al.*, 1998; RIBEIRO, 2000; BETRÁN *et al.*, 2003).

Os objetivos deste trabalho foram identificar genótipos eficientes na absorção e, ou, utilização de fósforo e o seu controle genético, como também os métodos de classificação eficientes na detecção dos melhores genótipos, e verificar a eficiência em selecionar precocemente as plantas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O milho, como cultura de importância mundial, pode ser utilizado para subsistência, ração animal, geração de divisas com a exportação e subprodutos da indústria. No Brasil e em vários países em desenvolvimento, o milho é utilizado principalmente na subsistência de agricultores familiares.

A produtividade média de grãos das lavouras de milho está muito aquém do potencial genético dos cultivares oferecidos pelos programas de melhoramento. O Brasil, em 2004, apresentou produtividade média de apenas 3,37 t ha⁻¹ de grãos, e nos últimos cinco anos, em torno de 3,25 t ha⁻¹ (IBGE, 2005). A baixa produtividade nacional é explicada pela interação de fatores econômicos, sociais e ambientais. Entre esses fatores destaca-se o uso de pequenas quantidades de insumos (corretores do solo), o que pode ser justificado pela falta de recursos financeiros, falta de assistência técnica, baixa capacidade gerencial, pelo desconhecimento de formas de comercialização, pelo uso de baixa tecnologia e de áreas secundárias com limitações nutricionais e climáticas, entre outros. De acordo com levantamento realizado em 1995, a estratificação das lavouras de milho, por níveis tecnológicos, foi assim distribuída: marginal, 43 %; baixo, 24 %; médio, 22 % e alto, 11 % (COELHO *et al.*, 2004). Para aumentar a produtividade do milho pode-se fazer uso de práticas agrícolas adequadas, principalmente com relação à correção da fertilidade do solo e ao uso de cultivares com maior eficiência nutricional, melhorando o cultivo em ambientes com a presença de estresses comuns, o

que corresponderia, considerando os níveis tecnológicos “a” e “b”, a 67% da área cultivada com o milho.

Em sistemas de cultivo com alto uso de insumos, tem-se observado produtividade média em torno de 6 a 8 t ha⁻¹ de grãos. Nos Estados Unidos, esta produtividade tem variado entre 8 e 9 t ha⁻¹. Em estudos de modelagem, o milho obteve produtividade de até 31,4 t ha⁻¹ nas condições climáticas daquele país (YAMADA, 1997). No Brasil, em condições de campo, o máximo de produtividade foi 16,8 t ha⁻¹, na safra de 1993/1994 (COELHO *et al.*, 2004), e nos Estados Unidos, em concursos de produtividade, 25 t ha⁻¹.

Os solos brasileiros de baixa fertilidade, principalmente quanto à disponibilidade de fósforo, encontram-se nas regiões com vegetação típica de cerrado, onde, para os cultivos alcançarem produtividades com retorno econômico, é necessário utilizar alta quantidade de insumos agrícolas (MACEDO, 1996). No cerrado, a maior parte dos solos é distrófica ou álica, de baixa fertilidade, com acidez elevada e alta disponibilidade de Al e Mn. Aproximadamente 50% da área dos cerrados é representada por Latossolos (LOPES, 1984; ADÂMOLI *et al.*, 1996; BALIGAR *et al.*, 2001).

Os modernos cultivares de plantas geralmente apresentam baixa eficiência de absorção de P, considerando que sua seleção tenha sido realizada sob alta disponibilidade de insumos. Com base na nova visão holística de sustentabilidade agrícola, novas pesquisas, com o objetivo de obter de plantas com maior tolerância e produtividade para condições de estresses, estão sendo realizadas (GOEDERT *et al.*, 1985).

O potencial produtivo do milho depende do cultivar (genética, morfologia e fisiologia), das interações solo-raiz (exsudação, simbiose), das relações da parte aérea com a raiz (absorção, transporte, redistribuição e utilização de nutrientes) e das interações da planta com fatores bióticos (plantas invasoras, pragas e doenças) e abióticos (clima: temperatura, precipitação pluviométrica, radiação, vento etc.; e do solo: pH, disponibilidade de nutrientes, compactação, umidade etc.) (MARTINEZ *et al.*, 1993a; BALIGAR e FAGERIA, 1999; LARCHER, 2000; BALIGAR *et al.*, 2001; MENDES e REIS JÚNIOR, 2003).

O fósforo é vital para o crescimento e o desenvolvimento da planta porque é responsável ou participante de várias funções, como o transporte de

energia, fotossíntese, transformação de açúcares e amido, movimento de nutrientes dentro da planta e transferência de características genéticas entre gerações (SULTENFUSS e DOYLE, 1999; MOREIRA, 2004).

A concentração de P na solução do solo geralmente está abaixo do teor considerado crítico para a maioria das plantas ($< 2 \text{ mg dm}^{-3}$), além de mover-se lentamente até as raízes. Este movimento de difusão até as raízes pode ainda ser dificultado pela ação de fatores do sistema solo-planta (minerais de argila, umidade, física e acidez do solo e eficiência nutricional das plantas) (BERTRAND *et al.*, 1999; NOVAIS e SMYTH, 1999). Portanto, em geral, apenas 10% do P proveniente da adubação pode ser recuperado pelas plantas (CIARELLI *et al.*, 1998).

O fósforo é o terceiro nutriente mais absorvido em quantidade pela planta de milho, sendo superado somente pelo nitrogênio e o potássio. A quantidade de P extraído do solo se eleva linearmente com o aumento da produtividade de grãos, sendo um dos fatores importantes na decisão da quantidade de adubo fosfatado a ser colocado no solo. A produtividade de $10,17 \text{ t ha}^{-1}$ de grãos pode extrair em torno de 42 kg ha^{-1} de P (COELHO e FRANÇA, 1995).

Nos estádios iniciais da planta, o suprimento inadequado de P pode comprometer a produção de biomassa e, futuramente, a produtividade de grãos. Na cultura do milho, teores foliares de P entre 2,5 a $3,5 \text{ mg g}^{-1}$ de biomassa seca têm sido suficientes para as necessidades da planta, não levando ao aparecimento de sintomas de deficiência (MALAVOLTA *et al.*, 1997).

Quando o P é limitante, ocorre redução da biomassa de vários órgãos e do metabolismo das plantas, afetando o número e a expansão da área foliar, o crescimento da parte aérea e da raiz, a relação parte aérea/raiz da biomassa seca e a utilização de carboidratos. A presença de folhas verde-escuras ou púrpuras é sintoma comum nas folhas, principalmente de plantas jovens (SULTENFUSS e DOYLE, 1999; MOREIRA, 2004).

As restrições de fornecimento de carbono à planta explicam parte dos sintomas de deficiência de fósforo. Em milho, pela redução da taxa de emissão e crescimento das folhas, há diminuição da área foliar e, conseqüentemente, de captação da radiação solar e menor produção de carboidratos. A baixa disponibilidade de carboidratos para as raízes causa menor produção de

biomassa ou crescimento radicular e, assim, proporciona exploração limitada do solo e menor absorção de P, de outros nutrientes e de água (FREDEEN *et al.*, 1989; GRANT *et al.*, 2001).

O mecanismo comum da tolerância das plantas, como resposta à baixa disponibilidade de P no solo, é reduzir o crescimento total, da parte aérea ou de outros órgãos, mantendo-o em concentração adequada nos tecidos, o que evita alterações em vários processos metabólicos (MARSCHNER, 1995; LARCHER, 2000). No florescimento e enchimento de grãos, as plantas deficientes em P podem reduzir o número de grãos/espiga para mantê-lo em teor adequado nesse órgão reprodutivo, não prejudicando uma futura germinação (MOLLIER e PELLERIN, 1999; PLÉNET *et al.*, 2000 a, b).

Comparativamente às leguminosas, as gramíneas apresentam maior tolerância a baixos níveis de disponibilidade de P no solo, por apresentar maior crescimento radicular, maior número de raízes finas e pêlos radiculares e dividir o fósforo entre raiz e parte aérea na mesma proporção relativa (independentemente da disponibilidade de P). Portanto, as diferenças na morfologia radicular, quanto à absorção de P por unidade de raiz, à sua concentração no sistema radicular e à habilidade de translocá-lo para a parte aérea da planta, possivelmente, é a causa da maior eficiência das gramíneas na absorção desse nutriente (CARADUS, 1980).

A eficiência das plantas em absorver o P pode ser definida como o resultado da interação de características morfológicas e fisiológicas das raízes, da rizosfera imediatamente adjacente ao sistema radicular e de fatores do solo que determinam o fluxo de nutrientes para a interface solo-raiz. Quando o acesso da raiz ao nutriente é fator limitante, suas características morfológicas podem ser consideradas críticas e a eficiência do mecanismo fisiológico de absorção, de importância secundária. Entretanto, quando não há limitação para a chegada de íons à superfície radicular, os fatores fisiológicos podem ser decisivos (ALVES *et al.*, 2002).

Os mecanismos que conferem maior eficiência nutricional das plantas ao P podem ser agrupados naqueles que aumentam sua absorção, com o mínimo de investimento no crescimento radicular, e nos que aumentam sua utilização, ou seja, na capacidade de produção da biomassa ou no componente econômico da planta para cada unidade do nutriente acumulado (ELLIOTT e

LÄUCHLI, 1985; HAMMOND *et al.*, 2004). Plantas com altas taxas de crescimento geralmente têm maior eficiência de utilização, e as variedades antigas ou locais têm maior tolerância a solos de baixa fertilidade, seja pela maior eficiência de absorção ou de conversão do P em biomassa, embora com produtividade limitada, quando comparadas aos híbridos e às variedades melhoradas (ARAÚJO, 2000; RESENDE *et al.*, 2000).

A presença de variabilidade genética para características que conferem maior potencial produtivo possibilita a seleção e o melhoramento das plantas, podendo ser realizada de forma intra e, ou, interpopulacional, desde que as plantas possam ser selecionadas dentro de uma variedade ou a partir do cruzamento de duas ou mais variedades, respectivamente. Diferenças na produtividade dos cultivares de milho em condições de solo com baixa disponibilidade de P indicam a variabilidade genética, o que permite identificar germoplasmas para programas de melhoramento (CLARK, 1983; CIARELLI *et al.*, 1998; BÄNZIGER e COOPER, 2001; MACHADO *et al.*, 2001; ALVES *et al.*, 2002; HAMMOND *et al.*, 2004).

O uso de variedades melhoradas e de híbridos de milho, específicos para o cultivo em condições com presença de estresses, tem contribuído significativamente para o aumento da produtividade e a qualidade dos grãos (BETRÁN *et al.*, 2003). Os híbridos, nesse aspecto, freqüentemente superam as variedades, possivelmente pela maior eficiência em obter no mesmo genótipo alto potencial produtivo e adaptativo (DUVICK, 1997). Pandey *et al.* (1994), em locais com estresse, verificaram que o cruzamento entre populações tolerantes tem originado os melhores híbridos em relação ao cruzamento de populações tolerante-sensíveis ou sensível-sensíveis.

Cultivares de milhos antigos ou crioulos, adaptados a solos de baixa fertilidade, geralmente apresentam menor potencial produtivo, mesmo após a seleção intrapopulacional (MACHADO *et al.*, 2004). Portanto, o ganho de seleção para produtividade, nesses cultivares, provavelmente será baixo. Populações de plantas que forneçam maiores tolerâncias ao estresse e também potencial produtivo possibilitarão a obtenção de cultivares aptos para o plantio em solos de baixa fertilidade. A combinação de populações divergentes, que sejam tolerantes e, ou, produtivas, garante a maior possibilidade de ganhos de seleção (GAMA *et al.*, 2002; SOUZA, 2003).

O conhecimento da herança dos caracteres e dos mecanismos envolvidos na eficiência nutricional (absorção e utilização) em solos com baixa disponibilidade de P é importante para direcionar o melhorista ao método de melhoramento para maior eficiência de seleção das plantas (ALVES *et al.*, 2001; GAUME *et al.*, 2001; YUN e KAEPLER, 2001).

Vários mecanismos podem atuar ao mesmo tempo na planta para possibilitar maior adaptação a condições de estresse, o que requer a atuação de muitos genes (ação poligênica). Portanto, a dedução do potencial genético a partir da expressão fenotípica desses caracteres não é segura, em virtude da interação com o local (CLARKSON e HANSON, 1980; HAMMOND *et al.*, 2004).

Na transferência dos genes de tolerância, geralmente de herança quantitativa, a herdabilidade e o ganho de seleção são relativamente baixos (ALLARD, 1971; BLISS, 1989). Diante disso, os melhoristas têm utilizado técnicas de biotecnologia, como os marcadores moleculares, o mapeamento, a genômica, a proteômica e a metaboloma, para aumentar a eficiência de seleção e reduzir o tempo de obtenção de novos cultivares (CLARK e DUNCAN, 1991; AUSTIN e LEE, 1998). No entanto, a aplicação dessas técnicas ainda é limitada, seja pela falta de recursos ou de conhecimento, devendo-se ressaltar que a maioria dos melhoristas tem selecionado as plantas com base nos métodos de melhoramento tradicionais (BETRÁN *et al.*, 2003). No entanto, no contexto de melhoramento de plantas para o cultivo em condições com presença de estresses, é necessário o aperfeiçoamento dos últimos métodos, visto que a interação genótipos x locais é de elevada magnitude e pode comprometer o ganho de seleção (ALLARD, 1971; GRANADOS *et al.*, 1993).

A escolha dos melhores cultivares para formação de híbridos é uma etapa decisiva no melhoramento de plantas, pois permite que os esforços do melhorista sejam dedicados apenas às populações com maior probabilidade de fornecerem progênies com capacidade de combinação superior. A análise dialélica é ferramenta útil nessa etapa, em que podem ser obtidas as capacidades de combinação geral (CGC) e específica (CEC). A CGC é definida como sendo o desempenho médio de um genitor em uma série de combinações híbridas e a CEC, como a diferença do comportamento das combinações híbridas em relação ao que será esperado com base na CGC

(SPRAGUE e TATUM, 1942). Combinações híbridas com maiores CEC e que têm um dos genitores apresentando alta CGC são importantes para o melhoramento, implicando o uso de método de melhoramento interpopulacional. Dessa forma, obtêm-se híbridos com maiores potenciais produtivos e tolerantes ao estresse (CRUZ e REGAZZI, 2001; BETRÁN *et al.*, 2003).

Quando o efeito genético é do tipo aditivo, faz-se uso apenas do melhoramento intrapopulacional, e se for não-aditivo, utilizam-se métodos que se baseiam na combinação de duas ou mais populações. Geralmente, o controle genético encontrado nas características relacionadas à produtividade é explicado tanto por efeitos aditivos quanto não-aditivos (PANDEY *et al.*, 1994; CEBALLOS *et al.*, 1998; FURLANI *et al.*, 1998; BETRÁN *et al.*, 2003; MACHADO *et al.*, 2004).

A adaptação das plantas à baixa disponibilidade de P não está totalmente esclarecida, mas pode ser entendida como a capacidade das plantas em desenvolverem mecanismos de adaptação para superar essa limitação, aumentando a eficiência quanto à absorção e utilização, o que, conseqüentemente, aumenta a produtividade (BLAIR, 1993; GOURLEY *et al.*, 1994; CIARELLI *et al.*, 1998).

Várias definições têm sido propostas para descrever a eficiência nutricional das plantas, embora, geralmente, sejam descritas por meio de fórmulas matemáticas, com base na produtividade e concentração de nutrientes no solo ou na planta. Nesse aspecto, a definição dependeria do elemento e do tipo de pesquisa (CLARK e DUNCAN, 1991). Läuchli (1987) definiu eficiência do uso de nutrientes como a relação entre a produção (grãos, biomassa e frutos) e a concentração interna de nutrientes no tecido vegetal, tendo sido denominada de eficiência de conversão por Bailian *et al.* (1991). Graham (1984) conceitua-a como a habilidade da planta em apresentar alta produção em solo deficiente em nutrientes.

Para classificação das plantas eficientes em solos com baixa disponibilidade de P, têm-se utilizado índices nutricionais com base em características radiculares e da parte aérea. Geralmente são utilizadas a biomassa seca das partes da planta e a respectiva concentração/quantidade do nutriente. No entanto, se esses índices relacionados aos mecanismos de

tolerância (maior absorção e utilização de P) não forem associados ao potencial produtivo, corre-se o risco de selecionar cultivares sem valor comercial (FURLANI e USBERTI FILHO, 1990; HOHLS, 2001; MACHADO *et al.*, 2004). Portanto, faz-se necessária a avaliação não só de alguns, mas de todas as características que comprovem o maior potencial produtivo, sob pena de estar fazendo uma seleção diferente do que se tem proposto.

No milho e em outras culturas, a eficiência na absorção de P geralmente se baseia nas características de crescimento radicular, associação simbiótica e liberação de ácidos orgânicos no solo. A eficiência quanto à utilização (requerimento interno de P para cada unidade de biomassa produzida) também é freqüentemente avaliada, embora requeira maiores conhecimentos sobre a fisiologia da planta (CLARKSON, 1985; FERNANDES, 2001; HINSINGER, 2001; ALVES *et al.*, 2002).

Como a capacidade produtiva de plantas cultivadas em baixa disponibilidade de P é devido também aos mecanismos de absorção e de utilização (conversão em biomassa) desse nutriente, é possível obter cultivares que sejam tolerantes ao estresse e que também apresentem maiores produtividades (DUVICK, 1997; BETRÁN *et al.*, 2003).

O motivo pelo qual as características radiculares são avaliadas com maior freqüência do que as da parte aérea pode ser explicado pelo fato de, para a maioria dos melhoristas, a capacidade das plantas em absorver P ser o principal diferenciador entre elas (MARTINEZ *et al.*, 1993b; MARSCHENER, 1998).

Outro ponto a ser considerado é o movimento de difusão do P até as plantas, que ocorre quando há um gradiente de concentração do nutriente entre a solução do solo e a superfície da raiz. Espera-se que esse gradiente seja contínuo, devido à intensa absorção dos nutrientes, principalmente de N e P, pelas plantas, até o estágio de maturidade fisiológica dos grãos (VASCONCELLOS *et al.*, 1999). Portanto, a concentração do P da solução do solo, mesmo sendo muito baixa, é maior do que aquela próxima à raiz. Como a difusão é eficiente apenas em curtas distâncias (< 2 mm), pode-se deduzir que sem crescimento e distribuição adequada de raízes, principalmente as de menor diâmetro, haverá pouca exploração do solo e baixa superfície radicular, conseqüentemente apenas uma quantidade limitada de P poderá ser absorvida

(JUNGK, 1987; NOVAIS e SMITH, 1999). Plantas sensíveis, quando cultivadas em solos de baixa fertilidade, geralmente apresentam reduzida biomassa radicular, enquanto as tolerantes reduzem apenas um pouco ou a mantêm constante e alteram sua estrutura morfológica, elevando o número e o comprimento de raízes finas (MACHADO *et al.*, 2004).

A eficiência de utilização é avaliada por meio dos aspectos fisiológicos (maior translocação e distribuição, alteração na respiração etc.), bioquímicos (ativação enzimática e produção de fosfatases etc.) e moleculares (ativação de RNAses, transportadores de fosfato, PEC carboxilase etc.) (MACHADO, 2000). Os cultivares e híbridos com alta tolerância a solos com baixa disponibilidade de P podem também ser muito responsivos, ou seja, apresentar maior conversão de nutrientes em biomassa quando submetidos a maiores doses do nutriente (MARSCHENER, 1998; HAMMOND *et al.*, 2004).

Em geral, os melhoristas avaliam a produtividade dos novos cultivares como produto final dos programas de melhoramento de plantas. No entanto, sem considerar as características que estejam associadas à tolerância ao estresse, o objetivo de obter cultivares eficientes no uso de nutrientes pode não ser alcançado, e a alta produtividade relacionada a outros fatores pode não ser vislumbrada na pesquisa. O ideal, portanto, é considerar características de fácil medição e que apresentem alta correlação com a tolerância e a produtividade (FURLANI e USBERTI FILHO, 1990; BOLAÑOS *et al.*, 1993; HOHLS, 2001).

Estimativas de correlação podem ser importantes para verificar a divergência entre locais e a dependência de características (HOHLS, 2001; BETRÁN *et al.*, 2003). Quando características de fácil obtenção correlacionam-se com as de produtividade, aquelas poderão ser utilizadas em seleção indireta (BOLAÑOS *et al.*, 1993; BÄNZIGER e LAFITTE, 1997). Alves *et al.* (2001) observaram correlações significativas entre o teor de P nas sementes e a biomassa seca de plantas de milho, aos 30 dias após o plantio, em solução nutritiva com baixos teores de fósforo.

Quando a produção é dependente de vários mecanismos da planta, principalmente quando se cultiva sob estresse ambiental, a correlação poderá também esclarecer quais são e como os mecanismos conferem maior eficiência nutricional às plantas (MACHADO *et al.*, 2004). Schenk e Barber (1979) observaram que as diferenças na morfologia e fisiologia das raízes de

cinco genótipos de milho foram responsáveis pela quantidade de P absorvido pelas plantas, em solução nutritiva e solo, e os cultivares que apresentaram maiores comprimentos de raízes também produziram maiores quantidades de biomassa, na parte aérea e raiz. Resultados semelhantes foram observados por Ciarelli *et al.* (1998).

De acordo com Furlani *et al.* (1985), os melhores critérios e métodos para classificar cultivares quanto à eficiência de absorção e uso de nutrientes têm sido aqueles que utilizam o crescimento em condições de baixa disponibilidade do nutriente, verificando se essas diferenças são devido ao mecanismo de absorção e, ou, de utilização.

Para induzir o comportamento diferencial das plantas com relação à eficiência a P, geralmente realizam-se experimentos que simulam condições contrastantes quanto à disponibilidade do nutriente. Com isso, podem ser manifestados os mecanismos fisiológicos e morfológicos de tolerância e adaptação ao estresse (MARTINEZ *et al.*, 1993a; THEODOROU e PLAXTON, 1993).

O controle eficiente do erro experimental é essencial para que a seleção de plantas tenha sucesso. A magnitude desse erro depende da influência ambiental, como o solo e o clima. Quando o caráter é controlado por vários genes, a probabilidade todos os alelos favoráveis serem associados de um indivíduo é pequena. Nessa condição, a chance de sucesso aumenta com o número de famílias avaliadas; no entanto esse procedimento requer áreas experimentais uniformes, com extensão suficiente para abrigar blocos com todas as famílias. O uso de delineamentos experimentais de maior eficiência pode reduzir esse erro, possibilitando maior discriminação dos tratamentos. Em campo, devem ser utilizados delineamentos em blocos, preferencialmente os incompletos, que permitem maior controle da variação do solo (GRANADOS *et al.*, 1993; RAMALHO *et al.*, 2000). Em casa de vegetação, as variações de solo e clima são mais eficientemente controladas, mesmo quando os tratamentos são colocados em delineamentos inteiramente casualizados (FURLANI e FURLANI, 1988).

