

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Estimativas de efeitos gênicos de diversos caracteres relacionados à eficiência e
resposta ao fósforo em milho tropical**

Sidney Netto Parentoni

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Agronomia. Área de concentração: Genética e
Melhoramento de Plantas**

**Piracicaba
2008**

Sidney Netto Parentoni
Engenheiro Agrônomo

Estimativas de efeitos gênicos de diversos caracteres relacionados à eficiência e resposta ao fósforo em milho tropical

Orientador:
Prof. Dr. CLÁUDIO LOPES DE SOUZA JÚNIOR

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Agronomia. Área de concentração: Genética e Melhoramento de Plantas

Piracicaba
2008

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Parentoni, Sidney Netto

Estimativas de efeitos gênicos de diversos caracteres relacionados à eficiência e resposta ao fósforo em milho tropical / Sidney Netto Parentoni. - - Piracicaba, 2008.

207 p.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.
Bibliografia.

1. Fósforo – eficiência 2. Genética vegetal 3. Hereditariedade 4. Milho I.
Título

CDD 633.15

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

Dedicatória

Este trabalho é dedicado a
José Sidney Parentoni e Ormindá Bitarães Netto Parentoni

Agradecimentos

A Deus, por ter permitido minha caminhada até este ponto;

A EMBRAPA, pela concessão da bolsa e suporte financeiro;

Ao Departamento de Genética da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pelo suporte acadêmico.

Ao professor Dr. Cláudio Lopes de Souza Jr., pelos ensinamentos, exemplo profissional e amizade.

A meus pais José Sidney Parentoni e Ormindia Bitarães Netto Parentoni pelo apoio constante durante toda a minha trajetória e a meus irmãos (Dayse, Fábio, Rêmulô, Jacqueline, Adriana e Leonardo), cunhados (Luiz-“in memória” e Alfredo), cunhadas (Denise e Liliante) e à nova geração da família que vem crescendo (Eliza, Thaíz, Caio, Fernanda, Alice, Davi, Pedro, Beatriz e André), agradeço pela teia de apoio diligentemente construída, que nos mantém unidos, e ainda pela oportunidade de conviver e dividir experiências únicas;

Aos vários colegas da EMBRAPA que contribuíram de formas diversas para a concretização deste trabalho, em especial ao colega Elto Gama pelas lições de vida e a meu conselheiro acadêmico Antonio Carlos de Oliveira, pela constante disponibilidade para as discussões estatísticas; aos bolsistas Clayton Godoy e Denílson Oliveira, pela valiosa contribuição na condução dos ensaios de campo. A Nádia Castilho e Maria Tereza Rocha pelo auxílio na formatação do manuscrito;

Aos professores da ESALQ, Cláudio Lopes de Souza Jr., Isaias Olívio Geraldi, Marcio de Castro Silva, Roland Vencovsky, José Branco Miranda Filho, Luiz Eduardo Aranha Camargo, Décio Barbin, Giancarlo Conde Xavier Oliveira, Elizabeth Ann Veasey, Natal Antonio Vello, José Baldin Pinheiro e Margarida Lopes R. de Aguiar Percin, pelos ensinamentos acadêmicos;