Em casa de vegetação, de acordo com o substrato (solo ou solução nutritiva), poderá haver alterações da intensidade de atuação dos mecanismos que conferem tolerância. As principais razões do uso de condições controladas

de cultivos estão relacionadas ao custo, à praticidade e ao controle ambiental (GERLOFF, 1987; FURLANI e FURLANI, 1988; FURLANI *et al.*, 1998).

O ideal na seleção de plantas em casa de vegetação, em estádios iniciais ou tardios, é que a ordem de classificação dos genótipos quanto à tolerância ao estresse seja repetida em condições de campo. Furlani *et al.* (1998) indicaram o uso de ciclos alternados de cultivo em casa de vegetação e campo para que a seleção e a avaliação de genótipos sejam eficientes. Machado *et al.* (2004) obtiveram resultados semelhantes de ensaios de campo e de solução nutritiva para seleção de genótipos quanto à eficiência ao fósforo. Ciarelli *et al.* (1998) e Furlani *et al.* (1998) verificaram que diferenças genotípicas quanto à morfologia de raízes e produção de biomassa ocorrem tanto em campo quanto em condição controlada, por serem características intrínsecas das plantas, portanto podem apresentar alta correlação.

A restrição do uso de solução nutritiva para seleção de plantas eficientes ao P pode estar relacionada ao fato de este nutriente se comportar de maneira diferenciada quando em campo (plantas cultivadas em solo). Em solução nutritiva, os nutrientes estarão prontamente disponíveis, sem impedimento para a absorção pelas raízes. Em campo, o movimento de P até as raízes depende basicamente da difusão e dos fatores do solo que a limitam, como equilíbrio nutricional, pH, minerais de argila, granulometria, umidade etc. (MARSCHNER, 1995; NOVAIS e SMITH, 1999). Esta consideração é importante tanto para a disponibilidade do P no solo quanto para a manifestação de mecanismos de tolerância das plantas (crescimento radicular, liberação de substâncias orgânicas pela raiz e associação simbiótica) (GERLOFF, 1987; CHANEY *et al.*, 1989; HINSINGER, 2001).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Experimentos

3.1.1. Experimento em casa de vegetação

O experimento foi realizado em casa de vegetação no Campo Experimental “Prof. Diogo Alves de Mello”, do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, no primeiro semestre de 2002, em Viçosa-MG. Foi utilizado um solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo do município de Viçosa, com pH = 5,92, P = 8,4 mg dm⁻³ (38,5 kg P₂O₅ ha⁻¹) e K = 56 mg dm⁻³ de solo (134,9 kg K₂O ha⁻¹). Não foi necessária a correção da acidez, tendo sido realizada apenas a adubação de 50 mg N dm⁻³ (100 kg ha⁻¹), na forma de uréia, e de 40 mg K₂O dm⁻³ de solo (80 kg K₂O ha⁻¹), como cloreto de potássio. A adubação fosfatada foi localizada a um terço da profundidade do vaso, cuja capacidade era de 3 kg de solo. Irrigaram-se os vasos diariamente, para manter a umidade do solo em torno de 70% da capacidade de campo. A umidade foi controlada por meio de pesagens dos vasos.

Os tratamentos foram representados por 15 combinações híbridas (híbridos intervarietais ou F₁) e oito cultivares de milho, sendo seis genitores (Sol da Manhã, BR 106, AG 9010, BR 201, DKB 747 e Caiano) e duas testemunhas (P 3041 e DKB 333B). A escolha dos cultivares baseou-se nas características de adaptação e de produtividade (Tabela 1). As combinações

Tabela 1 – Características dos cultivares utilizados no experimento^{1/}

Cultivar	Tipo	Ciclo	Tipo e Coloração do Grão	Altura	Características
AG 9010	Híbrido simples	Superprecoce	Semiduro Alaranjado	1,90	Recomendado para safrinha.
BR 106	Variedade	Semiprecoce	Semidentado Amarelo ouro	2,40	Boa estabilidade de produção, ampla adaptabilidade e alta prolificidade.
BR 201	Híbrido duplo	Precoce	Semidentado Amarelo/ Alaranjado	2,30	Alta produtividade, excelente adaptação às condições do cerrado e de solos férteis.
Caiano	Variedade local	Normal	Duro Alaranjado	2,50	Bom desempenho sob baixo uso de insumos.
DKB 333B	Híbrido simples	Semiprecoce	Semiduro Amarelo/ Alaranjado	2,35	Maior tolerância a doenças foliares e à estiagem, excelente sistema radicular.
DKB 747	Híbrido triplo	Precoce	Duro Alaranjado	2,20	Sistema radicular diferenciado, alta tolerância ao alumínio tóxico e colmo com alta sanidade e resistência ao quebramento.
P 3041	Híbrido triplo	Precoce	Duro Alaranjado	2,40	Alta adaptabilidade a solos com baixa fertilidade.
Sol da Manhã	Variedade	Precoce	Duro Alaranjado	2,20	Excelente adaptação a solos de baixa fertilidade, eficiente no uso de nitrogênio.

híbridas foram obtidas por meio de cruzamento dialélico, de forma manual, planta a planta, em esquema de fileiras pareadas, de maneira que cada combinação híbrida foi representada por pelo menos 50 espigas.

O experimento seguiu o delineamento inteiramente casualizado, com duas repetições, no arranjo fatorial 23 tratamentos x 2 níveis de P. Os tratamentos foram submetidos a dois níveis de adubação fosfatada. No primeiro nível não houve acréscimo de P, sendo considerado o teor de 8,4 mg P kg⁻¹ (baixa disponibilidade de P, 38,5 kg P₂O₅ ha⁻¹), que era o que estava disponível naturalmente no solo. No segundo nível acrescentou-se a dose de 240 mg P kg⁻¹ (alta disponibilidade de P, 38,5 + 1.099,9 = 1.138,4 kg P₂O₅ ha⁻¹) na forma de superfosfato simples.

Dez sementes por vasos foram plantadas, deixando-se, após o desbaste, cinco plantas. Aos 30 dias após o plantio, as plantas de cada vaso foram colhidas, lavadas em água destilada, separadas em parte aérea e raiz e colocadas em estufa com ventilação forçada, a 70 °C, durante 72 horas. Da

biomassa seca, depois de moída em moinho Willey com peneira nº 20 e homogeneizada, retirou-se uma amostra de 0,1 g das partes da planta, que foi, em seguida, submetida à digestão nitroperclórica. Nesses extratos foram determinados os teores de P, segundo metodologia de Bataglia *et al.* (1983), expressos em mg g⁻¹. Foram obtidas também as relações parte aérea/raiz quanto à biomassa seca e ao P acumulado.

Os seguintes índices de eficiência também foram estimados para cada combinação híbrida e cultivares (FAGERIA e BALIGAR, 1993):

- Eficiência de utilização:

$$(EU) = \text{Produção MS}_{\text{adubado}} (\text{g vaso}^{-1});$$

- Resposta à utilização:

$$(RU) = (\text{Produção de MS}_{\text{adubado}} - \text{Produção de MS}_{\text{não-adubado}}) / (\text{P no solo}_{\text{adubado}} - \text{P no solo}_{\text{não-adubado}}) (\text{kg kg}^{-1}).$$

Esses índices foram utilizados para classificação dos genótipos, por meio de representação gráfica, em quatro categorias: 1) eficientes e responsivos; 2) eficientes e não-responsivos; 3) não-eficientes e responsivos; e 4) não-eficientes e não-responsivos. O gráfico teve como ponto de origem as médias de EU (eixo das abscissas) e RU dos tratamentos (eixo das ordenadas).

- Eficiência de utilização (SIDDIQI e GLASS, 1981):

$$IE = (\text{MS}^2) / (\text{P acumulado na planta}) (\text{g}^2 \text{mg}^{-1});$$

- Eficiência de translocação (FAGERIA, 1998):

$$ET = \text{P acumulado na parte aérea} / \text{P acumulado na planta} (\text{kg kg}^{-1}).$$

- Eficiência de recuperação (ER) (Fageria, 1998):

$$ER = [(\text{P acumulado}_{\text{adubado}} - \text{P acumulado}_{\text{não-adubado}}) / \text{P aplicado}] \times 100 (\%)$$

- Eficiência fisiológica (EF) (Fageria, 1998):

$$EF = \frac{\text{Produção MS}_{\text{adubado}} - \text{Produção MS}_{\text{não-adubado}}}{\text{P}_{\text{adubado}} - \text{P}_{\text{não-adubado}}} \text{ (kg kg}^{-1}\text{)}$$

- Índice de suscetibilidade ao estresse (S) (GAMA *et al.*, 2002):

$$S = \left[1 - \frac{\text{Produção}_{\text{não-adubado}}}{\text{Produção}_{\text{adubado}}} \right] / \left[1 - \frac{\text{Produção média}_{\text{não-adubado}}}{\text{Produção média}_{\text{adubado}}} \right]$$

3.1.2. Experimentos em campo

Os experimentos em campo, representando condições de alta e baixa disponibilidade de fósforo, foram realizados na Estação Experimental do Aeroporto, Viçosa-MG, pertencente ao Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa.

Outros quatro experimentos, também em campo, considerando os níveis de adubação fosfatada e dos demais nutrientes utilizados pelos agricultores, foram realizados em Viçosa, Capinópolis, Coimbra e Florestal, Minas Gerais (Tabela 2). Os plantios foram instalados em novembro ou dezembro de 2002.

No experimento com baixa disponibilidade de fósforo (28 kg de P₂O₅ ha⁻¹) foram aplicados 200 kg ha⁻¹ da formulação N-P-K 4-14-8 e no de alto fósforo (112 kg de P₂O₅ ha⁻¹), 800 kg ha⁻¹ da mesma formulação. Nos demais experimentos a adubação foi com 250 kg ha⁻¹ da formulação N-P-K 8-28-18. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, com duas repetições. A parcela foi constituída por duas linhas de 5 m, espaçadas em 0,90 x 0,20 m, e com estande estimado em 55.555 plantas/ha. As demais práticas agrícolas, controle de pragas, doenças e de plantas daninhas, foram realizadas conforme a necessidade e as recomendações técnicas para a cultura do milho (MIRANDA *et al.*, 2005).

Após o pendoamento e considerando cinco plantas da parcela, foram avaliadas as alturas de planta e de espiga, e por ocasião da colheita, o número de plantas, o número de plantas acamadas (plantas com ângulo de inclinação superior a 45°), o número de espigas, o peso de grãos (em kg) e a umidade dos grãos (%). Foi também determinado o número de dias transcorridos entre a antese e o florescimento feminino.

Tabela 2 – Caracterização geográfica, climática e de fertilidade do solo de Viçosa, Capinópolis, Coimbra e Florestal. Viçosa, 2003

Caracterização	Situação de Cultivo					
	Experimental		Sistema do Produtor			
	Alto P	Baixo P	Viçosa	Capinópolis	Coimbra	Florestal
Geográfica e climática:						
. Zoneamento ^{1/}	Zona da Mata		Cerrado	Zona da Mata	Transição	
. Latitude (S)	20:44:53		18:40:55	20:50:30	19:53:22	
. Longitude (W)	42:49:31		49:34:11	42:48:30	44:25:57	
. Altitude (m)	648		564	720	776	
. Temp. max.-min. (°C) ^{2/}	29,4 - 19,6		30,2 – 21,1	29,4 - 19,6	28,7 - 20,9	
. Precipitação (mm) ^{2/}	714,8		1160,8	714,8	459,8	
Fertilidade do solo:						
. pH (H ₂ O)	06,43	04,82	006,05	5,03	05,31	05,18
. P (mg dm ⁻³)	19,90	07,00	008,30	5,0	09,10	06,00
. K (mg dm ⁻³)	97,00	55,00	100,00	70	63,00	85,00
. Ca (cmol _c dm ⁻³)	03,96	01,68	002,85	1,79	02,33	01,96
. Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,84	0,78	0,79	0,53	0,85	0,98
. Al (cmol _c dm ⁻³)	0,00	0,20	0,00	0,10	0,00	0,00

^{1/} Fonte: disponível em: <<http://planeta.terra.com.br/educacao/Astronomia/latMG.html>>.

^{2/} Fontes: INMET. Disponível em: <<http://www.agritempo.gov.br>> (período de dezembro/2002 a abril/2003).

Com base na produtividade de grãos e nas doses de P aplicadas, foram estimados os índices de eficiência “EU e RU’ e de suscetibilidade ao estresse “S”, conforme anteriormente descrito para a classificação dos genótipos.

3.2. Análises dos dados

3.2.1. Análise de variância

Os dados foram submetidos à análise de variância individual (Tabela 3) e, após verificar que a relação entre a maior e a menor variância residual entre os experimentos foi de até 7:1, procedeu-se à análise conjunta, considerando-se o teste de F com a probabilidade de 5% (GOMES, 2000). Os tratamentos foram agrupados com o teste de Scott-Knott, também com a probabilidade de

Tabela 3 – Esquema da análise de variância para os T tratamentos e D doses, no esquema inteiramente casualizado

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
Tratamentos (T)	t-1	SQT	QMT	QMT/QMR
. Combinações híbridas (CH)	c-1	SQC	QMC	QMC/QMR
. Cultivares (C)	te-1	SQTe	QMTe	QMTe/QMR
. CH vs. C (Gr)	1	SQGr	QMGr	QMGr/QMR
Doses (D)	d-1	SQD	QMD	QMD/QMR
T x D	(t-1)(d-1)	SQTD	QMTD	QMTD/QMR
. CH x D	(c-1)(d-1)	SQCD	QMCD	QMCD/QMR
. C x D	(te-1)(d-1)	SQTeD	QMTeD	QMTeD/QMR
. Gr x D	(d-1)	SQGrD	QMGrD	QMGrD/QMR
Resíduo	(r-1)(t-1)d	SQR	QMR	
Total	trd-1	SQTo		

5%. O esquema de análise de variância conjunta utilizada foi o apresentado por Cruz (2001), considerando os efeitos de tratamentos fixos e de ambientes aleatórios (Tabela 4).

Tabela 4 – Esquema da análise de variância conjunta para os T tratamentos e A ambientes, no esquema de blocos ao acaso

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F
Blocos/Locais	a(r-1)	SQB	QMB	
Cultivares (C)	t-1	SQT	QMT	QMT/QMGD
. Combinações híbridas (CH)	c-1	SQC	QMC	QMC/QMCD
. Cultivares (C)	Te-1	SQTe	QMTe	QMTe/QMTD
. C vs. C (Gr)	1	SQGr	QMGr	QMGr/QMGrD
Doses (D)	d-1	SQD	QMD	QMD/QMB
T x A	(t-1)(d-1)	SQTD	QMTD	QMTD/QMR
. CH x A	(c-1)(d-1)	SQCD	QMCD	QMCD/QMR
. C x A	(te-1)(d-1)	SQTeD	QMTeD	QMTeD/QMR
. Gr x A	(d-1)	SQGrD	QMGrD	QMGrD/QMR
Resíduo	(r-1)(t-1)d	SQR	QMR	
Total	tra-1	SQTo		

3.2.2. Análises genéticas

a) Análises dialélicas

As análises dialélicas individuais e conjuntas foram realizadas de acordo com o método 4 do modelo proposto por Griffing (1956), utilizando-se somente as combinações híbridas para obtenção dos valores de CGC e CEC, nos dois níveis de P. Em casa de vegetação avaliaram-se todas as características e em campo, somente a produtividade de grãos. Os modelos estatístico-genéticos utilizados foram:

- Análise individual

$$Y_{ij} = m + g_i + g_j + s_{ij} + e_{ij}$$

em que

Y_{ij} = valor médio do híbrido ij;

m = média geral;

g_i e g_j = efeitos da capacidade geral de combinação dos pais de ordem i e j, respectivamente;

s_{ij} = efeitos da capacidade específica de combinação para os cruzamentos entre os pais de ordem i e j; e

e_{ij} = erro experimental médio.

- Análise conjunta

$$Y_{ijk} = m + g_i + g_j + s_{ij} + a_k + ga_{ik} + ga_{jk} + as_{ijk} + e_{ijk}$$

em que

Y_{ijk} = valor médio do híbrido ij;

m = média geral;

g_i e g_j = efeitos da capacidade geral de combinação dos pais de ordem i e j, respectivamente;

s_{ij} = efeitos da capacidade específica de combinação para os cruzamentos entre os pais de ordem i e j ;

a_k = efeito do local k ;

ga_{ik} e ga_{jk} = efeitos da interação entre a capacidade geral de combinação (CGC) dos pais de ordem i e j , respectivamente, com os localidades;

sa_{ijk} = efeito da interação entre a capacidade específica de combinação (CEC) entre os pais i e j e cada localidade; e

ε_{ijk} = erro experimental médio.

Para detecção dos efeitos da CGC e CEC, considerou o teste F, até o nível máximo de 10% de probabilidade.

b) Análises de correlação

No experimento em casa de vegetação foram realizadas análises de correlação entre todas as características e os índices de eficiência. Para verificar a correlação entre os níveis de P, considerou-se apenas a biomassa seca da parte aérea.

No experimento de campo correlacionaram-se as localidades, considerando seus pares, a produtividade de grãos e a CEC. Avaliou-se também a correlação entre os índices de eficiência e a produtividade de grãos. Considerou-se como estimador o coeficiente de correlação de Pearson [$r = \text{cov}(X, Y) / (s_x s_y)$].

A significância das estimativas de correlação foi avaliada pelo teste t de Student, até 10% de probabilidade.

Para auxílio nas análises, utilizou-se o Programa Genes, versão Windows, aplicativo computacional em genética e estatística (CRUZ, 2004).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Experimentos em casa de vegetação

4.1.1. Análise de variância

As condições contrastantes proporcionadas pelas duas doses de fósforo foram eficientes para causar diferenças significativas na biomassa seca da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e planta inteira (MSP), no teor de P na parte aérea (TTPA) e de P acumulado na parte aérea (PAPA), raiz (PAR) e planta inteira (PAP) (Tabelas 5 e 6).

O efeito significativo das combinações híbridas (CH) e dos cultivares para todas as características comprova a diversidade genética originada de cultivares também com comportamento diferenciado.

A significância das interações T x D e CH x D para todas as características indica que o comportamento dos tratamentos e das CH variou com a disponibilidade de fósforo. Nesse caso, presume-se a necessidade de seleção entre as CH, para cada nível de P. A especificidade de seleção aumenta a produtividade no local com a presença de estresse ambiental.

As características radiculares MSR e PAR apresentaram os maiores coeficientes de variação (CV), quando comparados com os das outras características, o que tem sido freqüente em vários trabalhos, como os conduzidos por Furlani *et al.* (1985), Furlani *et al.* (1998) e Machado *et al.*

Tabela 5 – Resumo da análise de variância para biomassas secas da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e planta inteira (MSP) e do teor de fósforo nas biomassas secas da parte aérea (TPPA) e raiz (TPR) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003

Fontes de Variação	GL	Quadrados Médios				
		MSPA	MSR	MSP	TPPA	TPR
Tratamentos (T)	22	23,341**	37,334**	113,19**	0,0274**	0,0373**
. Comb. Híbridas (CH)	14	12,485**	25,066**	66,46**	0,0150**	0,0292**
. Cultivares (C)	7	12,999**	23,608**	65,29**	0,0457**	0,0539**
. CH vs. C (Gr)	1	247,729**	305,169**	1102,75**	0,0735**	0,0340 ^{ns}
Doses (D)	1	387,524**	354,950**	1484,23**	0,0781**	0,0769**
T x D	22	2,151*	9,233**	13,51**	0,0129**	0,0233**
. CH x D	14	2,469*	8,245**	13,76**	0,1435**	0,0125 ^{ns}
. C x D	7	1,803 ^{ns}	12,492**	14,82*	0,0109 ^{ns}	0,0385**
. Gr x D	1	0,128 ^{ns}	0,260 ^{ns}	0,75 ^{ns}	0,0059 ^{ns}	0,0684**
Resíduo	46	1,176	2,850	5,43	0,0052	0,0090
Total	91					
CV (%)		9,06	12,21	9,03	7,19	12,31

^{ns}, * e ** = não-significativo e significativos a 5 e a 1%, respectivamente, pelo teste F.

Tabela 6 – Resumo da análise de variância para fósforo acumulado nas biomassas secas da parte aérea (PAPA), raiz (PAR) e planta inteira (PAP) e das relações parte aérea/raiz da biomassa seca (RPRMS) e de fósforo acumulado (RPRPA) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003

Fontes de Variação	GL	Quadrados Médios				
		PAPA	PAR	PAP	RPRMS	RPRPA
Tratamentos (T)	22	18,968**	26,975**	80,30**	0,0389**	0,1526**
Comb. híbridas (CH)	14	14,386**	26,184**	65,73**	0,0359**	0,1944**
. Cultivares (C)	7	4,130*	9,245 ^{ns}	21,28**	0,0505**	0,0905 ^{ns}
. CH vs. C (Gr)	1	186,980**	162,165**	697,44**	0,0004 ^{ns}	0,0018 ^{ns}
Doses (D)	1	527,580**	124,522**	1164,76**	0,0555*	1,0473**
T x D	22	4,001**	6,538 ^{ns}	14,09**	0,0391**	0,0813 ^{ns}
. CH x D	14	5,419**	6,707 ^{ns}	17,44**	0,0315*	0,0697 ^{ns}
. C x D	7	1,528 ^{ns}	6,181 ^{ns}	7,27 ^{ns}	0,0597**	0,1079 ^{ns}
. Gr x D	1	1,612 ^{ns}	6,658 ^{ns}	14,81 ^{ns}	0,0008 ^{ns}	0,0567 ^{ns}
Resíduo	46	1,587	4,683	5,77	0,0133	0,0654
Total	91					
CV (%)		10,57	20,59	10,71	13,06	21,58

^{ns}, * e ** = não-significativo e significativos a 5 e a 1%, respectivamente, pelo teste F.

(2004). Os valores de CV de todas as características estão de acordo com o encontrado na literatura, e são inerentes à própria característica, portanto a porcentagem ideal é variável (SCAPIN *et al.*, 1995).

4.1.2. Produtividade de biomassa

A MSPA dos cultivares foi significativamente inferior à das combinações híbridas. Esta característica foi a que apresentou maior diferenciação entre as CH, conforme o teste de Scott-Knott (Tabela 7). A presença e a detecção de diferenças entre genótipos são importantes e representam o primeiro passo para o melhoramento de plantas. Machado *et al.* (2001) obtiveram também maior diferenciação entre plantas de milho, quando avaliaram a MSPA.

Considerando a redução de biomassa quando as plantas são submetidas à baixa disponibilidade de P, as combinações híbridas foram menos sensíveis que os cultivares (Tabela 8). A biomassa das raízes foi menos reduzida que a da parte aérea (29,2%), o que pode significar baixa eficácia na diferenciação de plantas ou que todas apresentaram mecanismo de tolerância relativo ao crescimento radicular. No entanto, a utilização de vasos com capacidade para apenas 3 kg de solo pode também não ter permitido a diferenciação radicular das plantas através do crescimento. Entre os cultivares, o BR 201 foi o menos sensível quando se considerou a redução de biomassa da parte aérea, e o AG 9010, quando se considerou a da raiz. Entre as combinações híbridas, a CH 1 x 6 foi menos sensível quanto à parte aérea, CH 2 x 3 quanto à raiz e CH 2 x 4 quanto à planta inteira.

Pode-se verificar que há mudança de classificação quanto à sensibilidade ou eficiência nutricional das plantas ao serem cultivadas sob baixa disponibilidade de fósforo, dependendo do genótipo e da parte da planta a ser avaliada. Considerando que a sensibilidade da parte aérea em reduzir sua biomassa apresenta maior correlação com a produtividade de grãos, os genótipos mais tolerantes nessa parte da planta poderão contribuir para a tolerância de gerações futuras.

Tabela 7 – Biomassas secas da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e planta inteira (MSP) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003^{1/}

Genótipos	MSPA		MSR		MSP	
	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P
	----- g vaso ⁻¹ -----					
CH 1 x 2	13,89 c ^A	10,66 b ^B	14,64 c ^A	10,97 b ^B	28,53 c ^A	21,63 b ^B
CH 1 x 3	17,16 a ^A	12,25 b ^B	21,03 b ^A	14,21 a ^B	38,19 b ^A	26,46 a ^B
CH 1 x 4	14,41 b ^A	9,57 c ^B	15,85 c ^A	11,82 b ^B	30,26 c ^A	21,38 b ^B
CH 1 x 5	14,86 b ^A	11,88 b ^B	15,39 c ^A	10,09 b ^B	30,25 c ^A	21,97 b ^B
CH 1 x 6	11,63 d ^A	11,36 b ^A	15,99 c ^A	15,66 a ^A	27,62 c ^A	27,02 a ^A
CH 2 x 3	14,98 b ^A	10,61 b ^B	12,31 d ^A	13,26 a ^A	27,29 c ^A	23,87 a ^A
CH 2 x 4	13,64 c ^A	10,73 b ^B	12,92 c ^A	13,17 a ^A	26,56 c ^A	23,90 a ^A
CH 2 x 5	13,40 c ^A	8,86 c ^B	15,83 c ^A	11,25 b ^B	29,23 c ^A	20,11 b ^B
CH 2 x 6	14,05 c ^A	9,74 c ^B	16,95 b ^A	10,85 b ^B	31,00 c ^A	20,59 b ^B
CH 3 x 4	18,54 a ^A	11,72 b ^B	19,23 b ^A	14,00 a ^B	37,77 b ^A	25,72 a ^B
CH 3 x 5	18,08 a ^A	13,77 a ^B	19,97 b ^A	16,47 a ^B	38,05 b ^A	30,24 a ^B
CH 3 x 6	19,21 a ^A	14,65 a ^B	25,49 a ^A	15,36 a ^B	44,70 a ^A	30,02 a ^B
CH 4 x 5	16,41 b ^A	9,63 c ^B	17,16 b ^A	14,60 a ^A	33,57 b ^A	24,23 a ^B
CH 4 x 6	15,28 b ^A	11,46 b ^B	19,33 b ^A	16,01 a ^A	34,61 b ^A	27,46 a ^B
CH 5 x 6	13,10 c ^A	9,36 c ^B	15,25 c ^A	9,52 b ^B	28,35 c ^A	18,88 b ^B
(1) Sol da Manhã	10,79 d ^A	7,25 d ^B	19,04 b ^A	7,18 c ^B	29,83 c ^A	14,43 c ^B
(2) BR 106	10,95 d ^A	6,59 d ^B	9,84 d ^A	5,60 c ^B	20,78 b ^A	12,19 c ^B
(3) AG 9010	14,89 b ^A	10,26 b ^B	14,87 c ^A	14,15 a ^A	29,76 c ^A	24,41 a ^B
(4) BR 201	7,56 e ^A	6,06 d ^B	9,25 d ^A	7,89 c ^A	16,81 b ^A	13,95 c ^A
(5) DKB 747	13,56 c ^A	8,33 c ^B	14,28 c ^A	11,72 a ^A	27,85 c ^A	20,05 b ^B
(6) Caiano	12,56 c ^A	9,48 c ^B	14,08 c ^A	11,20 b ^A	26,64 c ^A	20,68 b ^B
P 3041	12,97 c ^A	7,18 d ^B	13,81 d ^A	9,06 c ^B	26,79 c ^A	16,23 c ^B
DKB 333B	10,47 d ^A	6,58 d ^B	10,58 d ^A	8,70 c ^A	21,06 b ^A	15,28 c ^B
Médias:						
. CH	15,24	11,08	17,16	13,15	32,40	24,23
. Cultivares	11,72	7,72	13,22	9,44	24,94	17,15
. Geral	14,02 ^A	9,88 ^B	15,84 ^A	11,90 ^B	29,86 ^A	21,78 ^B

^{1/} Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste F e de Scott-Knott, respectivamente, a 5% de probabilidade.

Tabela 8 – Redução relativa das biomassas secas da parte aérea, raiz e planta inteira, de genótipos de milho cultivados em vaso, em relação ao solo com alto nível de P^{1/}

Genótipos	Biomassa Seca		
	Parte Aérea	Raiz	Planta
	----- % -----		
CH 1 x 2	23,2	25,1	24,2
CH 1 x 3	28,6	32,4	30,7
CH 1 x 4	33,6	25,5	29,3
CH 1 x 5	20,1	34,4	27,4
CH 1 x 6	2,4	2,0	2,2
CH 2 x 3	29,2	0,0	12,5
CH 2 x 4	21,4	0,0	10,0
CH 2 x 5	33,9	28,9	31,2
CH 2 x 6	30,6	36,0	33,6
CH 3 x 4	36,8	27,2	31,9
CH 3 x 5	23,8	17,5	20,5
CH 3 x 6	23,7	39,7	32,8
CH 4 x 5	41,3	14,9	27,8
CH 4 x 6	25,0	17,2	20,6
CH 5 x 6	28,6	37,5	33,4
(1) Sol da Manhã	32,8	62,3	51,6
(2) BR 106	39,8	43,1	41,3
(3) AG 9010	31,1	4,9	18,0
(4) BR 201	19,8	14,8	17,0
(5) DKB 747	38,6	17,9	28,0
(6) Caiano	24,5	20,5	22,4
P 3041	44,7	34,4	39,4
DKB 333B	37,2	17,8	27,5
Médias:			
. CH	26,8	22,6	24,5
. Cultivares	33,6	26,9	30,6
. Geral	29,2	24,1	26,7

^{1/} Redução relativa (%) = [(produtividade média de biomassa, em baixo P – produtividade média de biomassa, em alto P)/(produtividade média de biomassa, em alto P) x 100]. (SOUZA, 2003).

Considerando apenas a condição de baixa disponibilidade de fósforo, as CH 3 x 5 e CH 3 x 6 superaram o AG 9010, que foi o cultivar com maior produção de biomassa da parte aérea, raiz e planta inteira. Características da planta que apresentam alta correlação com dados de produtividade, como a biomassa de parte aérea, têm possibilitado, em estádios inicial ou precoce de crescimento, a identificação mais precisa de genótipos eficientes na absorção e utilização de nutrientes (BAKER *et al.*, 1970). No entanto, como o crescimento radicular está associado à absorção de P, plantas com maior biomassa radicular também devem ser consideradas (CHASSOT e RICHNER, 2002).

4.1.3. Teores e acúmulos de P na planta

O teor e o acúmulo de P na parte aérea das CH e dos cultivares alteraram-se quando os tratamentos foram submetidos aos dois níveis de P (Tabelas 9 e 10). O TPPA foi maior quando as plantas foram cultivadas sob alta disponibilidade de P; no entanto, para TPR ocorreu o inverso. A redução do P acumulado na parte aérea foi maior que no sistema radicular e na planta inteira (Tabela 11). O maior crescimento da raiz, ou a menor sensibilidade, comparado com o de outras partes da planta, tem sido observado em trabalhos que relatam o cultivo de plantas sob baixa disponibilidade do nutriente de fósforo. Na presença do estresse tem-se observado preferência de crescimento e de acúmulo de nutrientes nessa parte da planta (SCHJORRING e JENSÉN, 1987; MARSCHNER *et al.*, 1996).

Observa-se que as CH e os cultivares, quanto ao teor de P, apresentaram comportamentos distintos e que este está relacionado à maior eficiência de utilização do P (FURLANI *et al.*, 1998; RESENDE *et al.*, 2000).

O cultivar que apresentou o maior teor de P, nas duas partes da planta e em baixa disponibilidade do nutriente, foi o BR 201, embora estatisticamente igual ao Sol da Manhã, P 3041 e DKB 333B. Para o P acumulado na parte aérea e raiz, destacaram-se o Caiano e AG 9010, respectivamente, mas também foram estatisticamente iguais aos demais cultivares. O AG 9010 apresentou o mesmo comportamento na planta inteira. Quanto às CH, o maior teor de P encontrado na parte aérea foi o de CH 1 x 6, no entanto ele está

Tabela 9 – Teor de P na parte aérea (TPPA) e raiz (TPR) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003^{1/}

Genótipos	TPPA		TPR	
	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P
	----- mg g ⁻¹ -----			
CH 1 x 2	1,03c ^A	0,97b ^A	0,57a ^A	0,62c ^A
CH 1 x 3	0,88c ^A	0,93b ^A	0,70a ^A	0,73c ^A
CH 1 x 4	1,03c ^A	0,84b ^B	0,85a ^A	0,90b ^A
CH 1 x 5	1,08c ^A	1,04b ^A	0,78a ^A	0,86b ^A
CH 1 x 6	0,98c ^A	1,11a ^A	0,86a ^A	1,01b ^A
CH 2 x 3	1,13b ^A	0,91b ^B	0,83a ^A	0,68c ^A
CH 2 x 4	0,98c ^A	0,88b ^A	0,75a ^A	0,67c ^A
CH 2 x 5	1,03c ^A	0,90b ^A	0,66a ^A	0,78c ^A
CH 2 x 6	0,90c ^A	0,94b ^A	0,75a ^A	0,74c ^A
CH 3 x 4	0,90c ^A	1,00b ^A	0,72a ^A	0,65c ^A
CH 3 x 5	0,98c ^A	0,88b ^A	0,77a ^A	0,81c ^A
CH 3 x 6	1,17b ^A	0,90b ^B	0,80a ^A	0,83c ^A
CH 4 x 5	0,92c ^A	0,94b ^A	0,85a ^A	0,66c ^A
CH 4 x 6	1,19b ^A	1,01b ^B	0,65a ^B	0,89b ^A
CH 5 x 6	1,07c ^A	0,97b ^A	0,67a ^A	0,65c ^A
(1) Sol da Manhã	1,05c ^A	1,08a ^A	0,67a ^B	1,03b ^A
(2) BR 106	1,07c ^A	0,95b ^A	0,85a ^A	0,93c ^A
(3) AG 9010	0,99c ^A	0,82b ^B	0,73a ^A	0,78b ^A
(4) BR 201	1,34a ^A	1,16a ^B	0,79a ^B	1,24a ^A
(5) DKB 747	0,94c ^A	0,97b ^A	0,59a ^A	0,75c ^A
(6) Caiano	0,99c ^A	0,96b ^A	0,79a ^A	0,75c ^A
P 3041	1,04c ^A	1,08a ^A	0,67a ^A	0,80c ^A
DKB 333B	1,06c ^A	1,16a ^A	0,75a ^A	0,61c ^A
Médias:				
. CH	1,02	0,95	0,75	0,76
. Cultivares	1,06	1,02	0,73	0,86
. Geral	1,03 ^A	0,97 ^B	0,74 ^B	0,80 ^A

^{1/} Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente, pelos testes F e de Scott-Knott, respectivamente, a 5% de probabilidade.

Tabela 10 – Acúmulo de P na parte aérea (PAPA), raiz (PAR) e planta (PAP) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003^{1/}

Genótipos	PAPA		PAR		PAP	
	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P	Alto P	Baixo P
	----- mg vaso ⁻¹ -----					
CH 1 x 2	14,31c ^A	10,34a ^B	8,25a ^A	6,74a ^A	22,56c ^A	17,09b ^B
CH 1 x 3	15,04c ^A	11,40a ^B	14,85a ^A	10,31a ^B	29,89b ^A	21,71a ^B
CH 1 x 4	14,86c ^A	8,00b ^B	13,39a ^A	10,63a ^A	28,25b ^A	18,63b ^B
CH 1 x 5	16,08b ^A	12,24a ^B	12,08a ^A	8,45a ^A	28,16b ^A	20,70b ^B
CH 1 x 6	11,34d ^A	12,60a ^A	13,75a ^A	15,82a ^A	25,09c ^A	28,42a ^A
CH 2 x 3	16,83b ^A	9,58b ^B	10,24a ^A	9,02a ^A	27,07c ^A	18,60b ^B
CH 2 x 4	13,32c ^A	9,35b ^B	9,83a ^A	8,85a ^A	23,15c ^A	18,20b ^B
CH 2 x 5	13,81c ^A	7,98b ^B	10,45a ^A	8,80a ^A	24,25c ^A	16,78b ^B
CH 2 x 6	12,64d ^A	9,12b ^B	12,71a ^A	8,03a ^B	25,35c ^A	17,15b ^B
CH 3 x 4	16,60b ^A	11,66a ^B	13,76a ^A	9,17a ^B	30,36b ^A	20,83b ^B
CH 3 x 5	17,68b ^A	12,00a ^B	15,52a ^A	13,24a ^A	33,20b ^A	25,24a ^B
CH 3 x 6	22,15a ^A	13,19a ^B	20,46a ^A	12,71a ^B	42,61a ^A	25,90a ^B
CH 4 x 5	15,10c ^A	9,00b ^B	14,50a ^A	9,55a ^B	29,60b ^A	18,54b ^B
CH 4 x 6	18,18b ^A	11,59a ^B	12,57a ^A	14,25a ^A	30,74b ^A	25,84a ^B
CH 5 x 6	13,89c ^A	9,03b ^B	10,22a ^A	6,19a ^A	24,11c ^A	15,22b ^B
(1) Sol da Manhã	11,33d ^A	7,78b ^B	12,76a ^A	7,37a ^B	24,08c ^A	15,16b ^B
(2) BR 106	11,70d ^A	6,24b ^B	8,32a ^A	5,24a ^A	20,03d ^A	11,47b ^B
(3) AG 9010	14,66c ^A	8,43b ^B	10,76a ^A	11,04a ^A	25,43c ^A	19,46b ^B
(4) BR 201	10,09d ^A	7,03b ^B	7,26a ^A	9,78a ^A	17,36d ^A	16,81b ^A
(5) DKB 747	12,75d ^A	8,08b ^B	8,43a ^A	8,79a ^A	21,18d ^A	16,87b ^A
(6) Caiano	12,44d ^A	9,10b ^B	11,12a ^A	8,42a ^A	23,56c ^A	17,52b ^B
P 3041	13,42c ^A	7,77b ^B	9,34a ^A	7,21a ^A	22,76c ^A	14,98b ^B
DKB 333	11,08d ^A	7,63b ^B	7,89a ^A	5,31a ^A	18,97d ^A	12,94b ^B
Médias:						
. CH	15,46	10,47	12,84	10,12	28,29	20,59
. Cultivares	12,18	7,76	9,49	7,90	21,67	15,65
. Geral	14,32 ^A	9,53 ^B	11,67 ^A	9,34 ^B	25,99 ^A	18,87 ^B

^{1/} Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente, pelos testes F e de Scott-Knott, respectivamente, a 5% de probabilidade.

Tabela 11 – Redução relativa de P acumulado nas biomassas secas da parte aérea, raiz e planta inteira de genótipos de milho cultivados em vaso, em relação ao solo com alto nível de P. Viçosa, 2003^{1/}

Genótipos	P acumulado		
	Parte Aérea	Raiz	Planta
	----- % -----		
CH 1 x 2	27,7	18,2	24,2
CH 1 x 3	24,2	30,5	27,4
CH 1 x 4	46,2	20,6	34,1
CH 1 x 5	23,9	30,0	26,5
CH 1 x 6	0,0	0,0	0,0
CH 2 x 3	43,1	11,9	31,3
CH 2 x 4	29,8	9,9	21,4
CH 2 x 5	42,2	15,8	30,8
CH 2 x 6	27,8	36,9	32,4
CH 3 x 4	29,8	33,4	31,4
CH 3 x 5	32,1	14,7	24,0
CH 3 x 6	40,4	37,9	39,2
CH 4 x 5	40,4	34,2	37,3
CH 4 x 6	36,2	0,0	16,0
CH 5 x 6	35,0	39,4	36,9
(1) Sol da Manhã	31,3	42,2	37,1
(2) BR 106	46,7	37,1	42,7
(3) AG 9010	42,5	0,0	23,5
(4) BR 201	30,3	0,0	3,1
(5) DKB 747	36,7	0,0	20,3
(6) Caiano	26,8	24,3	25,6
P 3041	42,1	22,8	34,2
DKB 333B	31,1	32,7	31,8
Médias:			
. CH	31,9	22,2	27,5
. Cultivares	35,9	19,9	27,3
. Geral	33,3	21,4	27,4

^{1/} Redução (%) = [(produtividade média de biomassa, em baixo P – produtividade média de biomassa, em alto P)/(produtividade média de biomassa, em alto P) x 100] (SOUZA, 2003).

Abaixo do obtido pela BR 201. Considerando as parte da planta e ela inteira, constatou-se que houve maiores acúmulos de P para CH 1 x 6, CH 3 x 5, CH 3 x 6 e CH 4 x 6, superando os melhores cultivares. Aparentemente, CH 1 x 6 e CH 3 x 6 foram os mais eficientes na absorção de P. Considerando apenas a parte aérea e planta inteira, destacou-se também CH 1 x 3.

Marschner (1995) relatou que o requerimento de P para ótimo crescimento das plantas está entre 3 e 5 mg P g⁻¹ de matéria seca. Neste trabalho, os genótipos de milho apresentaram, para alta e baixa disponibilidade de P, teores foliares entre 0,88 e 1,34 e entre 0,82 e 1,16 mg P g⁻¹ de matéria seca, respectivamente. Na raiz, esse teor variou de 0,57 a 1,34 e 0,61 a 1,24 mg P g⁻¹ de matéria seca. Fernandes (2001), em plantas de milho colhido aos 32 dias do plantio, obteve teores foliares de P de 0,83 mg P g⁻¹ de matéria seca. Quando adultas, com grãos fisiologicamente maduros, o teor foliar em P, analisado em 27 híbridos, variou de 2,49 a 3,19 mg P g⁻¹ de matéria seca. Os teores de P abaixo do ideal encontrado em plantas jovens possivelmente estão associados à época de colheita da planta, em que a taxa de absorção do nutriente não é proporcional ao ganho de biomassa, ocasionando o efeito de diluição no tecido vegetal (JARREL e BEVERLY, 1981; CHAPIN e BIELESKI, 1982; VASCONCELLOS *et al.*, 1999; RESENDE *et al.*, 2000).

Baker *et al.* (1970), em duas épocas de colheita, aos 16 e 29 dias após o plantio, avaliaram os ganhos de biomassa e de P em híbridos de milho. Verificaram que as maiores taxas de crescimento e de acúmulo de P nas plantas ocorreram no segundo período de avaliação, mas, proporcionalmente, o ganho de biomassa foi superior, ocasionando a diluição de P na planta. Esse comportamento pode permitir a ocorrência de sintomas de deficiência, que pode resultar em plantas com menor taxa de crescimento. Também pode significar alta eficiência de conversão do P adquirido em biomassa (JARREL e BEVERLY, 1981; LARCHER, 2000).

De acordo com Clark (1975), entre os 25 e 30 dias de plantio, a velocidade de absorção de P pelas raízes é máxima na maioria das plantas, permitindo melhor distinção entre genótipos para essa característica, além de permitir a diferenciação da eficiência de translocação e de crescimento da raiz e parte aérea (MACHADO *et al.*, 2001).

Neste trabalho, durante o período de cultivo, as plantas de milho sob estresse de P não apresentaram sintomas característicos de sua deficiência, exceto pelo menor crescimento das plantas.

4.1.4. Relação parte aérea/raiz

A relação parte aérea/raiz (RPR) pode ser de utilidade na seleção de plantas com maior tolerância a condições de estresse, desde que se possam identificar plantas que mantenham ou aumentem a biomassa de suas raízes sem redução significativa da parte aérea (HORST *et al.*, 1993; FÖRSE *et al.*, 1998; MACHADO *et al.*, 2001).

Os valores encontrados da RPRMS e RPRPA (Tabela 12) estão de acordo com os observados por vários autores (ALVES *et al.*, 1988; FÖHSE *et al.*, 1988), os quais, no geral, foram menores com a menor disponibilidade de P no solo. Com isso, há indicação de que a raiz apresente menor influência devido ao estresse, ou mesmo que ela seja a parte da planta, em tal condição, que receba maior quantidade de nutrientes, possibilitando a planta utilizar mecanismos que aumentem a eficiência de absorção de P, como maior crescimento radicular, aumento do número de raízes finas (maior área de absorção ou superfície radicular), liberação de substratos orgânicos e associações simbióticas (MARSCHNER, 1991; FAGERIA, 1998).

A escolha das plantas pelas raízes como órgão preferencial pode ser considerada estratégia de adaptação para aumentar a eficiência de absorção, principalmente de P e água, quando em baixa disponibilidade no solo. O aumento do particionamento preferencial de fotoassimilados e nutrientes minerais para a raiz somente não é significativo para nutrientes de baixa mobilidade (Ca e Bo); no entanto, para os de mobilidade alta (N e P) tem sido constatada a preferência radicular, com maior acúmulo de solutos e ganho de biomassa (SCHJORRING e JENSÉN, 1987; FÖHSE *et al.*, 1988; HORST *et al.*, 1993; MARSCHNER, 1995; MARSCHNER *et al.*, 1996).