Aos colegas de laboratório, Dyeme Bento, Mateus Figueiredo, Tassiano Câmara, Geovani Alves, Pedro Belicuas, Luciana Garcia, Ubirajara Moreira, Emiliano Nassau, Gustavo Moro, Sanzio Barrios e “agregados”, Marcelo, Walter, Jair, Aginaldo, Luiz Antonio, Columbari, Fernando, Farias, Silvia, Hanai, Camila, Andreia e Salete, por terem não só permitido uma troca de conhecimentos e experiências enriquecedoras, mas também por tornarem extremamente agradável o período em que estive em Piracicaba. Aos funcionários do Departamento de Genética, em especial a Ariberto Soares de Oliveira (Sr. Ari) e Cândida Vanderléia de Oliveira (Léia) pela amizade, competência e comprometimento com o trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
1 INTRODUÇÃO.....	10
2 DESENVOLVIMENTO.....	13
2.1 Revisão Bibliográfica.	13
2.1.1 P no solo e disponibilidade para as plantas	13
2.1.2 Mecanismos morfológicos e fisiológicos ligados à eficiência ao P em plantas	17
2.1.3 Fósforo em grãos de milho	23
2.1.4 Conceitos de eficiência e resposta ao P	24
2.1.5 Genética da eficiência ao P em plantas	31
2.1.6 Análise de médias de gerações	34
2.1.6.1 Metodologia de análise de médias de gerações	34
2.1.6.2 Exemplos de análises de médias de gerações.....	36
2.2 Material e Métodos.....	37
2.2.1. Material Genético	37
2.2.2 Execução experimental.....	38
2.2.3 Caracteres avaliados	40
2.2.4 Índices de Eficiência ao P utilizados.....	43
2.2.5 Índices de Resposta ao P utilizados.....	44
2.2.6 Análises Estatístico-Genéticas.....	46
2.2.6.1 Análises de Variâncias	46
2.2.6.2 Análises de variâncias para caracteres de resposta ao P.....	48
2.2.6.3 Estimativas dos efeitos gênicos	48
2.2.6.4 Correlações fenotípicas	55
2.2.7 Relações propostas por Moll, Kamprath e Jackson (1982).....	56
2.3 Resultados e Discussão.....	57
2.3.1 Análise geral dos resultados	57
2.3.2 Análises de variâncias	62
2.3.2.1 Produção de grãos (PG).....	63

2.3.2.2 Intervalo entre florescimento masculino e feminino (ASI).....	64
2.3.2.3 Teor de P nos grãos (TPG)	69
2.3.2.4 Quantidade total de P na parte aérea (FTOT).....	73
2.3.2.5 Eficiência de absorção de P (EFABS).....	74
2.3.2.6 Eficiência de utilização de P (EFUTIL)	78
2.3.2.7 Eficiência de uso de P (EFUSO)	82
2.3.2.8 Índice de colheita de P (ICP).....	85
2.3.2.9 Quociente de utilização de P (QUTIL).....	87
2.3.3 Análises de variâncias para caracteres de resposta ao P.....	89
2.3.4 Estimativas de efeitos gênicos.....	94
2.3.4.1 Estimativas de efeitos gênicos de caracteres de eficiência ao P.....	96
2.3.4.1.1 Efeitos gênicos: peso de grãos (PG).....	96
2.3.4.1.2 Efeitos gênicos: intervalo de florescimento masculino e feminino (ASI).....	100
2.3.4.1.3 Efeitos gênicos: teor de P nos grãos (TPG).....	102
2.3.4.1.4 Efeitos gênicos: quantidade de P total na planta (FTOT).....	105
2.3.4.1.5 Efeitos gênicos: eficiência de absorção de P (EFABS).....	107
2.3.4.1.6 Efeitos gênicos: eficiência de utilização de P (EFUTIL)	108
2.3.4.1.7 Efeitos gênicos: eficiência de uso de P (EFUSO)	110
2.3.4.1.8 Efeitos gênicos: índice de colheita de P (ICP)	113
2.3.4.1.9 Efeitos gênicos: quociente de utilização de P (QUTIL).....	114
2.3.4.2 Estimativas de efeitos gênicos de caracteres de resposta ao P.....	116
2.3.4.2.1 Efeitos gênicos: diferença de peso de grãos entre níveis alto e baixo de P.....	116
2.3.4.2.2 Efeitos gênicos: relação entre PG nos níveis baixo e alto de P (RELPG).....	117
2.3.4.2.3 Efeitos gênicos: eficiência de recuperação aparente de P (EFREC)	117
2.3.4.2.4 Efeitos gênicos: eficiência fisiológica de P (EFIS)	118
2.3.4.2.5 Efeitos gênicos: eficiência agrônômica de P (EFAGR)	119
2.3.5 Correlações fenotípicas	119
2.3.5.1 Correlações com o caráter peso de grãos (PG) sob baixo P no solo	120
2.3.5.2 Correlações com o caráter peso de grãos (PG) sob alto P no solo	121
2.3.5.3 Correlações com o caráter teor de P nos grãos (TPG) sob baixo e alto P no solo	123
2.3.5.4 Correlações entre variáveis de eficiência ao P sob baixo P no solo.....	124