A avaliação apenas da biomassa radicular pode limitar a compreensão dos diferentes graus de tolerância das plantas aos estresses, visto que as modificações na morfologia, como comprimento e ramificação, pode, ser mais

Tabela 12 – Relações parte aérea/raiz para biomassa seca (RPRMS) e P acumulado (RPRPA) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003

Genótipos	RPRMS			RPRPA		
	Alto P	Baixo P	Média	Alto P	Baixo P	Média
CH 1 x 2	0,95	0,97	0,96	1,77	1,53	1,65
CH 1 x 3	0,81	0,87	0,84	1,03	1,11	1,07
CH 1 x 4	0,91	0,83	0,87	1,12	0,78	0,95
CH 1 x 5	0,99	1,18	1,08	1,40	1,48	1,44
CH 1 x 6	0,73	0,73	0,73	0,82	0,80	0,81
CH 2 x 3	1,22	0,80	1,01	1,71	1,09	1,40
CH 2 x 4	1,09	0,84	0,97	1,49	1,13	1,31
CH 2 x 5	0,85	0,79	0,82	1,34	0,91	1,12
CH 2 x 6	0,83	0,90	0,86	0,99	1,14	1,07
CH 3 x 4	0,97	0,86	0,91	1,21	1,34	1,27
CH 3 x 5	0,92	0,84	0,88	1,19	0,91	1,05
CH 3 x 6	0,75	0,98	0,87	1,19	1,07	1,13
CH 4 x 5	0,96	0,66	0,81	1,09	0,94	1,01
CH 4 x 6	0,79	0,72	0,75	1,45	0,81	1,13
CH 5 x 6	0,86	0,98	0,92	1,36	1,46	1,41
(1) Sol da Manhã	0,57	1,03	0,80	0,89	1,09	0,99
(2) BR 106	1,11	1,18	1,15	1,42	1,21	1,32
(3) AG 9010	1,01	0,73	0,87	1,37	0,76	1,07
(4) BR 201	0,82	0,77	0,79	1,39	0,72	1,06
(5) DKB 747	0,95	0,71	0,83	1,51	0,92	1,22
(6) Caiano	0,89	0,85	0,87	1,12	1,09	1,10
P 3041	0,93	0,80	0,86	1,44	1,08	1,26
DKB 333B	1,00	0,76	0,88	1,41	1,44	1,43
Médias:						
. CH	0,91	0,86	0,89	1,28	1,10	1,19
. Cultivares	0,91	0,85	0,89	1,32	1,04	1,18
. Geral	0,91	0,86	0,88	1,29	1,08	1,19

importantes (não-avaliadas) para explicar os mecanismos de eficiência de absorção do P (GOURLEY *et al.*, 1993; CHASSOT e RICHNER, 2002). As combinações híbridas CH 3 x 5 e CH 3 x 6, com alta produtividade de MSPA e MSR, apresentaram, respectivamente, RPRMS de 0,92 e 0,75, para alta disponibilidade de P, e de 0,84 e 0,98, para baixa disponibilidade (Tabelas 7 e 12). Esse aumento para CH 3 x 6, quando cultivado em baixa disponibilidade de P, foi devido a proporção de perda de biomassa de raiz ter sido superior (2,2 vezes) à perda de biomassa da parte aérea, o que não aconteceu com CH 3 x 5. Certamente essa CH possa apresentar menor sensibilidade de redução de biomassa da parte aérea ou de raiz, quando submetida ao estresse de fósforo. No entanto, apesar da biomassa seca de raiz de CH 3 x 5 superar, em torno de 7%, à de CH 3 x 6, esta apresentou produtividade de parte aérea superior, em torno de 6%, evidenciando sua maior capacidade de uso do P absorvido (conversão de biomassa).

Para RPRPA, as combinações CH 3 x 5 e CH 3 x 6 apresentaram valores semelhantes em alto P, mas em baixo P houve redução desta relação, embora CH 3 x 6 tenha mantido o P em quantidade superior na parte aérea. Percebe-se, portanto, que além da maior capacidade de conversão de P em biomassa, esta combinação híbrida possivelmente também apresenta maior capacidade de translocação de P para a parte aérea que CH 3 x 5. Essa eficiência, geralmente, não depende apenas de mecanismos isolados de tolerância, visto que maiores absorção, translocação, distribuição e utilização podem atuar ao mesmo tempo na planta (FAGERIA, 1998). Em solos com deficiência de P, a eficiência de absorção pode ser considerada de maior importância, mas quando o P não é limitante, mecanismos que aumentem a eficiência de transporte e utilização poderão discriminar melhor os genótipos (MARTINEZ *et al.*, 1993a, b).

4.1.5. Índices de eficiência

A produção em baixa disponibilidade de P e a resposta produtiva quando as plantas são submetidas à alta disponibilidade do nutriente são critérios que podem ser utilizados para definição dos genótipos quanto à eficiência nutricional (FAGERIA e BALIGAR, 1993; FIDELIS, 2003). Com os

valores de EU e RU (Tabela 13), foi possível classificar os genótipos conforme a Figura 1.

Os índices de eficiência podem auxiliar na seleção dos melhores genótipos, desde que associados à maior capacidade de produção, pois expressam apenas a resposta relativa da planta (FAGERIA, 1998). As plantas com alta adaptação à baixa disponibilidade de P no solo não são, necessariamente, mais eficientes em convertê-lo em biomassa (eficientes). A maior adaptação, constatada neste trabalho, geralmente esteve associada a menores reduções de biomassa da planta, concordando com resultados obtidos por Fageria e Baligar (1993), o que nem sempre estava relacionado com altas produtividades dessa biomassa.

Plantas tidas apenas como eficientes, nesta classificação, são indicadas somente para condições de baixo P. No entanto, quando eficientes e responsivas, podem atender a diferentes locais. Portanto, para a alta e baixa disponibilidade de P, em ordem decrescente, seriam selecionadas CH 3 x 6, CH 3 x 4, CH 1 x 3, CH 4 x 5 e CH 1 x 5, tidas como eficientes e responsivas. Somente para condição de baixo P, alternativamente, seria possível selecionar CH 3 x 5, CH 4 x 6, CH 1 x 6, AG 9010, CH 2 x 3 e CH 2 x 4, pois são tidas como eficientes.

A classificação dos genótipos com base nessa metodologia é específica ao ambiente de pesquisa (genótipos e condições edafoclimáticas), pois o ponto de origem dos eixos depende do valor médio obtido a partir das médias dos valores dos tratamentos de cada experimento, o que, portanto, tem originado resultados diferenciados para o mesmo cultivo em vários trabalhos. Machado (1995), considerando a biomassa seca da parte aérea, também nos primeiros 30 dias da emergência das plantas, classificou o BR 106 como eficiente e o Caiano (de Sobrália), como eficiente e responsivo a P. Neste trabalho, o BR 106 foi considerado apenas responsivo e o Caiano não apresentou eficiência e resposta a fósforo.

Entre os genótipos avaliados, o que melhor satisfaz esse método de classificação é o CH 3 x 6, com RU igual a 21,1. O cultivar Sol da Manhã, apesar de apresentar a maior RU, teve baixa produção de biomassa, nas duas condições de disponibilidade de P (Tabelas 7 e 13).

Tabela 13 – Índices de eficiência de produção de biomassa sob estresse (EU), de resposta à utilização do nutriente (RU), de eficiência de utilização (IE), translocação (ET), recuperação (ER) e fisiológica (EF) e de suscetibilidade ao estresse (S) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003

Genótipos	EU	RU	IE			ET			ER	EF	S
			Alto P	Baixo P	Média	Alto P	Baixo P	Média			
	g vaso ⁻¹	kg kg ⁻¹	g ² mg ⁻¹			kg kg ⁻¹			---	kg kg ⁻¹	
CH 1 x 2	21,6	9,9	36,1	27,4	31,7	0,64	0,61	0,62	0,8	1261,3	0,90
CH 1 x 3	26,5	16,9	48,8	32,3	40,5	0,51	0,53	0,52	1,1	1434,9	1,14
CH 1 x 4	21,4	12,8	32,4	24,5	28,4	0,53	0,43	0,48	1,3	922,6	1,09
CH 1 x 5	22,0	11,9	32,5	23,3	27,9	0,57	0,59	0,58	1,0	1108,8	1,02
CH 1 x 6	27,0	0,9	30,4	25,7	27,9	0,45	0,44	0,45	0,0	0,0	0,08
CH 2 x 3	23,9	4,9	27,5	30,6	28,6	0,62	0,52	0,57	1,2	404,1	0,46
CH 2 x 4	23,9	3,8	30,5	31,4	30,8	0,58	0,52	0,55	0,7	538,0	0,37
CH 2 x 5	20,1	13,1	35,2	24,1	29,7	0,57	0,48	0,52	1,0	1220,0	1,16
CH 2 x 6	20,6	15,0	37,9	24,7	31,3	0,50	0,53	0,51	1,1	1268,1	1,25
CH 3 x 4	25,7	17,4	47,0	31,8	39,4	0,55	0,56	0,56	1,3	1264,2	1,18
CH 3 x 5	30,2	11,2	43,6	36,2	39,9	0,54	0,48	0,51	1,1	979,8	0,76
CH 3 x 6	30,0	21,1	46,9	34,8	40,7	0,53	0,51	0,52	2,3	879,0	1,22
CH 4 x 5	24,2	13,5	38,1	31,6	34,7	0,51	0,49	0,50	1,5	845,3	1,03
CH 4 x 6	27,5	10,3	39,0	29,2	34,0	0,59	0,45	0,52	0,7	1456,0	0,77
CH 5 x 6	18,9	13,6	33,3	23,4	28,4	0,58	0,59	0,58	1,2	1065,3	1,24
(1) Sol da Manhã	14,4	22,2	36,9	13,7	25,0	0,47	0,52	0,49	1,2	1724,3	1,92
(2) BR 106	12,2	12,4	21,6	13,0	17,3	0,58	0,55	0,57	1,2	1004,2	1,53
(3) AG 9010	24,4	7,7	34,8	30,6	32,7	0,58	0,43	0,50	0,8	897,1	0,67
(4) BR 201	14,0	4,1	16,3	11,6	13,8	0,58	0,42	0,50	0,1	5264,8	0,63
(5) DKB 747	20,1	11,2	36,6	23,8	30,1	0,60	0,48	0,54	0,6	1810,0	1,04
(6) Caiano	20,7	8,6	30,1	24,4	27,3	0,53	0,52	0,52	0,8	988,1	0,83
P 3041	16,2	15,2	31,5	17,6	24,5	0,59	0,52	0,55	1,1	1356,6	1,46
DKB 333B	15,3	8,3	23,4	18,0	20,7	0,58	0,59	0,59	0,8	958,4	1,02
Médias:											
. CH	24,2	11,8	37,3	28,7	32,9	0,55	0,52	0,53	1,1	976,5	0,91
. Cultivares	17,2	11,2	28,9	19,1	23,9	0,56	0,50	0,53	0,8	1750,4	1,14
. Geral	21,8	11,6	34,4	25,4	29,8	0,56	0,51	0,53	1,0	1245,7	0,99

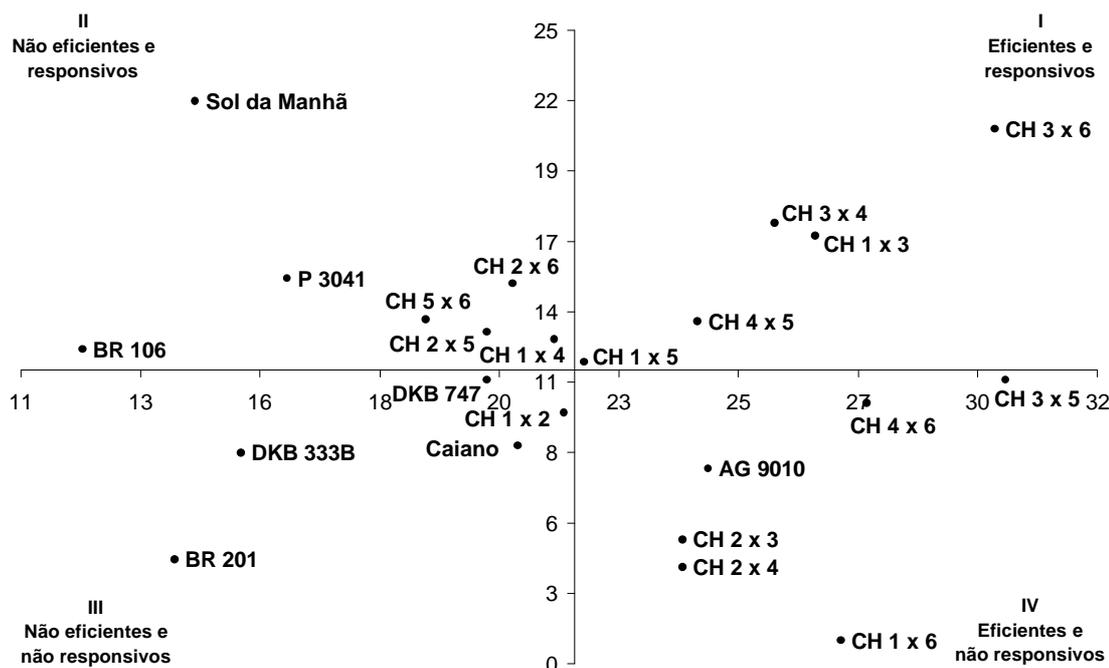


Figura 1 – Eficiência no uso e resposta à aplicação de fósforo de genótipos de milho, em vaso (eixo das abscissas: EU; eixo das ordenadas: RU).

O índice de eficiência de utilização de P (IE) (SIDDIQI e GLASS, 1981) geralmente apresenta valores maiores quando as plantas são submetidas a condições limitadas do nutriente (FURLANI *et al.*, 1985; GILL *et al.*, 1992; CIARELLI *et al.*, 1998). Neste trabalho, essa tendência ocorreu de forma inversa, para a maioria dos genótipos, possivelmente pelo menor incremento de acúmulo de P em relação ao de biomassa, quando passaram da condição de baixa para de alta disponibilidade de P (Tabela 8), o que pode ser característico de cultivares mais produtivos. Machado *et al.* (2004), avaliando duas populações de milho, contrastantes em produtividade, verificaram que as com maiores produtividades, mesmo quando em alta disponibilidade de fósforo, apresentaram eficiência de utilização de P 229,2% superior ao que foi obtido pela população de menor potencial produtivo.

Ainda sobre o IE, observa-se que as CH apresentaram valores 50% superiores aos obtidos pelos cultivares. Nas CH, os maiores IE foram obtidos por CH 3 x 5, CH 3 x 6 e CH 1 x 3, e entre os cultivares, o AG 9010. Os cultivares com menores IE foi o Sol da Manhã, BR 106 e BR 201. Machado *et al.* (2001) observaram, também, para o Sol da Manhã os menores índices de

eficiência de utilização. Apesar de CH 3 x 5 e CH 3 x 6 e o cultivar AG 9010 terem apresentado maiores IE, necessitaram de maiores acúmulos de P para obter maiores produções de biomassa (Tabelas 7 e 10). Considerando também os valores dos percentuais de redução de biomassa e de P acumulado em baixa disponibilidade do nutriente (Tabelas 8 e 11), CH 3 x 5 foi superior a CH 3 x 6, pois, apesar de produzir estatisticamente a mesma quantidade de biomassa, precisou acumular menor quantidade de fósforo.

Para o índice de eficiência de translocação (ET), os valores foram semelhantes entre os genótipos, exceto para CH 1 x 2, nas duas doses de P, e para CH 2 x 3 e DKB 747, em alta disponibilidade do nutriente, que apresentaram valores superiores a 0,60 (Tabela 13). Os genótipos que apresentam ET acima de 0,50 possivelmente acumulam mais P na parte aérea, e, conseqüentemente, têm menor probabilidade de apresentar sintomas de deficiência nessa parte superior da planta, evitando que o seu teor no tecido vegetal não se apresente abaixo do crítico (RESENDE *et al.*, 2000). Por outro lado, pode-se também concluir que os genótipos com alta produção de biomassa, nas duas doses de P, e com ET menor ou igual a 0,50, podem ser considerados eficientes na utilização de P, com alta conversão em biomassa; esse comportamento foi observado em CH 3 x 6. Portanto, a correlação desse índice com dados de produtividade é de extrema importância para comprovar a eficácia na diferenciação e classificação das plantas.

Considerando, agora, o índice de eficiência de recuperação de P (ER), em ordem decrescente, CH 3 x 6 apresentou ER 53% superior ao segundo melhor genótipo. Os melhores cultivares, em relação a essa característica, foram o Sol da Manhã e BR 106. Considerando o ciclo do milho como sendo de 120 dias e que ele consiga recuperar até 10% do P adicionado ao solo (BALIGAR e BENNETT, 1986), a combinação CH 3 x 6 até os 30 dias de idade, com um quarto do ciclo de vida, conseguiu recuperar 25% do fósforo possível. Considerando ainda que CH 3 x 6 apresenta ciclo superprecoce de maturação, essa estimativa ficaria subestimada. A capacidade de recuperação do nutriente pelas plantas depende do tipo de solo, da espécie ou variedade, da estação do ano e do regime pluviométrico, como também da dose, da qualidade, do manejo e do tipo do fertilizante empregado (BALIGAR *et al.*, 2001; GAVA *et al.*, 2003). Considerando a capacidade dos solos de cerrado em reter os íons

fosfato, pela quantidade de P recuperado por CH 3 x 6, este pode apresentar-se como genótipo promissor.

O índice de eficiência fisiológica (EF) expressa a capacidade de ganho de biomassa pela planta por unidade de nutriente acumulado. Caso os genótipos apresentassem valores semelhantes de biomassa, aqueles com menores quantidades de P acumulado teriam os maiores índices, por convertê-lo melhor em produtividade. Como as biomassas dos genótipos em alta disponibilidade de P também divergiram, os valores de EF, neste caso, são pouco conclusivos, não permitindo comparação eficiente entre eles (Tabelas 7, 10 e 13) (GOURLEY *et al.*, 1993, 1994). Apesar de assemelhar-se ao índice de eficiência de utilização proposto por Sidiqqi e Glass (1981), este apresenta maior correlação com dados de produtividade.

Com o índice de suscetibilidade ao estresse (S) pode-se estimar o nível de tolerância dos genótipos à baixa disponibilidade de P no solo. Quanto menor for a redução da produção de biomassa da planta, quando posta em estresse (dose inferior de P), menor será o valor de S, definindo, portanto, as de maior tolerância. Pode-se propor como regra de classificação que valor de $S \leq 0,80$ indica maior tolerância da planta, $0,81 \geq S \leq 1,19$ tolerância média e $S \geq 1,20$ baixa tolerância. Portanto, os cultivares Sol da Manhã e BR 106 são considerados como de tolerância baixa, DKB 747 e Caiano de tolerância média e AG 9010 e BR 201 de tolerância alta. Como os valores de S são relativos, nem sempre menores S estão associados às plantas com maior potencial produtivo (Tabela 13). Para classificação das CH, depois do cultivar AG 9010, com baixo S e alta produtividade de biomassa na menor dose de fósforo, destacam-se CH 1 x 6, CH 3 x 5 e CH 4 x 6.

Nota-se que a seleção de plantas com base apenas nos índices de eficiência pode não ser eficaz, dependendo de observações adicionais do potencial produtivo, visto que, dependendo do critério utilizado, a classificação dos genótipos é alterada (BAKER *et al.*, 1970; FAGERIA, 1998). Análises adicionais, como as de correlação, poderão indicar os melhores índices para seleção de plantas em locais com presença de estresses.

4.1.6. Análise de correlação

Estimativas altas e positivas de correlação foram verificadas para biomassas secas e acúmulos de P nas partes e na planta total, entre os níveis de P; nas demais características não houve correlação, ou esta foi de baixa expressão. A maior produção de biomassa, na raiz ou parte aérea, esteve associada a menores teores e maiores acúmulos de P no tecido vegetal. Houve também alta correlação entre a produção da biomassa seca e o acúmulo de P entre raízes e parte aérea. Dentre as variáveis avaliadas, a raiz da planta teve maior importância para alteração dos valores das relações parte aérea/raiz, pela presença de correlações negativas, apesar de essas estimativas terem sido também baixas (Tabela 14). No entanto, mediante a facilidade de obtenção, a alta correlação com as demais características e por representar a produtividade da planta em estágio juvenil, a biomassa seca da parte aérea poderá ser a única variável avaliada em experimentos futuros, reduzindo os custos, o trabalho e o tempo de caracterização dos genótipos.

Nos índices de eficiência, podem-se definir aqueles que melhor classificam os genótipos quanto à eficiência a P, através de estimativas de correlação com características da planta (Tabela 15), principalmente as relacionadas com a produtividade (SCHENK e BABER, 1979).

Correlações altas e positivas, quando considerados as biomassas secas e os acúmulos de P, foram observadas com a IE (Tabela 15). Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Elliott e Läuchli (1985). Machado *et al.* (2004) observaram correlações altas e positivas para IE ao considerar parâmetros radiculares (área e comprimento). Apesar dos resultados, é possível obter genótipos com elevada eficiência de utilização, sem, contudo serem eficientes, por apresentarem baixa translocação de P da raiz para a parte aérea.

Tabela 14 – Correlações de Pearson entre características da planta, em alta e baixa disponibilidade de P de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003

Características	MSPA	MSR	MSP	TPPA	TPR	PAPA	PAR	PAP	RPRMS	RPRPA
Alto P										
MSPA	-	0,772**	0,921**	-0,409*	-0,017	0,875**	0,744**	0,872**	0,094	-0,086
MSR	-	-	0,959**	-0,255	-0,122	0,718**	0,907**	0,885**	-0,542**	-0,486**
MSP	-	-	-	-0,339	-0,083	0,832**	0,889**	0,933**	-0,290	-0,336
TPPA	-	-	-	-	-0,098	0,062	-0,210	-0,088	-0,085	0,373*
TPR	-	-	-	-	-	0,021	0,300	0,182	0,213	-0,369*
PAPA	-	-	-	-	-	-	0,707**	0,915**	0,059	0,110
PAR	-	-	-	-	-	-	-	0,932**	-0,419*	-0,607**
PAP	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,209	-0,290
RPARMS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,671**
RPARCP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Baixo P										
MSPA	-	0,826**	0,942**	-0,478*	-0,257	0,918**	0,640**	0,830**	0,052	0,015
MSR	-	-	0,967**	-0,433*	-0,248	0,744**	0,816**	0,862**	-0,497**	-0,365**
MSP	-	-	-	-0,473*	-0,263	0,856**	0,774**	0,887**	-0,273	-0,211
TPPA	-	-	-	-	0,382*	-0,103	-0,161	-0,150	-0,011	0,179
TPR	-	-	-	-	-	-0,133	0,339	0,154	0,104	-0,558**
PAPA	-	-	-	-	-	-	0,654**	0,877**	0,063	0,106
PAR	-	-	-	-	-	-	-	0,937**	-0,423*	-0,664**
PAP	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,240	-0,373*
RPARMS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,608**
RPARCP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alto P vs. Baixo P	0,846**	0,620**	0,803**	0,363*	0,274	0,689**	0,615**	0,721**	-0,003	0,305

* e ** = significativos a 5 e a 1% de probabilidade, de acordo como teste t, de Student.

Tabela 15 – Correlações de Pearson entre características da planta e índices de eficiência e de suscetibilidade ao estresse de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003

Características	RU	EU ₂	ET	ER	EF	S
Alto P						
MSPA	0,419*	0,940**	0,012	0,636**	-0,455*	0,002
MSR	0,642**	0,841**	-0,324	0,570**	-0,258	0,218
MSP	0,581**	0,936**	-0,193	0,634**	-0,362*	0,135
TPPA	-0,202	-0,504**	0,080	-0,111	0,543**	-0,094
TPR	-0,268	-0,169	-0,379*	0,123	-0,192	-0,285
PAPA	0,355*	0,761**	0,070	0,659**	-0,318	-0,035
PAR	0,491**	0,745**	-0,461*	0,604**	-0,336	0,071
PAP	0,462*	0,814**	-0,227	0,682**	-0,355*	0,023
RPRMS	-0,423*	-0,108	0,564**	0,023	-0,267	-0,297
RPRPA	-0,325	-0,207	0,756**	-0,099	0,107	-0,178
Baixo P						
MSPA	0,126	0,865**	-0,095	0,356*	-0,440*	-0,324
MSR	-0,125	0,821**	-0,353*	0,105	-0,398*	-0,553**
MSP	-0,018	0,878**	-0,253	0,222	-0,435*	-0,475*
TPPA	-0,131	-0,565**	0,086	-0,461*	0,436*	0,062
TPR	-0,102	-0,476*	-0,571**	-0,346	0,574**	-0,001
PAPA	0,075	0,729**	-0,070	0,176	-0,348	-0,342
PAR	-0,210	0,489**	-0,674**	-0,138	-0,110	-0,552**
PAP	-0,099	0,647**	-0,460*	-0,006	-0,231	-0,508**
RPRMS	0,409*	-0,145	0,414*	0,361*	-0,061	0,504**
RPRPA	0,246		0,840**	0,258	-0,234	0,324
Média						
MSPA	0,298	0,942**	-0,037	0,530**	-0,466*	-0,150
MSR	0,336	0,923**	-0,374*	0,404*	-0,355*	-0,136
MSP	0,328	0,958**	-0,232	0,473*	-0,415*	-0,146
TPPA	-0,204	-0,645**	0,100	-0,335	0,596**	-0,024
TPR	-0,196	-0,450*	-0,615**	-0,221	0,372*	-0,124
PAPA	0,259	0,811**	0,013	0,498**	-0,359*	-0,177
PAR	0,181	0,695**	-0,623**	0,286	-0,257	-0,245
PAP	0,231	0,797**	-0,355*	0,407*	-0,323	-0,228
RPRMS	-0,007	-0,179	0,692**	0,273	-0,232	0,150
RPRPA	-0,047	-0,132	0,989**	0,010	-0,080	0,092
RU	-					
EU ₂	0,372*	-				
ET	0,022	-0,112	-			
ER	0,761**	0,470*	0,145	-		
EF	-0,014	-0,433*	-0,087	-0,328	-	
S	0,876**	-0,074	0,165	0,565**	0,115	-

* e ** = significativos a 5 e a 1% de probabilidade, de acordo como teste t, de Student.

4.1.7. Análises dialélicas

Nas Tabelas 16 e 17 têm-se os efeitos de CGC e CEC, considerando as análises dialélicas simples e conjuntas. O efeito de CGC foi superior para a maioria das características, exceto RPARMS, em alto P; RPARPA, em alta e baixa disponibilidade de P; e TPPA e TPR, em baixa disponibilidade do nutriente. Pelos componentes quadráticos da análise dialélica, constata-se que os efeitos da CEC superam os da CGC, exceto para MSPA, MSP e PAP, quando na presença do estresse nutricional e na análise conjunta. Portanto, a importância de genitores para formação de híbridos supera, no geral, à da obtenção de plantas através de métodos intrapopulacionais (DUVICK, 1997). Pandey *et al.* (1994) e Furlani *et al.* (1998), após avaliação de genótipos de milho para o cultivo em solos ácidos e com baixa disponibilidade de P, observaram nas combinações híbridas as maiores tolerâncias e produtividades.

Com a análise conjunta e os efeitos significativos de CEC x A, pode-se inferir que haja importância diferenciada das CH em cada dose de P, o que confirma a importância da seleção específica para reduzir o efeito da interação genótipo x ambiente. O TPR e PAR não apresentaram significância para as interações, significando que os níveis de P discriminam os genótipos de forma semelhante, o que demonstra o valor limitado dessas características para a seleção (SOUZA, 2003).

A CEC e CGC, para biomassa seca, podem ser correlacionadas com as médias observadas dessa característica, identificando-se os melhores genótipos (Tabelas 7 e 18). As combinações híbridas CH 3 x 6 e CH 3 x 5 foram as que apresentaram os maiores valores de biomassa e de CEC e CGC.

Baseando-se na média dos níveis de P, seriam selecionados somente CH 3 x 6 e, considerada apenas a MSP, CH 3 x 5. Neste trabalho, com o uso dos parâmetros da análise dialélica (CGC e CEC) para seleção de cultivares e híbridos, seriam selecionados o AG 9010, CH 3 x 6 e CH 3 x 5, o que concorda com os melhoristas, que preferem as combinações híbridas com alta CEC, com participação de, no mínimo, um genitor com CGC também alta (CRUZ e REGAZZI, 2001).

Tabela 16 – Resumo da análise dialélica individual da biomassa seca da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e planta inteira (MSP), teores de P na parte aérea (TPPA) e raiz (TPPR), ao P acumulado na parte aérea (PAPA), raiz (PAR) e planta (PAP) e relações parte aérea/raiz da biomassa seca (RPRMS) e P acumulado (RPRPA) de genótipos de milho cultivados em vasos. Viçosa, 2003

Fontes de Variação	GL	Quadrados Médios									
		MSPA	MSR	MSP	TPPA	TPR	PAPA	PAR	PAP	RPRMS	RPRPA
Alto P											
C. híbridas	14	9,63 ^{ns}	22,98 ^{ns}	55,35 ^{ns}	0,019 ^{**}	0,015 ^{ns}	13,90 ^{ns}	17,74 ^{**}	51,02 ^{ns}	0,034 ^{**}	0,137 [*]
. CGC	5	20,86 ^{ns}	38,97 ^{ns}	102,86 ^{ns}	0,006 ^{ns}	0,005 ^{ns}	19,59 ^{ns}	31,08 ^{**}	93,65 ^{ns}	0,057 ^{**}	0,123 ^{ns}
. CEC	9	3,40 ^{**}	14,10 ^{**}	28,96 ^{**}	0,026 ^{**}	0,020 [*]	10,74 ^{ns}	10,32 [*]	27,34 ^{**}	0,021 ^{ns}	0,144 [*]
Componentes quadráticos:											
. \hat{f}_g		2,46	4,52	12,18	0,000	0,000	2,25	3,30	10,98	0,005	0,007
. \hat{f}_s		1,11	5,62	11,77	0,010	0,006	4,58	2,82	10,79	0,003	0,040
Baixo P											
C. híbridas	14	5,32 ^{ns}	10,33 ^{**}	24,87 ^{ns}	0,010 ^{ns}	0,027 ^{**}	5,91 [*]	15,16 ^{**}	32,17 ^{ns}	0,034 ^{**}	0,128 [*]
. CGC	5	9,12 ^{ns}	13,71 ^{**}	40,19 ^{**}	0,010 ^{ns}	0,031 [*]	9,28 ^{**}	16,40 ^{**}	46,34 ^{ns}	0,026 ^{ns}	0,046 ^{ns}
. CEC	9	3,21 [*]	8,44 ^{**}	16,35 ^{**}	0,100 ^{ns}	0,024 [*]	4,03 [*]	14,47 ^{**}	24,29 ^{**}	0,038 ^{**}	0,173 [*]
Componentes quadráticos:											
. \hat{f}_g		0,99	1,36	4,35	0,001	0,003	0,96	1,46	5,07	0,002	0,002
. \hat{f}_s		1,02	2,80	5,46	0,002	0,008	1,22	4,89	9,26	0,012	0,054
Resíduo	46	1,18	2,85	5,43	0,005	0,009	1,59	4,68	5,77	0,013	0,065

^{ns}, 0, * e ** = não-significativos e significativo a 10, 5 e a 1%, respectivamente, pelo teste F.

Tabela 17 – Resumo da análise dialélica conjunta para a biomassa seca da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e planta inteira (MSP), teores de P na parte aérea (TPPA) e raiz (TPPR), do P acumulado na parte aérea (PAPA), raiz (PAR) e planta (PAP) e relações parte aérea/raiz da biomassa seca (RPRMS) e P acumulado (RPRPA) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003

Fontes de Variação	GL	Quadrados Médios									
		MSPA	MSR	MSP	TPPA	TPR	PAPA	PAR	PAP	RPRMS	RPRPA
Comb. Híb.	14	12,49**	25,07*	66,46**	0,015 ^{ns}	0,023*	14,39*	26,18**	65,73**	0,036 ^{ns}	0,195*
. CGC	5	26,04**	46,21**	134,03**	0,012*	0,023 ^{ns}	23,24*	43,33**	123,82**	0,031 ^{ns}	0,121 ^{ns}
. CEC	9	4,95*	13,32 ^{ns}	28,92 ^{ns}	0,017 ^{ns}	0,033*	9,47 ^{ns}	16,66 ^{ns}	33,46 ^{ns}	0,038 ^{ns}	0,235*
Doses (D)	1	259,48	240,75	1000,10	0,074	0,005	372,41	110,95	889,90	0,030	0,471
C x D	14	2,47*	8,25**	13,76**	0,014**	0,013 ^{ns}	5,42**	6,71 ^{ns}	17,44**	0,032*	0,070 ^{ns}
. CGC x D	5	3,94*	6,48 ^{ns}	9,03 ^{ns}	0,004 ^{ns}	0,013 ^{ns}	5,63**	4,13 ^{ns}	16,11*	0,051**	0,048 ^{ns}
. CEC x D	9	1,65 ^{ns}	9,23**	16,39**	0,020**	0,012 ^{ns}	5,30**	8,14 ^{ns}	18,18**	0,021 ^{ns}	0,082 ^{ns}
Resíduo	46	1,18	2,85	5,43	0,005	0,009	1,59	4,68	5,77	0,013	0,065
Componentes:											
. \hat{f}_g		1,48	2,53	7,70	0,000	0,000	1,25	2,12	7,02	0,000	0,000
. \hat{f}_s		0,65	1,91	4,52	0,002	0,004	1,57	1,82	5,48	0,003	0,026

^{ns}, * e ** = não-significativos e significativo a 5 e a 1%, respectivamente, pelo teste F.

Como o AG 9010 apresenta alta precocidade, é esperado que ele e nas CH em que faça parte, durante o período de crescimento inicial (até os 30 dias após a germinação), supere os demais genótipos, apresentando alta eficiência de conversão de biomassa. Os genótipos Caiano e DKB 747, por apresentarem características radiculares que permitem maior tolerância a solos de cerrado, em combinação com AG 9010, possivelmente produzam CH mais tolerantes e produtivos (Tabela 1). Outras características que fazem parte de atividades metabólicas das plantas, como produção de hormônios vegetais, taxa fotossintética, fotoperiodismo e produção de ATP, ainda não-relacionados como mecanismos de adaptação das plantas, podem também garantir a superioridade das combinações híbridas (JARREL e BEVERLY, 1981; MARSCHNER, 1991; GOURLEY *et al.*, 1993).

Para os teores de P no tecido vegetal, em baixa disponibilidade do nutriente, as maiores CEC foram observadas na parte aérea, em CH 1 x 6 e CH 3 x 4, e na raiz, em CH 1 x 6, CH 2 x 5 e CH 3 x 5. Para o P acumulado, na parte aérea tem-se CH 1 x 4 e CH 4 x 6 e na raiz, CH 1 x 6, CH 3 x 5 e CH 4 x 6. Nos cultivares, para a CGC e o P acumulado, os maiores valores foram obtidos apenas pelo AG 9010 (Tabelas 19 e 20).

Como observado, os teores e acúmulos de P apresentaram importância inferior para a seleção das plantas. Dentre os genótipos selecionados com maior produtividade de biomassa, apenas CH 3 x 5 apresentou alta CEC, mas apenas com relação à raiz, o que pode significar que a superioridade genética com essa característica seja promissora para obtenção de maior tolerância e eficiência da absorção, em condições de estresse (SILVA *et al.*, 1992). Furlani *et al.* (1998) também constataram altos valores de CEC para características radiculares, que estavam associadas às CH que apresentaram maior produtividade de biomassa.

Nas relações parte aérea/raiz na produção de biomassa, em baixa disponibilidade de P, apenas CH 3 x 6 apresentou valores superiores de CEC. Na relação parte/aérea do P acumulado, foram verificadas altas CEC apenas para as CH que não apresentaram alta produção de biomassa (CH 1 x 2, CH 1 x 5, CH 3 x 4 e CH 5 x 6), embora apresentassem altos valores de RPRPA (Tabelas 12 e 21). Como as relações parte aérea/raiz são valores relativos, é necessária a observação dos dados de biomassa relativos à sua obtenção. Na

Tabela 19 – Capacidades geral (CGC) e específica (CEC) de combinação para teores de P na parte aérea (TPPA) e raiz (TPR) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003

Genótipos	TPPA			TPR		
	Alto P	Baixo P	Média	Alto P	Baixo P	Média
CEC						
CH 1 x 2	0,040	0,021	0,030	-	-	-0,141
CH 1 x 3	-0,107	-0,024	-0,065	-	-	-0,076
CH 1 x 4	0,052	-0,132	-0,040	-	-	0,078
CH 1 x 5	0,088	0,057	0,073	-	-	0,034
CH 1 x 6	-0,074	0,077	0,002	-	-	0,104
CH 2 x 3	0,127	0,026	0,077	-	-	0,071
CH 2 x 4	-0,019	-0,017	-0,018	-	-	0,014
CH 2 x 5	0,017	-0,008	0,005	-	-	0,038
CH 2 x 6	-0,165	-0,023	-0,094	-	-	0,018
CH 3 x 4	-0,095	0,098	0,002	-	-	-0,069
CH 3 x 5	-0,029	-0,038	-0,033	-	-	0,048
CH 3 x 6	0,103	-0,063	0,020	-	-	0,025
CH 4 x 5	-0,075	0,015	-0,030	-	-	0,001
CH 4 x 6	0,137	0,035	0,086	-	-	-0,024
CH 5 x 6	-0,002	-0,027	-0,014	-	-	-0,122
CGC						
(1) Sol da Manhã	-	-	0,009	-	-	0,040
(2) BR 106	-	-	-0,020	-	-	-0,064
(3) AG 9010	-	-	-0,020	-	-	-0,006
(4) BR 201	-	-	-0,018	-	-	0,003
(5) DKB 747	-	-	-0,003	-	-	-0,009
(6) Caiano	-	-	0,051	-	-	0,037

Tabela 21 – Capacidades geral (CGC) e específica (CEC) de combinação para relações parte aérea/raiz da biomassa seca (RPRMS) e P acumulado (RPRPA) de genótipos de milho cultivados em vaso. Viçosa, 2003

Genótipos	RPRMS			RPRPA		
	Alto P	Baixo P	Média	Alto P	Baixo P	Média
CEC						
CH 1 x 2	-	-	0,014	-	-	0,315
CH 1 x 3	-	-	-0,079	-	-	-0,105
CH 1 x 4	-	-	0,001	-	-	-0,169
CH 1 x 5	-	-	0,164	-	-	0,231
CH 1 x 6	-	-	-0,099	-	-	-0,273
CH 2 x 3	-	-	0,055	-	-	0,064
CH 2 x 4	-	-	0,062	-	-	0,036
CH 2 x 5	-	-	-0,136	-	-	-0,240
CH 2 x 6	-	-	0,005	-	-	-0,175
CH 3 x 4	-	-	0,035	-	-	0,156
CH 3 x 5	-	-	-0,046	-	-	-0,158
CH 3 x 6	-	-	0,035	-	-	0,042
CH 4 x 5	-	-	-0,070	-	-	-0,131
CH 4 x 6	-	-	-0,028	-	-	0,108
CH 5 x 6	-	-	0,088	-	-	0,298
CGC						
(1) Sol da Manhã	-0,038	0,066	0,014	-	-	-0,006
(2) BR 106	0,099	-0,004	0,048	-	-	0,152
(3) AG 9010	0,033	0,009	0,021	-	-	-0,004
(4) BR 201	0,043	-0,102	-0,029	-	-	-0,066
(5) DKB 747	0,008	0,034	0,021	-	-	0,023
(6) Caiano	-0,146	-0,003	-0,075	-	-	-0,099

Tabela 11, verifica-se que apesar de essas CH apresentarem valores de P acumulado superiores ao obtido pelo melhor cultivar quanto à parte aérea, esses valores foram baixos para a raiz, elevando a RPRPA. A baixa produtividade revela a menor eficiência do uso de P por essas combinações (Tabela 13) (FURLANI *et al.*, 1998).

com base nos valores da CGC, entre os cultivares, destacaram-se quanto à RPRMS o BR 106 e Sol da Manhã, nas duas doses de P, respectivamente, e quanto à RPRPA, somente o BR 106 (Tabela 21). As CH com maiores CEC quanto à RPRMS e RPRPA apresentaram também pelo menos um genitor com alta CGC, apesar de esse fato depender da característica avaliada, pois ao relacionar as características entre si os genótipos não são classificados semelhantemente. Como a classificação dos melhores genótipos tomando por base a RPRMS e RPRPA, divergiu do que foi obtido pelas características anteriores a ponto de não haver coincidência com os genótipos de maior produtividade, é preferível não considerá-los como critérios de seleção (FURLANI *et al.*, 1998; SILVA *et al.*, 1992).

4.2. Experimento de campo

4.2.1. Análise de variância, produtividade de grãos e alturas de plantas e de espigas

Todas as fontes de variação foram significativas para a produtividade de grãos. Os efeitos para alturas da planta e da espiga também podem ser observados nas Tabelas 22 e 23.

A variabilidade dos dados nos locais com alta intensidade de estresses pode apresentar-se elevada, devido à sua influência na média e no erro experimental (GRANADOS *et al.*, 1993; SCAPIM *et al.*, 1995). Comparado com o local 1, os locais 2, 4 e 6 foram os que apresentaram as menores médias de produtividade de grãos (redução média de 30%), e novamente o local 6, o maior CV (elevação de 54,7%), embora sendo de magnitude média, segundo Scapim *et al.* (1995). O local 3 reduziu a produtividade de grãos em 17,5% e o local 5, em apenas 6,8% (Tabelas 22, 24 e 25).

Tabela 22 – Resumo da análise de variância individual para produtividade de grãos (kg ha⁻¹) e alturas da planta e da espiga (cm) de genótipos de milho cultivados em campo, nas localidades de Viçosa (1, 2 e 3), Capinópolis (4), Coimbra (5) e Florestal (6), no ano de 2003

Fontes de Variação	GL	Locais					
		1	2	3	4	5	6
Produtividade de Grãos							
Blocos	1	0,4967	0,0457	0,3964	0,0852	0,3566	0,0217
Genótipos (G)	22	1,4529**	2,1896**	3,2004**	2,3846**	6,4857**	1,8702*
. Comb. Híbridas (CH)	14	0,9478**	1,2750*	2,2225**	1,2987**	3,3637**	1,7979*
. Cultivares (C)	7	2,4734**	4,0459**	4,4713**	4,8806**	9,2383**	2,0023*
. CH vs. C (Gr)	1	1,3806*	1,9992*	7,9945**	0,1147 ^{ns}	30,9256**	1,9579 ^{ns}
Resíduo	22	0,3023	0,4355	0,1602	0,1838	0,3129	0,7049
Total	45	-	-	-	-	-	-
CV (%)		11,5	9,6	7,1	9,1	8,8	17,8
Índice ambiental		1,335	-0,732	0,135	-0,804	0,871	-0,805
Altura da Planta							
Blocos	1	-	-	120,011	922,522	3,506	31,391
Genótipos (G)	22	-	-	690,595**	455,901**	387,125 ^{ns}	589,494*
. Comb. Híbridas (CH)	14	-	-	321,995**	255,200 ^{ns}	227,866 ^{ns}	556,705 ^{ns}
. Cultivares (C)	7	-	-	1208,515**	846,491**	229,656 ^{ns}	406,857 ^{ns}
. CH vs. C (Gr)	1	-	-	2225,548**	531,589 ^{ns}	3719,032**	2327,003**
Resíduo	22	-	-	76,166	159,976	424,643	262,300
Total	45	-	-	-	-	-	-
CV (%)		-	-	4,3	6,1	10,7	9,8
Altura da Espiga							
Blocos	1	-	-	276,115	463,391	4,891	570,522
Genótipos (G)	22	-	-	557,072**	265,903*	424,068 ^{ns}	618,783 ^{ns}
. Comb. Híbridas (CH)	14	-	-	157,397**	155,619 ^{ns}	154,929 ^{ns}	384,819 ^{ns}
. Cultivares (C)	7	-	-	1088,834**	478,678**	730,247*	1064,429*
. CH vs. C (Gr)	1	-	-	2430,188**	320,453 ^{ns}	2048,749**	774,751 ^{ns}
Resíduo	22	-	-	48,698	113,982	229,837	359,067
Total	45	-	-	-	-	-	-
CV (%)		-	-	6,5	10,0	16,9	21,1

^{ns}, * e ** = não-significativos e significativo a 5 e a 1%, respectivamente, pelo teste F.

Tabela 23 – Resumo da análise de variância conjunta para produtividade de grãos e de espigas (kg ha⁻¹) e alturas da planta e da espiga (cm) de genótipos de milho cultivados em campo, em 2003

Fontes de Variação	GL	Quadrado Médio		Quadrado Médio	
		Peso de Grãos	GL	Altura da Planta	Altura da Espiga
Blocos/Locais	6	0,2337	4	269,36	328,72
Genótipos (G)	22	7,1986**	22	684,99 ^{ns}	716,57*
. Comb. Híbridas (CH)	14	4,0231**	14	358,96 ^{ns}	289,13 ^{ns}
. Cultivares (C)	7	10,7284**	7	1316,88*	1585,35*
. CH vs. C (Gr)	1	26,9468*	1	826,19 ^{ns}	619,25 ^{ns}
Locais (A)	5	40,4027**	3	17471,54**	4663,15*
G x A	110	2,0769**	66	479,37**	383,08**
. CH x A	70	1,3765**	42	334,27 ^{ns}	187,88 ^{ns}
. C x A	35	3,2767**	21	458,21*	592,28**
. Gr x A	5	3,4852**	3	2658,99**	1651,63**
Resíduo	132	0,3499	88	230,77	187,90
Total	275	-	183	-	-
CV (%)		10,73		7,90	13,92

^{ns}, * e ** = não-significativo e significativos a 5 e a 1%, respectivamente, pelo teste F.

Dessa forma, podem-se classificar os locais, em relação à intensidade de estresse, como ótimos ou com baixa ocorrência de estresses (locais 1 e 5), de faixa intermediária de estresse (Local 3) e desfavorável ou com alta intensidade de estresse (locais 2, 4 e 6) (SOUZA, 2003).

Os locais que proporcionaram as maiores reduções na produtividade de grãos certamente apresentam limites edáficos (e, ou, climáticos) em maior complexidade (Tabela 3). Além da baixa disponibilidade de P, a presença de acidez elevada, alta disponibilidade de Al e Mn e baixos teores de Ca e Mg pode caracterizar a baixa fertilidade, característica dos solos que estão sob vegetação de cerrado e em zonas tropicais (KER *et al.*, 1992). A eficiência de absorção de P pelas plantas também está associada à adaptação aos solos de acidez elevada e com alta disponibilidade de Al. Plantas tolerantes nesses dois parâmetros geralmente apresentam maiores capacidades de absorção de P e de produtividade, de biomassa ou grãos (BALIGAR *et al.*, 1993; BALIGAR *et al.*, 1997).

Tabela 24 – Médias de produtividade de grãos (t ha⁻¹) de genótipos de milho cultivados em campo, nas localidades de Viçosa (1, 2 e 3), Capinópolis (4), Coimbra (5) e Florestal (6), em 2003^{1/}

Genótipos	Locais						Média
	1	2	3	4	5	6	
CH 1 x 2	5,615 c ^A	5,060 a ^A	3,495 d ^B	2,740 d ^B	3,815 e ^B	2,915 c ^B	3,940
CH 1 x 3	7,060 b ^A	6,040 a ^B	6,360 b ^B	5,205 b ^C	7,815 b ^C	5,000 b ^A	6,247
CH 1 x 4	6,615 b ^A	4,365 b ^B	6,260 b ^A	4,270 c ^B	7,120 b ^B	4,830 b ^A	5,577
CH 1 x 5	5,640 c ^B	4,640 b ^B	6,905 a ^A	4,475 c ^B	5,545 d ^B	6,770 a ^A	5,663
CH 1 x 6	7,200 b ^A	4,275 b ^B	4,715 c ^B	4,505 c ^B	7,565 b ^B	5,420 b ^A	5,613
CH 2 x 3	6,810 b ^A	5,065 a ^B	6,250 b ^A	5,135 b ^B	6,520 c ^B	3,960 c ^A	5,623
CH 2 x 4	7,480 a ^A	4,270 b ^C	6,975 a ^A	5,890 b ^B	6,930 c ^A	5,505 b ^B	6,175
CH 2 x 5	6,530 b ^B	5,155 a ^C	5,315 b ^C	4,665 c ^C	8,545 a ^A	5,490 b ^C	5,950
CH 2 x 6	6,450 b ^B	4,545 b ^C	5,270 b ^C	4,525 c ^C	9,315 a ^A	4,800 b ^C	5,818
CH 3 x 4	7,060 b ^A	4,305 b ^B	5,725 b ^B	5,085 b ^B	6,675 c ^A	4,755 b ^B	5,601
CH 3 x 5	8,430 a ^A	4,145 b ^C	5,420 b ^B	5,210 b ^B	6,520 c ^B	5,870 a ^B	5,933
CH 3 x 6	6,810 b ^B	6,470 a ^B	7,810 a ^A	6,245 b ^B	7,400 b ^A	4,620 b ^C	6,559
CH 4 x 5	7,995 a ^A	4,580 b ^C	5,830 b ^B	4,365 c ^C	7,305 b ^A	3,615 c ^C	5,615
CH 4 x 6	7,980 a ^A	5,475 a ^B	6,035 b ^B	4,650 c ^C	5,935 c ^B	4,185 c ^C	5,710
CH 5 x 6	7,375 b ^A	5,260 a ^B	6,955 a ^A	4,245 c ^B	7,765 b ^A	5,175 b ^B	6,129
(1) Sol da Manhã	3,600 d ^A	2,685 c ^B	2,535 d ^B	2,685 d ^B	4,255 d ^A	4,075 c ^A	3,306
(2) BR 106	6,330 b ^A	5,035 a ^B	6,295 b ^A	4,290 c ^B	6,845 c ^A	3,440 c ^C	5,373
(3) AG 9010	6,680 b ^A	5,525 a ^A	4,545 c ^B	4,295 c ^B	4,940 d ^B	4,050 c ^B	5,006
(4) BR 201	5,840 c ^A	4,680 b ^B	4,245 c ^B	4,080 c ^B	5,375 d ^A	4,045 c ^B	4,711
(5) DKB 747	7,685 a ^A	4,905 a ^C	7,295 a ^A	5,715 b ^B	3,195 e ^D	6,105 a ^B	5,817
(6) Caiano	7,115 b ^A	3,395 c ^C	5,570 b ^B	3,400 d ^C	5,960 c ^B	3,230 c ^C	4,778
P 3041	8,315 a ^A	6,065 a ^B	5,960 b ^B	4,880 c ^B	9,190 a ^A	5,065 b ^B	6,579
DKB 333B	6,960 b ^A	4,080 b ^C	4,190 c ^C	7,795 a ^A	2,345 e ^D	5,410 b ^B	5,130
Médias:							
. CH	7,003	4,910	5,955	4,747	6,985	4,861	5,743
. Cultivares	6,566	4,546	5,079	4,643	5,263	4,428	5,087
. Geral	6,851	4,783	5,650	4,711	6,386	4,710	5,515

^{1/} Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem estatisticamente, pelo teste F e de Scott-Knott, respectivamente, a 5% de probabilidade.

Tabela 25 – Redução (%) da potencial produtivo de genótipos de milho cultivados em campo, nas localidades de Viçosa (1, 2 e 3), Capinópolis (4), Coimbra (5) e Florestal (6), em relação ao experimento com alto nível de P

Genótipos	Locais					Média
	2	3	4	5	6	
CH 1 x 2	9,9	37,8	51,2	32,1	48,1	35,8
CH 1 x 3	14,4	9,9	26,3	0,0	29,2	16,0
CH 1 x 4	34,0	5,4	35,4	0,0	27,0	20,4
CH 1 x 5	17,7	0,0	20,7	1,7	0,0	8,0
CH 1 x 6	40,6	34,5	37,4	0,0	24,7	27,4
CH 2 x 3	25,6	8,2	24,6	4,3	41,9	20,9
CH 2 x 4	42,9	6,8	21,3	7,4	26,4	21,0
CH 2 x 5	21,1	18,6	28,6	0,0	15,9	16,8
CH 2 x 6	29,5	18,3	29,8	0,0	25,6	20,6
CH 3 x 4	39,0	18,9	28,0	5,5	32,6	24,8
CH 3 x 5	50,8	35,7	38,2	22,7	30,4	35,6
CH 3 x 6	5,0	0,0	8,3	0,0	32,2	9,1
CH 4 x 5	42,7	27,1	45,4	8,6	54,8	35,7
CH 4 x 6	31,4	24,4	41,7	25,6	47,6	34,1
CH 5 x 6	28,7	5,7	42,4	0,0	29,8	21,3
(1) Sol da Manhã	25,4	29,6	25,4	0,0	0,0	16,1
(2) BR-106	20,5	0,6	32,2	0,0	45,7	19,8
(3) AG-9010	17,3	32,0	35,7	26,0	39,4	30,1
(4) BR-201	19,9	27,3	30,1	8,0	30,7	23,2
(5) DKB-747	36,2	5,1	25,6	58,4	20,6	29,2
(6) Caiano	52,3	21,7	52,2	16,2	54,6	39,4
P 3041	27,1	28,3	41,3	0,0	39,1	27,2
DKB 333B	41,4	39,8	0,0	66,3	22,3	34,0
Médias:						
. CH	28,9	16,8	32,0	7,2	31,1	23,2
. Cultivares	28,6	19,4	33,5	18,1	31,8	26,3
. Geral	29,3	18,9	31,4	12,3	31,2	24,6

De acordo com as médias de produtividade de grãos (Tabela 24), as CH foram superiores aos cultivares em torno de 13%. Considerando o alto grau de melhoramento genético em que a cultura do milho já foi submetida, o aumento da produtividade de grãos obtido pode ser considerado satisfatório, principalmente considerando que serão cultivados em locais com presença de estresses (CASTLEBERRY *et al.*, 1984; GRANADOS *et al.*, 1993; GAMA *et al.*, 2002). Uma análise econômica, considerando cultivares de milho sob condições de estresse abiótico, pode complementar essa observação.

Considerando a média dos locais, com produtividades de grãos superiores à do cultivar DKB 747 (5,8 t ha⁻¹), que foi a que apresentou a maior produtividade, destacam-se CH 1 x 3, CH 2 x 4, CH 2 x 5, CH 3 x 5, CH 3 x 6 e CH 5 x 6. No entanto, pelo valor alcançado pelo cultivar P 3041 e pela sua comprovada eficiência produtiva em locais com presença de estresses, nenhuma CH teria sido selecionada. Com base em cada local, juntamente com o cultivar com maior produtividade, destacam-se no local 1 o DKB 747, CH 3 x 5, CH 4 x 5 e CH 4 x 6; no local 2 o AG 9010, CH 1 x 3 e CH 3 x 6; nos locais 3 e 4 o DKB 747 e CH 3 x 6; no local 5 o BR 106, CH 1 x 3, CH 1 x 4, CH 1 x 6, CH 2 x 4, CH 2 x 5, CH 2 x 6, CH 3 x 6, CH 4 x 5 e CH 5 x 6; e no local 6 o DKB 747 e CH 1 x 5. Outro cultivar que poderia ter sido incluído como genitor por apresentar alto potencial produtivo seria o P 3041. O cultivar Sol da Manhã apresentou a menor produtividade de grãos, em torno de 3,3 t ha⁻¹ (Tabela 24).

A superioridade das CH em relação aos genitores confirma a heterose alcançada pelos cruzamentos entre plantas neste trabalho. Gama *et al.* (2002), avaliando duas condições de fertilização nitrogenada, obteve, para todos os híbridos simples, superioridade em relação aos cultivares, quanto à produtividade de grãos, em torno de 52,8%.

As doses de P utilizadas nos locais 1 e 2, que foram de 28 e 112 kg ha⁻¹ de P₂O₅, caracterizando condições experimentais de baixa e alta disponibilidade de P, respectivamente, seriam suficientes para que as plantas apresentassem, respectivamente, produtividades de até 4 t ha⁻¹ e entre 6 e 8 t ha⁻¹ de grãos (ALVES *et al.*, 1999). Poucos genótipos produziram abaixo de 4 t ha⁻¹: CH 1 x 2 (em todos os locais), CH 4 x 5 (no local 6), Sol da Manhã (nos locais 2, 3 e 4) e Caiano (nos locais 2, 4 e 6). Quando em locais com baixa

incidência de estresses, a produtividade da maioria dos genótipos atingiu a faixa esperada de 6 a 8 t ha⁻¹.

Devido à capacidade que os locais que apresentam faixa intermediária e alta ocorrência de estresses têm de reduzir a produtividade de grãos, pode-se verificar, comparado ao local 1, que houve tolerância equivalente entre as CH e nos cultivares (Tabela 25), o que comprova a eficiência na transferência dos genes para adaptação. Gama *et al.* (2002), com relação a dois níveis de fertilização nitrogenada, verificaram redução na produtividade de grãos de linhagens e híbridos (obtidos pela combinação destas linhagens), de 42,0 e 35,4%, respectivamente. Neste trabalho, conforme a Tabela 25, constatou-se que as CH apresentaram variação na redução de produtividade de grãos, de acordo com o local de cultivo, ficando, na média, em torno de 23%. Para os cultivares esse valor foi de 26%. Portanto, as CH apresentaram menor sensibilidade à presença do estresse nutricional que seus genitores.

Nem sempre menor sensibilidade ao estresse significa, ao mesmo tempo, tolerância e potencial produtivo altos, pois é uma estimativa relativa. Apesar de CH 3 x 6 apresentar redução, em média, de apenas 9,1%, ele foi inferior ao cultivar P 3041 quanto à produtividade de grãos, na maioria dos locais, cuja redução média foi de 27,2% (Tabelas 24 e 25). No entanto, a produtividade de grãos de CH 3 x 6 foi equivalente ou superior a P 3041, dependendo do local, portanto considerado o genótipo com maior produtividade em solos com baixa disponibilidade de fósforo.

Quando há efeitos significativos de interações entre tratamentos e os locais de cultivo, espera-se que haja respostas diferenciadas das CH e dos cultivares, dependendo do local de cultivo, e pela especificidade ambiental dos genótipos deduz-se também que haja a presença de tipos ou intensidade diferenciada de mecanismos de adaptação ao estresse (SINCLAIR e VADEZ, 2002). Portanto, seleções específicas poderão ser importantes para aumentar o potencial produtivo das plantas (SOUZA, 2003).

Para as alturas da planta e da espiga, apesar da ocorrência de significância da interação cultivares x locais, o mesmo não foi constatado para CH x locais. Pelo teste de média realizado para agrupar os genótipos, houve diferenças significativas para altura da planta, nos locais 3 e 6, e altura da espiga, no local 6 (Tabelas 24, 25 e 26).

Tabela 26 – Alturas da planta e da espiga (cm) de genótipos de milho cultivados em campo, nas localidades de Viçosa (3), Capinópolis (4), Coimbra (5) e Florestal (6)^{1/}

Genótipos	Locais									
	3		4		5		6		Médias	
	AP	AE	AP	AE	AP	AE	AP	AE	AP	AE
CH 1 x 2	205 a	109 a	199 a	104 a	193 a	95 a	171 a	97 b	192	101
CH 1 x 3	187 b	103 a	215 a	98 a	189 a	90 a	146 b	73 b	184	91
CH 1 x 4	217 a	120 a	205 a	110 a	198 a	96 a	164 b	84 b	196	102
CH 1 x 5	189 b	103 a	209 a	102 a	178 a	76 a	168 a	85 b	186	91
CH 1 x 6	221 a	121 a	205 a	102 a	202 a	92 a	173 a	89 a	200	101
CH 2 x 3	205 a	110 a	199 a	103 a	198 a	100 a	186 a	98 a	197	103
CH 2 x 4	219 a	126 a	234 a	125 a	176 a	73 a	204 a	115 a	208	110
CH 2 x 5	215 a	111 a	229 a	115 a	181 a	81 a	183 a	106 a	202	103
CH 2 x 6	235 a	134 a	210 a	115 a	170 a	69 a	183 a	109 a	199	107
CH 3 x 4	198 a	108 a	210 a	112 a	181 a	81 a	184 a	107 a	193	102
CH 3 x 5	213 a	103 a	195 a	99 a	191 a	90 a	161 b	86 b	190	95
CH 3 x 6	201 a	110 a	203 a	99 a	190 a	82 a	148 b	75 b	185	92
CH 4 x 5	214 a	110 a	200 a	108 a	199 a	85 a	150 b	72 b	191	94
CH 4 x 6	219 a	116 a	216 a	124 a	173 a	80 a	152 b	106 a	190	106
CH 5 x 6	211 a	112 a	220 a	116 a	174 a	81 a	176 a	91 a	195	100
(1) Sol da Manhã	174 b	73 b	173 a	82 a	221 a	120 a	149 b	66 b	179	85
(2) BR 106	220 a	126 a	227 a	114 a	213 a	111 a	166 a	90 a	206	110
(3) AG 9010	153 b	65 b	175 a	78 a	212 a	109 a	125 b	54 b	166	76
(4) BR 201	201 a	100 a	202 a	104 a	194 a	102 a	157 b	85 b	188	98
(5) DKB 747	183 b	88 b	198 a	103 a	211 a	81 a	152 b	66 b	186	84
(6) Caiano	228 a	131 a	226 a	116 a	193 a	98 a	156 b	98 a	201	111
P 3041	203 a	107 a	212 a	121 a	204 a	98 a	172 a	87 b	198	103
DKB 333B	201 a	92 b	210 a	108 a	194 a	96 a	163 b	78 b	192	93
Médias:										
. CH	210	113	210	109	186	85	170	93	194	100
. Cultivares	195	98	203	103	205	99	155	84	189	96
. Geral	205	108	207	107	193	90	165	90	192	98

^{1/} Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

O local 6 foi onde ocorreram as maiores reduções das alturas da planta e da espiga, de 40 cm (19,5%) e 18 cm (16,7%), respectivamente, em relação ao local 3. Por serem características de importância secundária e sua classificação permanecer constante entre os locais de cultivo avaliados, preferiu-se avaliar os genótipos somente através da produtividade de grãos. No entanto, as alturas da planta e da espiga, que têm relações evidentes com a tolerância das plantas a locais com presença de estresses e pela facilidade de mensuração, podem ser consideradas como critérios de seleção das plantas.

4.2.2. Índices de eficiência

Na Tabela 27 estão os índices de eficiência, utilizados para diferenciação dos genótipos quanto à tolerância e eficiência do uso de P.

Como definido anteriormente, EU e RU são índices utilizados para classificação das plantas quanto à eficiência nutricional, se alta ou baixa, e à resposta à melhoria do ambiente, conforme metodologia de Fageria e Baligar (1993). Portanto, CH 1 x 3 e CH 3 x 6 são indicados apenas para condições ambientais com estresse, pois, por ocasião de melhoria ambiental, não aumentariam significativamente a produtividade de grãos. Os genótipos indicados para condições amplas (alta e baixa disponibilidade de P) seriam CH 4 x 6, CH 5 x 6, DKB 747 e P 3041 (Figura 2).

A definição das plantas quanto à eficiência e à resposta aos nutrientes depende do nutriente, da produtividade dos genótipos e dos níveis ambientais considerados. Fidelis (2003) considerou o BR 201 e BR 106 como eficientes e responsivos quando avaliou os genótipos em dois níveis contrastantes de nitrogênio, enquanto neste trabalho, em que os genótipos foram submetidos a dois níveis contrastantes de P, eles foram classificados como não-eficiente e eficiente, respectivamente, e, ambos, não-responsivos. Reis Júnior *et al.* (1998), avaliando níveis contrastantes de N e P, classificaram, quanto ao P, o BR 106 e o Caiano como sendo eficientes e responsivos.

Tabela 27 – Produtividade de grãos ($t\ ha^{-1}$) em alta e baixa disponibilidade de P (EU), a resposta à utilização de P (RU) e índice de suscetibilidade ao estresse (S) de genótipos de milho cultivados em campo, em 2003

Genótipos	Produtividade na Dose Alta de P	EU	RU	S
CH 1 x 2	5,615	5,060	6,61	0,33
CH 1 x 3	7,060	6,040	12,14	0,48
CH 1 x 4	6,615	4,365	26,79	1,13
CH 1 x 5	5,640	4,640	11,90	0,59
CH 1 x 6	7,200	4,275	34,82	1,35
CH 2 x 3	6,810	5,065	20,77	0,85
CH 2 x 4	7,480	4,270	38,21	1,42
CH 2 x 5	6,530	5,155	16,37	0,70
CH 2 x 6	6,450	4,545	22,68	0,98
CH 3 x 4	7,060	4,305	32,80	1,29
CH 3 x 5	8,430	4,145	51,01	1,68
CH 3 x 6	6,810	6,470	4,05	0,17
CH 4 x 5	7,995	4,580	40,65	1,42
CH 4 x 6	7,980	5,475	29,82	1,04
CH 5 x 6	7,375	5,260	25,18	0,95
(1) Sol da Manhã	3,600	2,685	10,89	0,84
(2) BR 106	6,330	5,035	15,42	0,68
(3) AG 9010	6,680	5,525	13,75	0,57
(4) BR 201	5,840	4,680	13,81	0,66
(5) DKB 747	7,685	4,905	33,10	1,20
(6) Caiano	7,115	3,395	44,29	1,73
P 3041	8,315	6,065	26,79	0,90
DKB 333B	6,960	4,080	34,29	1,37
Médias:				
. CH	7,003	4,910	24,92	0,96
. Cultivares	6,566	4,546	24,04	0,99
. Geral	6,851	4,783	24,61	0,97

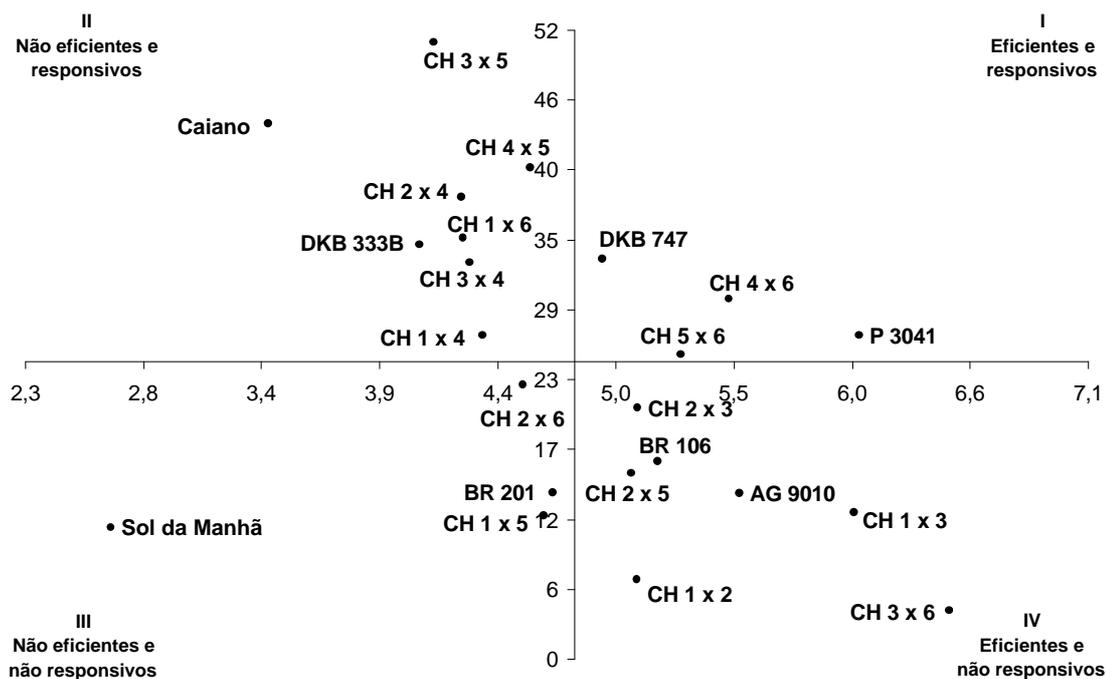


Figura 2 – Eficiência no uso e na resposta à aplicação de fósforo de genótipos de milho cultivados em campo (eixo das abscissas: EU; eixo das ordenadas: RU), em 2003.

De acordo com os valores de S, e conforme intervalos de valores considerados anteriormente, os cultivares DKB 747 e Caiano são considerados de tolerância baixa, Sol da Manhã de tolerância média e BR 106, AG 9010 e BR 201 de tolerância alta.

Na Tabela 28 apresentam-se os dados de correlação entre RU e S. Em locais com baixa ocorrência de estresses, genótipos com altos valores de RU apresentam também altos índices de suscetibilidade (S), ou seja, não são tolerantes a locais desfavoráveis ao cultivo, reduzindo significativamente a produção (Tabela 25). No entanto, quando em locais desfavoráveis, valores baixos de RU e S podem identificar os genótipos mais promissores, desde que apresentem alta EU (GAMA *et al.*, 2002). Para classificação das CH, e considerando a pressuposição anterior, CH 1 x 3 e CH 3 x 6 podem ser considerados importantes para obtenção de plantas, ou diretamente cultivados, para locais com estresse de P, pois apresentaram também alta produtividade de grãos.

Tabela 28 – Correlação entre produtividade de grãos e índices de eficiência de genótipos de milho cultivados em campo, em 2003

Caracteres	Produtividade de Grãos			RU
	Alto P	Baixo P	Média	
RU	0,675**	-0,424*	0,218 ^{ns}	-
S	0,487**	-0,617**	-0,010 ^{ns}	0,969**

^{ns}, * e ** = não-significativo e significativos a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

4.2.3. Análises dialélicas

Nos locais considerados, ambos os efeitos da CGC e CEC foram significativos, exceto no local 6, sendo apenas para CEC (Tabela 29). Apesar de os efeitos aditivos e não-aditivos estarem presentes, este último sobrepôs o primeiro na maioria dos locais (2, 3, 5 e 6), comprovado pelos componentes quadráticos, em que os efeitos de \hat{f}_s foram superiores aos de \hat{f}_g . A predominância de efeitos não-aditivos na resposta produtiva de grãos possibilita a seleção de genitores para a formação de híbridos com maior potencial produtivo. Geralmente os efeitos de CEC tem tido maior importância para locais desfavoráveis ao cultivo (Betrán *et al.*, 2003; Ceballos *et al.*, 1998). Apesar de o melhoramento intrapopulacional ser também importante para essa característica, ressalta-se que, no geral, as CH apresentaram produtividade superior à dos cultivares (Tabela 24) (DUVICK, 1997; GAMA *et al.*, 2002).

Com a análise dialélica conjunta (Tabela 30), constataram-se resultados semelhantes ao da análise individual, e com a informação adicional dos efeitos da interação de CGC e CEC com os locais, pode-se inferir novamente a necessidade da realização de seleção específica dos cultivares e CH em cada local (CRUZ e REGAZZI, 2001; SOUZA, 2003).

Com a CGC, a CEC (Tabela 31) e a produtividade de grãos (Tabela 24), em cada localidade ou na média destes, pode-se fazer a identificação dos melhores genótipos (CRUZ e REGAZZI, 2001). Considerando a média dos locais, a combinação híbrida CH 1 x 3 destaca-se por apresentar alta CEC, um dos genitores com alta CGC (AG 9010) e, dentre as CH, a maior produtividade, além de superar o DKB 747, que foi o cultivar com maior produtividade. Outra

Tabela 29 – Resumo da análise dialélica individual para produtividade de grãos de genótipos de milho cultivados em campo, nas localidades de Viçosa (1, 2 e 3), Capinópolis (4), Coimbra (5) e Florestal (6) (quadrados médios), em 2003

Fonte de Variação	GL	Locais ^{1/}					
		1	2	3	4	5	6
Combinações híbridas	14	1,275*	0,948**	2,222**	1,299**	3,364**	1,798*
. CGC	5	2,022**	0,760 ^o	1,601**	1,802**	2,026**	1,193 ^{ns}
. CEC	9	0,860 ^o	1,052**	2,568**	1,019**	4,107**	2,134*
Resíduo	22	0,436	0,302	0,160	0,184	0,313	0,705
Componentes:							
. \hat{f}_g		0,198	0,057	0,180	0,202	0,214	0,061
. \hat{f}_s		0,212	0,375	1,204	0,418	1,897	0,714

^{ns}, ^o, * e ** = não-significativo e significativos a 10, 5 e a 1%, respectivamente, pelo teste F.

Tabela 30 – Resumo da análise dialélica conjunta para produtividade de grãos de genótipos de milho cultivados em campo, com desdobramento do efeito de combinações híbridas em capacidade geral e específica de combinação para CGC e CEC, respectivamente, em 2003

Fonte de Variação	GL	Quadrados Médios
Combinações híbridas (C)	14	4,023**
. CGC	5	4,440**
. CEC	9	3,792*
Locais (A)	5	33,832
C x A	70	1,376**
. CGC x A	25	0,993**
. CEC x A	45	1,590**
Resíduo	132	0,350
Componentes:		
. \hat{f}_g		0,049
. \hat{f}_s		0,141

* e ** = significativos, respectivamente, a 5 e 1% de probabilidade, pelo teste F.

Tabela 31 – Capacidade geral (CGC) e específica (CEC) e combinação (CGC) de produtividade de grãos (t ha⁻¹) de genótipos de milho cultivados em campo, nas localidades de Viçosa (1, 2 e 3), Capinópolis (4), Coimbra (5) e Florestal (6)

Combinações	Locais ^{1/}						Média
	1	2	3	4	5	6	
CEC							
CH 1 x 2	-0,134	0,306	-1,333	-1,177	-2,454	-1,695	-1,081
CH 1 x 3	0,490	0,804	0,467	0,307	1,594	0,006	0,611
CH 1 x 4	-0,195	-0,114	0,552	0,027	1,141	0,165	0,263
CH 1 x 5	-0,880	-0,035	1,297	0,557	-0,863	1,097	0,196
CH 1 x 6	0,719	-0,961	-0,983	0,285	0,582	0,427	0,011
CH 2 x 3	0,051	-0,100	0,465	-0,203	-0,517	-0,468	-0,129
CH 2 x 4	0,481	-0,138	1,375	1,207	0,135	1,406	0,744
CH 2 x 5	-0,179	0,551	-0,186	0,307	1,321	0,383	0,366
CH 2 x 6	-0,220	-0,620	-0,321	-0,135	1,516	0,373	0,099
CH 3 x 4	-0,760	-0,585	-0,941	-0,579	-0,072	-0,272	-0,444
CH 3 x 5	0,900	-0,941	-1,146	-0,129	-0,656	-0,380	-0,265
CH 3 x 6	-0,681	0,823	1,155	0,604	-0,351	0,190	0,226
CH 4 x 5	0,225	0,251	-0,551	-0,319	0,371	-1,547	-0,262
CH 4 x 6	0,249	0,585	-0,436	-0,336	-1,574	-0,297	-0,302
CH 5 x 6	-0,660	0,174	0,585	-0,416	-0,173	-0,314	-0,035
CGC							
(1) Sol da Manhã	-0,722	-0,043	-0,510	-0,635	-0,766	0,158	-0,420
(2) BR-106	-0,533	-0,114	-0,617	-0,195	0,050	-0,408	-0,303
(3) AG-9010	0,288	0,369	0,448	0,786	0,002	-0,025	0,311
(4) BR-201	0,528	-0,389	0,263	0,131	-0,240	-0,353	-0,010
(5) DKB-747	0,238	-0,193	0,163	-0,194	0,189	0,654	0,143
(6) Caiano	0,200	0,369	0,253	0,108	0,764	-0,026	0,278
P-3041							
DKB-333							

CH que poderia ser selecionada é CH 3 x 6, embora apresente estimativa de CEC baixa. Apesar de CH 2 x 4 apresentar a maior CEC e alta produtividade, a CGC dos genitores foi negativa. Baseando-se em cada local, constata-se que as CH com valores de CEC e CGC (pelo menos para um dos genitores) altos e, ou, não-negativos apresentaram produtividades maiores que a do melhor cultivar, destacando-se no local 1, CH 3 x 5; no local 2, CH 1 x 3 e CH 3 x 6; no local 3, CH 3 x 6; no local 4, CH 2 x 4 e CH 3 x 6; no local 5, CH 1 x 6, CH 2 x 5 e CH 2 x 6; e no local 6, CH 1 x 5.

No entanto, em programas de melhoramento, prefere-se trabalhar com menor número de populações, para reduzir o tempo e o trabalho e aumentar a eficiência de seleção e de obtenção de novos cultivares. Portanto, selecionam-se, em geral, os cultivares com maior possibilidade de fornecer genes para adaptação semelhante ou superior à dos seus descendentes. Nesse caso, seriam selecionados o AG 9010 (3) e o Caiano (6), que estiveram presentes na maioria das CH selecionadas, exceto no local 6. Nesse aspecto, CH 1 x 3 seria a população de melhor comportamento produtivo, na média dos locais e, principalmente, para condições de baixo P (local 2). Outra CH que se faz presente em locais com faixa intermediária (local 3) ou alta ocorrência de estresses (local 4) é CH 3 x 6.

No local 6, talvez por apresentar altos níveis de estresse de P e, ou, de outros fatores edafoclimáticos, as plantas necessitariam apresentar características adicionais de adaptação para obterem maior produtividade (HAMMOND, 2004). A combinação CH 1 x 5, a única selecionada para esse local e que descende dos cultivares Sol da Manhã e DKB 747, possivelmente apresente essas características (Tabela 2).

As diferenças de comportamento das CH de um local para o outro reforçam a seleção e a recomendação de genótipos para locais específicos, uma vez que, sendo a seleção feita com base na média dos locais, os melhores híbridos não apresentariam alta produtividade em todos os locais avaliados (SOUZA, 2003).

As diferenças ambientais podem ser pareadas e comparadas através de estimativas de correlação com dados de CEC e produtividade de grãos. Verifica-se na Tabela 32, para essas características, que apenas seis pares de locais, dos 15 possíveis, apresentaram correlação positiva, e dessas as maiores foram verificadas entre os locais 3 x 4, 3 x 6 e 4 x 6, caracterizados

Tabela 32 – Correlação entre produtividade de grãos (PG) e capacidade específica de combinação (CEC) em locais de intensidade contrastantes de estresse

Pares ^{1/}	CEC	PG
Viçosa (1) x Viçosa (2)	-0,265 ^{ns}	-0,131 ^{ns}
Viçosa (1) x Viçosa (3)	-0,353 ^o	0,177 ^{ns}
Viçosa (1) x Capinópolis (4)	0,134 ^{ns}	0,409 ^o
Viçosa (1) x Coimbra (5)	0,117 ^{ns}	0,230 ^{ns}
Viçosa (1) x Florestal (6)	-0,074 ^{ns}	0,014 ^{ns}
Viçosa (2) x Viçosa (3)	0,399 ^o	0,376 ^o
Viçosa (2) x Capinópolis (4)	0,065 ^{ns}	0,228 ^{ns}
Viçosa (2) x Coimbra (5)	-0,085 ^{ns}	0,054 ^{ns}
Viçosa (2) x Florestal (6)	-0,163 ^{ns}	-0,253 ^{ns}
Viçosa (3) x Capinópolis (4)	0,713 ^{**}	0,714 ^{**}
Viçosa (3) x Coimbra (5)	0,203 ^{ns}	0,264 ^{ns}
Viçosa (3) x Florestal (6)	0,627 ^{**}	0,389 ^o
Capinópolis (4) x Coimbra (5)	0,430 ^o	0,405 ^o
Capinópolis (4) x Florestal (6)	0,852 ^{**}	0,386 ^o
Coimbra (5) x Florestal (6)	0,400 ^o	0,296 ^{ns}

^{ns}, ^o e ^{**} = não-significativo e significativos a 10 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

como de faixa intermediária (local 3) e com alta presença de estresses (locais 4 e 6). Não houve correlações significativas entre os locais sem estresse de disponibilidade de P (locais 1 e 5), e destes com os locais com estresse; no entanto, quando houve correlação, esta foi menor que 0,50. Esses resultados indicam que os alelos inerentes à produtividade de grãos, entre locais contrastantes, sejam diferentes ou atuem de forma diferenciada e, também, que a seleção para locais com estresse é eficiente, se realizada *in loco* (ATLIN e FREY, 1990; CECCARELI *et al.*, 1992; ZAVALA-GARCIA *et al.*, 1992; BYRNE *et al.*, 1995), para melhor detecção dos genes de eficiência nutricional (BÄNZIGER *et al.*, 1999).

Segundo Hohns (2001), a seleção dos melhores genótipos, considerando ao mesmo tempo a média ou qualquer das condições de cultivo, somente seria possível se as variâncias genéticas dessas condições fossem semelhantes e a correlação genética da produtividade entre locais contrastantes fosse positiva.

A descrição dos locais (solo e clima) e das populações de milho que formarão novos cultivares é essencial para que o processo de seleção se torne eficiente. Cultivares com características relacionadas à maior capacidade de adaptação certamente originarão linhagens superiores, permitindo rapidez do processo de melhoramento (BECK *et al.*, 1996; EDMEADES *et al.*, 1997; FURLANI *et al.*, 1998; BETRÁN *et al.*, 2003). Cultivares adaptados a condições de solo de acidez elevada ou com alta disponibilidade de Al provavelmente fornecer também plantas eficientes na absorção e uso de P (BALIGAR *et al.*, 1993; BALIGAR *et al.*, 1997). No entanto, locais com a presença de variados estresses podem dificultar ou reduzir a eficiência de seleção de novos cultivares, que deverão apresentar adaptação para uma complexidade de fatores (HAMMOND *et al.*, 2004).

4.3. Comparação de informações de campo e casa de vegetação

Correlações positivas entre resultados obtidos em casa de vegetação com os de campo permitem que melhorista utilizem o cultivo em ambientes controlados, como também reduzir o tempo, o trabalho e o espaço necessários para a seleção inicial dos genótipos, geralmente numeroso nessa etapa (Machado *et al.*, 2004).

Correlacionando os dados de produtividade de grãos, obtidos em condições de campo, com os da biomassa seca da parte aérea, obtidos em casa de vegetação, verifica-se que a correlação, embora positiva, foi baixa, variando de 0,19 a 0,46 (alta disponibilidade de P) e de 0,15 a 0,49 (baixa disponibilidade de P) (Tabela 33). No entanto, esses resultados permitem, com restrições, a seleção precoce de plantas em casa de vegetação. Vale ressaltar que para o cultivo das plantas nos vasos foi utilizado solo característico de cerrado, o que possivelmente tenha aproximado seus resultados com os de campo (MARSCHNER, 1995; NOVAIS e SMITH, 1999).

Apesar de as duas situações de cultivo não apresentarem precisamente os mesmos resultados, elas permitiram a ocorrência de diferenças entre os genótipos na maioria das características avaliadas, principalmente quanto à produtividade (da biomassa seca ou produtividade de grãos), pois houve superação dos CH sobre os cultivares e os efeitos não-

Tabela 33 – Correlação entre a produtividade de grãos (PG), em campo, e a biomassa seca da parte aérea (MS), em vasos, de genótipos de milho cultivados em vasos, em 2003

Locais ^{1/}	Vasos		
	Alto P	Baixo P	Médio
Viçosa (1)	0,359*	0,399*	0,279 ^o
Viçosa (2)	0,346 ^o	0,375*	0,281 ^o
Viçosa (3)	0,460*	0,481*	0,395*
Capinópolis (4)	0,197 ^{ns}	0,226 ^{ns}	0,145 ^{ns}
Coimbra (5)	0,280 ^o	0,292 ^o	0,243 ^{ns}
Florestal (6)	0,187 ^{ns}	0,150 ^{ns}	0,216 ^{ns}
Média	0,463*	0,487**	0,395*

^{ns}, ^o, * e ** = não-significativo e significativos a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

aditivos foram considerados os mais importantes na resposta das características sob condições de baixa disponibilidade de P (Tabelas 8, 16, 24 e 29).

Também, dentre os genótipos selecionados com maiores produtividades e parâmetros genéticos favoráveis à seleção, com alta CEC e CGC (pelo menos para um dos genitores), destacou-se CH 3 x 6, dos cultivares AG 9010 (3) e Caiano (6). Essa CH só não foi importante no Local 6, quando cultivada em campo.

Dentre os índices de eficiência, considerando nas Figuras 1 e 2 os quadrantes I e IV, os genótipos que foram eficientes em casa de vegetação também o foram em campo, englobando os melhores genótipos selecionados neste trabalho (CH 1 x 3, CH 3 x 6 e AG 9010). Também apresentaram, pelos valores de S (GAMA *et al.*, 2002), altas tolerâncias à condição de baixa disponibilidade de P no solo, tanto em casa de vegetação como em campo, os cultivares AG 9010 e BR 201.

5. CONCLUSÕES

Em casa de vegetação, considerando a massa seca da parte aérea, as combinações híbridas CH 3 x 6 e CH 3 x 5 e os genitores AG 9010 e Caiano foram considerados importantes para obtenção de cultivares produtivos, quando em baixa disponibilidade de P. Em campo, quanto à produtividade de grãos, destacaram-se novamente os genótipos CH 3 x 6, AG 9010 e, também, o CH 1 x 3.

Constatou-se a ocorrência de efeitos aditivos quanto não-aditivos, o que explica o comportamento das plantas sob baixa disponibilidade de P, sendo este último mais expressivo.

A seleção precoce foi eficiente, pois possibilitou a presença de diferenças entre plantas quanto à aquisição e ao uso de P, assemelhando, em alguns casos, com os resultados obtidos em campo.

Houve diferença na classificação dos genótipos, dependendo dos IEN, portanto devem ser utilizados aqueles com maior correlação com dados de produtividade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADÂMOLI, J.; MACEDO, J.; AZEVEDO, L. G.; NETTO, J. M. Caracterização da região dos cerrados. In: GOEDERT, W. J. (Ed.). *Solos dos cerrados. Tecnologias e estratégias de manejo*. Planaltina: Embrapa-CPAC, São Paulo: Nobel, 1986. p. 33-74.

ALLARD, R. W. *Princípios do melhoramento genético das plantas*. Rio de Janeiro: USAID, 1971. 380 p.

ALVES, V. M. C.; VASCONCELLOS, C. A.; FREIRE, F. M.; PITTA, G. V. E.; FRANÇA, G. E.; RODRIGUES FILHO, A.; ARAÚJO, J. M.; VIEIRA, J. R.; LOURENÇO, J. E. Sugestões de adubação para as diferentes culturas em Minas Gerais: Milho. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V.; V. H. *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação*. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 314-316.

ALVES, V. M. C.; PARENTONI, S. N.; VASCONCELLOS, C. A.; BAHIA FILHO, A. F. C.; PITTA, G. V. E.; SCHAFFERT, R. E. Mechanisms of phosphorus efficiency in maize. In: HORST, W. J. *et al.* (Ed.). *Plant nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems*. Netherlands: Kluwer Academic, 2001. p. 566-567.

ALVES, V. M. C.; PARENTONI, S. N.; VASCONCELLOS, C. A.; PITTA, G. V. E.; FRANÇA, C. M. Cinética de absorção de fósforo e crescimento do sistema radicular de genótipos de milho contrastantes para eficiência a fósforo. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, Sete Lagoas, v. 1, n. 1, p. 85-92, 2002.

ALVES, V. M. C.; VASCONCELLOS, C. A.; PITTA, G. V. E.; MAGNAVACA, R. Seleção de genótipos de milho para eficiência ao fósforo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 23, n. 10, p. 1083-1090, 1988.

ARAÚJO, A. P. Eficiência vegetal de absorção e utilização de fósforo, com especial referência ao feijoeiro. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.) *Tópicos em ciência do solo*. Vol. 2. Viçosa: SBCS, 2000, p. 163-212.

ATLIN, G. N.; FREY, K. J. Predicting the relative effectiveness of direct versus indirect selection for oat yield in three types of stress environments. *Euphytica*, Dordrecht, v. 44, n. 1-2, p. 137-142, 1990.

AUSTIN, D. F.; LEE, M. Detection of quantitative trait for grain yield and yield components in maize across generation in stress and nonstress environments. *Crop Science*, Madison, v. 38, n. 5, p. 1296-1308, 1998.

BAILIAN, L.; McKEAND, S. E.; ALLEN, H. L. Genetic variation in nitrogen use efficiency of loblolly pine seedlings. *Forest Science*, London, v. 37, n. 2, p. 613-626, 1991.

BAKER, D. E.; JARRELL, A. E.; MARSHAL, L. E.; THOMAS, W. I. Phosphorus uptake from soils by corn hybrids selected for high and low phosphorus accumulation. *Agronomy Journal*, Madison, v. 62, p. 103-106, 1970.

BALIGAR, V. C.; BENNETT, O. L. NPK-fertilizer efficiency – a situation analysis for the tropics. *Fertilizer Research*, Dordrecht, v. 10, n. 3, p. 147-164, 1986.

BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K. Plant nutrient efficiency: towards the second paradigm. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIM, V.; FURTINI NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. (Ed.). *Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas*. Lavras: SBSC/UFLA, 1999. p. 183-204.

BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K.; HE, Z. L. Nutrient use efficiency in plants. *Communications In Soil Science and Plant Analysis*, Philadelphia, v. 32, n. 7-8, p. 921-950, 2001.

BALIGAR, V. C.; PITTA, G. V. E.; GAMA, E. E. G.; SCHAFFERT, R. E.; BAHIA FILHO, A. F. C. Soil acidity effects on nutrient use efficiency in exotic maize genotypes. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 192, n. 1, p. 9-13, 1997.

BALIGAR, V. C.; SCHAFFERT, R. E.; SANTOS, H. L.; PITTA, G. V. E.; BAHIA FILHO, A. F. C. Growth and nutrient uptake parameters in sorghum as influenced by aluminum. *Agronomy Journal*, Madison, v. 85, n. 5, p. 1068-1074, 1993.

BÄNZIGER, M.; COOPER, M. Breeding for low input conditions and consequences for participatory plant breeding: examples from tropical maize and wheat. *Euphytica*, New York, v. 122, n. 3, p. 503-519, 2001.

BÄNZIGER, M.; EDMEADES, G. O.; LAFITTE, H. R. Selection for drought tolerance increase maize yields across a range of nitrogen levels. *Crop Science*, Madison, v. 39, n. 4, p. 1035-1040, 1999.

BÄNZIGER, M.; LAFITTE, H. R. Efficiency of secondary traits for improving maize for low-nitrogen target environments. *Crop Science*, Madison, v. 37, n. 4, p. 1110-1117, 1997.

BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. *Métodos de análise química de plantas*. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 48 p. (Boletim, 78).

BECK, D.; BETRÁN, F. J.; EDMEADES, G. O.; BÄNZIGER, M.; WILLCOX, M. From landrace to hybrid: strategies for the use of source populations and lines in the development of drought-tolerant cultivars. In: EDMEADES, G. O. *et al.* (Ed.). *Developing drought and low-N tolerant maize*. Proceedings of a Symposium, El Batan. 25-29 March, 1996. CIMMYT, El Batan, 1996.

BETRÁN, F. J.; BECK, D.; BÄNZIGER, M.; EDMEADES, G. O. Genetic analysis of inbred and hybrid grain yield under stress and nonstress environments in tropical maize. *Crop Science*, Madison, v. 43, n. 3, p. 807-817, 2003.

BERTRAND, I.; HINSINGER, P.; JAILLARD, B.; ARVIEU, J. C. Dynamics of phosphorus in the rhizosphere of maize and rape grown on synthetic, phosphated calcite and goethite. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 211, n. 1, p. 111-119, 1999.

BLAIR, G. Nutrient efficiency – what do we really mean. In: RANDALL, P. J.; DELHAIZE, E.; RICHARDS, R. A.; MUNNS, R. (Ed.). *Genetic aspects of plant mineral nutrition*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 205-213.

BLISS, F. A. Plant breeding, crop cultivars, and the nature of genetic variability. *American Society of Agronomy*, Madison, v. 52, n. (special), p. 69-89, 1989.

BOLAÑOS, J.; EDMEADES, G. O.; MARTINEZ, L. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. III. Responses in drought-adaptative physiological and morphological traits. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 31, n. 3-4, p. 269-286, 1993.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *The nature and properties of soils*. 11. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

BRUMMER, E. C. Diversity, stability and sustainable american agriculture. *Agronomy Journal*, Madison, v. 90, n. 1, p. 1-2, 1998.

MIRANDA, G. V.; SANTOS, I. C.; GALVÃO, J. C. C.; CHAGAS, J. M.; PAULA JR., T. J. *Guia técnico para produção de milho*. Viçosa: Epamig, 2005. 56 p.

BYRNE, P. F.; BOLAÑOS, J.; EDMEADES, G. O.; EATON, D. L. Gains from selection under drought versus multilocation testing in related tropical maize populations. *Crop Science*, Madison, v. 35, n. 1, p. 63-69, 1995.

CARADUS, J. R. Distinguishing between grass and legume species for efficiency of phosphorus use. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, Wellington, v. 23, n. 1, p. 75-81, 1980.

CASTLEBERRY, R. M.; CRUM, C. W.; KRULL, C.F. Genetic yield improvement of U.S. maize cultivars under varying fertility and climatic environments. *Crop Science*, Madison, v. 24, n. 1, p. 33-36, 1984.

CEBALLOS, H.; PANDEY, S.; NARRO, L.; PEREZ-VELÁZQUEZ, J. C. Additive, dominant, and epistatic effects for maize grain yield in acid and non-acid soils. *Theoretical and Applied Genetics*, New York, v. 96, n. 5, p. 662-668, 1998.

CECCARELLI, S. Adaptation to low/high input cultivation. *Euphytica*, New York: v. 92, n. 2, p. 203-214, 1996.

CECCARELLI, S.; GRANDO, S.; HAMBLIN, J. Relationship between barley grain yield measured in low- and high-yielding environments. *Euphytica*, New York, v. 64, n. 1, p. 49-58, 1992.

CHANEY, R. L.; BELL, P. F.; COULOMBE, B. A. Screening strategies for improved nutrient uptake and use by plants. *HortScience*, Alexandria, v. 24, n. 4, p. 565-572, 1989.

CHAPIN, F. S. III; BIELESKI, R. L. Mild phosphorus stress in barley and a related low-phosphorus-adapted barleygrass: Phosphorus fractions and phosphate absorption in relation to growth. *Physiologia Plantarum*, Lund, v. 54, p. 309-317, 1982.

CHASSOT, A.; RICHNER, W. Root characteristics and phosphorus uptake of maize seedlings in a bilayered soil. *Agronomy Journal*, Madison, v. 94, n. 1, p. 118-127, 2002.

CIARELLI, D. M.; FURLANI, A. M. C.; DECHEN, A. R.; LIMA, M. Genetic variation among maize genotypes for phosphorus-uptake and phosphorus-use efficiency in nutrient solution. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v. 21, n. 10, p. 2219-2229, 1998.

CLARK, R. B. Mineral element concentrations of corn plant parts with age. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v. 6, n. 4, p. 451-464, 1975.

CLARK, R. B. Plant genotype differences in the uptake, translocation, accumulation and use of mineral elements required for plant growth. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 72, n. 1, p. 175-196, 1983.

CLARK, R. B.; DUNCAN, R. R. Improvement of plant nutrition through breeding. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 27, n. 3, p. 219-240, 1991.

CLARKSON, D. T. Factors affecting mineral nutrients acquisition by plants. *Annual Review of Plant Physiology*, Palo Alto, v. 36, p. 77-115, 1985.

CLARKSON, D. T.; HANSON, J. B. The mineral nutrition of higher plants. *Annual Review of Plant Physiology*, Palo Alto, v. 31, p. 239-298, 1980.

CLARKSON, D. T.; HAWKESFORD, M. J. Molecular biological approaches to plant nutrition. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 155-156, p. 21-31, 1993.

COELHO, A. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. *Desafios para obtenção de altas produtividades de milho*. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2004. 22 p. (Comunicado Técnico, 112).

COELHO, A. M.; FRANÇA, G. E. Nutrição e adubação. In: Potafós. *Seja o doutor do seu milho*. 2. ed. Piracicaba: Potafós, 1995. p. 1-9. (Arquivo do Agrônomo, 2).

CRUZ, C. D. *Programa GENES: Aplicativo computacional em genética e estatística versão Windows*. Viçosa-MG. UFV, 2004. 442 p. (software versão 2.1 – 2004).

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético*. 2. ed. Viçosa: UFV, 2001. 390 p.

CRUZ, J. C.; Pereira Filho, I.A., Gama, E.E.G., Pereira, F.T.F., Corrêa, L.A. *Cultivares de milho disponíveis no mercado de sementes do Brasil no ano de 2000*. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2000. 33 p. (Documentos, 4).

DEL VILLAR, P. M.; GAMEIRO, A. H.; DABAT, M. Eficiência das culturas agrícolas: uma comparação entre Brasil, EUA e França. *Agroanalysis*, São Paulo, v.25, n.4, p.44-48, 2005.

DUVICK, D. N. What is yield? In: EDMEADES, G. O. *et al.* (Ed.). *Drought- and low N-tolerant maize*. Proceedings of a Symposium, El Batan, 25-29 March 1996. CIMMYT, El Batan, 1997. p. 332-335.

EDMEADES, G. O.; BÄNZIGER, M.; CORTES C. M.; ORTEGA, A. From stress-tolerant populations to hybrids: The role of source germplasm In: Edmeades, G.O. *et al.* (Ed.). Drought- and low N-tolerant maize. Proceedings of a Symposium, El Batan, 25-29 March 1996. CIMMYT, El Batan, 1997. p. 263-273.

ELLIOTT, G. C.; LÄUCHLI, A. Phosphorus efficiency and phosphate-iron interaction in maize. *Agronomy Journal*, Madison, v. 77, p. 399-403, 1985.

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, Campina Grande, v. 2, n. 1, p. 6-16, 1998.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Screening crop genotypes for mineral stresses. In: Workshop on Adaptation of Plants to Soil Stresses, 1993, Lincoln. *Proceedings...* Lincoln: University of Nebraska, 1993. p. 142-159. (INTSORMIL. Publications, 94-2).

FERNANDES, C. *Eficiências de diferentes culturas e híbridos de milho quanto a utilização de fósforo em solos de cerrado*. Piracicaba: ESALQ, 2001. 51 f. (Dissertação de Mestrado).

FIDELIS, R. R. *Metodologias de seleção para eficiência quanto ao uso e resposta à aplicação do nitrogênio em germoplasma de milho*. Viçosa: UFV, 2003. 37 f. (Dissertação de Mestrado).

FÖHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants. I. External and internal P requirement and P uptake efficiency of different plant species. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 110, n. 2, p. 101-109, 1988.

FREDEEN, A. L.; RAO, I. M.; TERRY, N. Influence of phosphorus nutrition on growth and carbon partitioning in *Glycine max*. *Plant Physiology*, Urbana, v. 89, n. 1, p. 225-230, 1989.

FURLANI, A. M. C.; BATAGLIA, O. C.; LIMA, M. Eficiência de linhagens de milho na absorção e utilização de fósforo em solução nutritiva. *Bragantia*, Campinas, v. 44, n. 1, p. 129-147, 1985.

FURLANI, A. M. C.; FURLANI, P. R. *Composição e pH de soluções nutritivas para estudos fisiológicos e seleção de plantas em condições nutricionais adversas*. Campinas: Instituto Agrônomo, 1988. 34 p. (Boletim, 121).

FURLANI, A. M. C.; FURLANI, P. R.; TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A.; DELGADO, M. 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.

- FURLANI, A. M. C.; LIMA, M.; NASS, L. L. Combining ability effects for P-efficiency characters in maize grown in low P nutrient solution. *Maydica*, Bergamo, v. 43, p. 169-174, 1998.
- FURLANI, A. M. C.; USBERTI FILHO, J. A. Capim-colonião: eficiência na absorção e utilização de fósforo em solução nutritiva. *Bragantia*, Campinas, v. 49, n. 2, p. 413-423, 1990.
- GABELMAN, W. H.; GERLOFF, G. C. The search for and interpretation of genetic controls that enhance plant growth under deficiency levels of a macronutrient. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 72, n. 2-3, p. 335-350, 1983.
- GAMA, E. E. G.; MARRIEL, I. E.; GUIMARÃES, P. E. O.; PARENTONI, S. N.; SANTOS, M. X.; PACHECO, C. A. P.; MEIRELES, W. F.; RIBEIRO, P. H. E.; OLIVEIRA, A. C. Combining ability for nitrogen use in a selected set of inbred lines from a tropical maize population. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, Sete Lagoas, v. 1, n. 3, p. 68-77, 2002.
- GAUME, A.; MÄCHLER, F.; DE LEÓN, C.; NARRO, L.; FROSSARD, E. Low-P tolerance by maize (*Zea mays* L.) genotypes: significance of root growth, and organic acids and acid phosphatase root exudation. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 228, n. 2, p. 253-264, 2001.
- GAVA, G. J. C.; TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, M. W. Recuperação do nitrogênio (^{15}N) da uréia e da palhada por soqueira de cana-de-açúcar (*Sacharum* spp.). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 621-630, 2003.
- GERLOFF, G. C. Intact-plant screening for tolerance of nutrient-deficiency stress. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 99, n. 1, p. 3-16, 1987.
- GILL, M. A.; SALIM, R. M.; ZIA, M. S. Maize growth and uptake of phosphate and copper at different ambient phosphate concentrations. *Soil Science and Plant Nutrition*, Tokyo, v. 8, n. 4, p. 631-636, 1992.
- GOEDERT, W. J.; SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. Fósforo. In: Goedert, W.J. (Ed.). *Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo*. Planaltina: Embrapa, CPAC, São Paulo: Nobel. 1985. p. 129-166.
- GOLDSTEIN, A. H. Plant cells selected for resistance to phosphate starvation show enhanced P use efficiency. *Theoretical and Applied Genetics*, New York, v. 82, n. 2, p. 191-194, 1991.
- GOMES, F. P. *Curso de estatística experimental*. 14. ed. Piracicaba: Nobel, 2000. 477 p.

GOURLEY, C. J. P.; ALLAN, D. L.; RUSSELE, M. P. Defining phosphorus efficiency in plants. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 155-156, p. 289-292, 1993.

GOURLEY, C. J. P.; ALLAN, D. L.; RUSSELE, M. P. Plant nutrient efficiency: a comparison of definitions and suggested improvement. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 158, n. 1, p. 29-37, 1994.

GRAHAM, R. D. Breeding for nutritional characteristics in cereals. In: TINKER, P. B.; LAUCHLI, A. (Ed.). *Advances in plant nutrition*. Vol. 1. New York: Praeger, 1984. p. 57-102.

GRANADOS, G.; PANDEY, S.; CEBALLOS, H. Response to selection for tolerance to acid soils in a tropical maize population. *Crop Science*, Madison, v. 33, n. 5, p. 936-940, 1993.

GRANT, C. A.; FLATEN, D. N.; TOMASIEWICZ, D. J.; SHEPPARD, S. C. Importance of early season phosphorus nutrition. *Better Crops with Plant Food*, Norcross, v. 85, n. 2, p. 18-23, 2001.

GRIFFING, B. Concept of general and specific and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian Journal of Biological Sciences*, Melbourne, v. 9, n. 4, p. 463-493, 1956.

HAMMOND, J. P.; BROADLEY, M. R.; WHITE, P. J. Genetic responses to phosphorus deficiency. *Annals of Botany*, Oxford, v. 94, n. 3, p. 323-332, 2004.

HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 237, n. 2, p. 173-195, 2001.

HOHLS, T. Conditions under which selection for mean productivity, tolerance to environments stress, or stability should be used to improve yield across a range of contrasting environments. *Euphytica*, New York, v. 120, n. 2, p. 235-245, 2001.

HOLFORD, I. C. R. Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Australian Journal of Soil Research*, Melbourne, v. 35, n. 2, p. 227-239, 1997.

HORST, W. J.; ABDU, M.; WIESLER, F. Genotypic differences in phosphorus efficiency of wheat. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 155-156, p. 293-296, 1993.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/agric/default.asp>>. Acesso em: 8 jul. 2005.

JARREL, W. M.; BEVERLY, R. B. The dilution effects in plant nutrition studies. *Advances in Agronomy*, San Diego, v. 34, p. 197-224, 1981.

JUNGK, A. Soil-root interactions in the rhizosphere affecting plant availability of phosphorus. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v. 10, p. 1197-1024, 1987.

KER, J. C.; PEREIRA, N. R.; CARVALHO JÚNIOR, W.; CARVALHO FILHO, A. Cerrado: solos, aptidão e potencialidade agrícola. In.: Simpósio sobre manejo e conservação do solo no cerrado. Goiânia, 1992. *Anais...* Campinas: Fundação Cargill, 1992. p.1-31.

LARCHER, W. *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: RIMA, 2000. 531 p.

LAUCHLI, A. Soil science in the next twenty five years: does a biotechnology play a role? *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v. 51, n. 6, p. 1405-1409, 1987.

LOPES, A. S. *Solos de cerrado: características, propriedades e manejo*. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1984. 162 p.

MACEDO, J. Os solos da região dos cerrados. In: ALVAREZ V., V.H. *O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado*. Viçosa: SBCS/UFV, 1996. p. 135-155.

MACHADO, C. T. T. *Avaliação da eficiência de utilização de fósforo de variedades locais de milho (Zea mays L.)*. Rio de Janeiro: UFRRJ, 1995. 131 f. (Dissertação de Mestrado).

MACHADO, C. T. T. *Caracterização de genótipos de milho quanto a parâmetros morfológicos, fisiológicos e microbiológicos associados a eficiência de absorção e uso de fósforo*. Rio de Janeiro: UFRRJ, 2000. 366 f. (Tese de Doutorado).

MACHADO, C. T. T.; FURLANI, A. M. C.; MACHADO, A. T. Índices de eficiência de variedades locais e melhoradas de milho ao fósforo. *Bragantia*, Campinas, v. 60, n. 3, p. 225-238, 2001.

MACHADO, C. T. T.; MACHADO, A. T.; FURLANI, A. M. C. Variação intrapopulacional em milho para características relacionadas com a eficiência de absorção e utilização de fósforo. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, Sete Lagoas, v. 3, n. 1, p. 77-91, 2004.

MAGALHÃES, J. C. A. J.; VIEIRA, R. F.; PEREIRA, J.; PIRES, J. R. R. Efeito da adubação verde na disponibilidade de fósforo de fosfatos, numa sucessão de culturas, em solo de cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 15, n. 3, p. 329-337, 1991.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; CARNEIRO, N. P.; PAIVA, E. *Fisiologia do milho*. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. 23 p. (Circular Técnica, 22).

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.

MARSCHNER, H. Role of root growth, arbuscular mycorrhiza, and root exudates for the efficiency in nutrient acquisition. *Field Crop Research*, Amsterdam, v. 56, n. 1-2, p. 203-207, 1998.

MARSCHNER, H. Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 134, n. 1, p. 1-20, 1991.

MARSCHNER, H. *Mineral nutrition of higher plants*. 2. ed. San Diego: Academic Press Inc., 1995. 889 p.

MARSCHNER, H.; KIRKBY, E.; CAKMAK, I. Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 47, n.(special), p. 1255-1263, 1996.

MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F.; RODRIGUES, L. A.; SACRAMENTO, L. V. S. Comportamento de variedades de soja cultivadas em diferentes doses de fósforo: II. Translocação do fósforo absorvido e eficiência nutricional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 17, n. 2, p. 239-244, 1993a.

MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F.; RODRIGUES, L. A.; SACRAMENTO, L. V. S. Comportamento de variedades de soja cultivadas em diferentes doses de fósforo: I. Cinética de absorção de fósforo e ajustes morfológicos da planta. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 17, n. 2, p. 231-238, 1993b.

MENDES, I. C.; REIS JÚNIOR, F. B. *Microrganismos e disponibilidade de fósforo (P) nos solos: uma análise crítica*. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2003. 26 p. (Documentos, 85).

MOLLIER, A.; PELLERIN, S. Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 50, n. 333, p. 487-497, 1999.

MOREIRA, M. F. *Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea do feijoeiro comum em função da distribuição e do teor de fósforo no solo*. Piracicaba: ESALQ, 2004. 135 f. (Tese de Doutorado).

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Viçosa: UFV/DPS, 1999. 399 p.

OLIVEIRA, V. R.; CASALI, V. W. D.; CRUZ, C. D.; PEREIRA, P. R. G.; SCAPIM, C. A. Capacidade de combinação entre linhagens de pimentão diferindo na tolerância ao baixo teor de fósforo no solo. *Bragantia*, Campinas, v. 57, n. 2, p. 203-214, 1998.

OLIVEIRA, V. R. O.; CASALI, V. W. D.; PEREIRA, P. R. G.; CRUZ, C. D.; PIRES, N. M. Tolerância de genótipos de pimentão ao baixo teor de fósforo no solo. *Bragantia*, Campinas, v. 58, n. 1, p. 125-139, 1999.

PANDEY, S.; CEBALLOS, H.; MAGNAVACA, R.; BAHIA FILHO, A. F. C.; DUQUE-VARGAS, J.; VINASCO, L. E. Genetics of tolerance to soil acidity in tropical maize. *Crop Science*, Madison, v. 34, n. 6, p. 1511-1514, 1994.

PLÉNET, D.; ETCHEBEST, S.; MOLLIER, A.; PELLERIN, S. Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency. I. Leaf growth. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 223, n. 1-2, p. 119-132, 2000a.

PLÉNET, D.; MOLLIER, A.; PELLERIN, S. Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency. II. Radiation-use efficiency, biomass accumulation and yield components. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 224, n. 2, p. 259-272, 2000b.

PRASAD, R. Cropping systems and sustainability of agriculture. *Indian Farming*, New Delhi, v. 46, n. 8, p. 39-44, 1996.

RAMALHO, M. A. P. *Genética quantitativa em plantas autógamas*. Aplicações ao melhoramento do feijoeiro. Goiânia: UFG, 1993. 271 p.

RAMALHO, M. A. P.; FERREIRA, D. F.; OLIVEIRA, A. C. *Experimentação em genética e melhoramento de plantas*. Lavras, UFLA, 2000. 326 p.

REIS JÚNIOR, F. B.; DÖBEREINER, J.; BALDANI, V. L. D.; REIS, V. M.; MACHADO, A. T. *Seleção de genótipos de milho e arroz mais eficientes quanto ao ganho de N através de fixação biológica de N₂*. Seropédica: Embrapa Agroecologia, 1998. 24 p. (Documentos, 73).

RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E.; CURTI, N.; MUNIZ, J. A.; FARIA, M. R. Acúmulo e eficiência nutricional de macronutrientes por espécies florestais de diferentes grupos sucessionais em resposta à fertilização fosfatada. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 24, n. 1, p. 160-173, 2000.

RIBEIRO, P. H. E.; RAMALHO, M. A. P.; FERREIRA, D. F. Adaptabilidade e estabilidade de genótipos de milho em diferentes condições ambientais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 35, n. 11, p. 2213-2222, 2000.

SANCHEZ, P. A.; SALINAS, J. G. Low-input technology for managing Oxisol and Ultisols in tropical America. *Advances in Agronomy*, San Diego, v. 34, p. 279-406, 1981.

SCAPIM, C. A.; CARVALHO, C. G. P.; CRUZ, C. D. Uma proposta de classificação dos coeficientes de variação para a cultura do milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 30, n. 5, p. 683-686, 1995.

SCHENK, M. K.; BARBER, S. A. Phosphate uptake by corn as affected by soil characteristics and root morphology. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 34, n. 4, p. 880-883, 1979.

SCHJORRING, J. K.; JENSÉN, P. Phosphorus export from roots to shoots of barley buckwheat and rape seedlings with different P status. *Physiologia Plantarum*, Lund, v. 70, n. 1, p. 58-64, 1987.

SCOTT, B. J.; FISHER, J. A. Comparing selection strategies for tolerance of acid soils. In: Workshop on Adaptation of Plants to Soil Stresses, 1993, Lincoln. *Proceedings...* Lincoln: University of Nebraska, 1993. p. 103-116. (INTSORMIL. Publications, 94-2).

SIDIQQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v. 4, n. 3, p. 289-302, 1981.

SILVA, A. E.; GABELMAN, W. H.; COORS, J. G. Inheritance studies of low-phosphorus tolerance in maize (*Zea mays* L.), grown in a sand-alumina culture medium. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 146, n. 1, p. 189-197, 1992.

SINCLAIR, T. R.; VADEZ, V. Physiological traits for crop yield improvement in low N and P environments. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 245, n. 1, p. 1-15, 2002.

SOUZA, L. V. *Capacidade de combinação de cultivares de milho sob estresses abióticos*. Viçosa: UFV, 2003. 37 f. (Dissertação de Mestrado).

SPRAGUE, G. F.; TATUM, L. A. General and specific combining ability in single crosses of corn. *Journal of American Society of Agronomy*, Washington, v. 34, p. 923-932, 1942.

SULTENFUSS, J. H.; DOYLE, W. J. Phosphorus for agriculture. *Better Crops with Plant Food*, Norcross, v. 83, n. 1, p. 1-40, 1999.

THEODOROU, M. E.; PLAXTON, W. C. Metabolic adaptations of plant respiration to nutritional phosphate deprivation. *Plant Physiology*, Urbana, v. 101, n. 2, p. 339-344, 1993.

VASCONCELLOS, C. A.; CAMPOLINA, D. C. A.; SANTOS, F. G.; EXEL PITTA, G. V.; MARRIEL, I. E. Resposta da soja e da biomassa de carbono do solo aos resíduos de cinco genótipos de sorgo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 23, n. 1, p. 69-11, 1999.

YAMADA, T. *O nitrogênio e o potássio na adubação da cultura do milho*. Piracicaba: Potafós, 1997. p. 1-4. (Informações Agronômicas, 78).

YUN, S. J.; KAEPLER, S. M. Induction of maize acid phosphatase activities under phosphorus starvation. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 237, n. 1, p. 109-115, 2001.

ZAVALA-GARCIA, F.; BRAMEL-COX, P. J.; EASTIN, J. D.; WITT, M. D.; ANDREWS, D. J. Increasing the efficiency of crop selection for unpredictable environments. *Crop Science*, Madison, v. 32, n. 1, p. 51-57, 1992.