2.3.5.5 Correlações entre variáveis de eficiência ao P sob alto P no solo.....	126
2.3.5.6 Correlações entre variáveis de resposta ao P sob baixo P no solo	127
2.3.5.7 Correlações entre variáveis de resposta ao P sob alto P no solo	129
2.3.6 Relações propostas por Moll, Kamprath e Jackson (1982) para vários caracteres.....	133
2.3.6.1 Relações entre caracteres de eficiência ao P (absorção, utilização e uso).....	133
2.3.6.2 Relações entre caracteres relacionados à eficiência de utilização de P.....	137
2.3.6.3 Relações entre caracteres de resposta ao P.....	138
2.3.7. Considerações gerais	139
3 CONCLUSÕES.....	150
REFERÊNCIAS	152
ANEXOS	170

RESUMO

Estimativas de efeitos gênicos de diversos caracteres relacionados à eficiência e resposta ao fósforo em milho tropical

Informações sobre a herança de caracteres relacionados à eficiência e resposta ao P em milho, obtidas em ensaios conduzidos até a maturação em ambientes tropicais são limitadas, sendo pré-requisitos para se estabelecer estratégias de seleção eficientes. O objetivo deste trabalho foi estudar a herança e as relações entre caracteres de eficiência e resposta ao P em milho tropical. Foram utilizadas seis linhagens e sete F₁'s entre elas, contrastantes quanto à sua eficiência ao P. Os genitores, F₁'s, F₂'s, RC₁P₁, RC₁P₂, RC₂P₁ e RC₂P₂ de cada um dos sete F₁'s, foram avaliados em três ambientes sob baixo P, e dois ambientes sob alto P no solo. Caracteres de eficiência avaliados foram: peso de grãos (PG), teor de P nos grãos (TPG), quantidade P total na parte aérea (FTOT), eficiência de absorção (EFABS), de utilização (EFUTIL), e de uso de P (EFUSO), índice de colheita de P (ICP) e quociente utilização (QUTIL). Caracteres de resposta avaliados foram: diferença PG entre níveis de P (DIFPG), relação PG entre baixo e alto P (RELPG), eficiência recuperação aparente (EFREC), eficiência fisiológica (EFIS) e eficiência agrônômica (EFAGR). Foi também avaliado o intervalo entre florescimento masculino e feminino (ASI), que tem sido relacionado à tolerância a estresse de seca. As médias das gerações de cada cruzamento foram utilizadas para estimar o efeito médio (m), efeitos aditivos (a), efeitos de dominância (d) e efeitos epistáticos digênicos (aa, ad e dd) sob baixo e alto P no solo. Deficiência de P causou redução média na produção de 47,10%. Efeitos de dominância, seguidos de efeitos epistáticos (quando detectados) foram superiores aos efeitos aditivos para a maioria dos caracteres estudados. O ambiente afetou a herança dos diversos caracteres e estimativas de dominância para PG foram de maior magnitude nos ambientes sob alto P e efeitos epistáticos foram verificados com maior frequência, nos ambientes sob baixo P no solo. Quanto à variabilidade observada para eficiência de uso de P, EFABS foi duas a três vezes mais importante que EFUTIL sob baixo e alto P respectivamente, indicando que, processos relacionados à absorção de P em milho, foram mais importantes que àqueles relacionados à utilização interna do P na planta, nos ambientes estudados. EFABS mostrou baixa correlação sob baixo e alto P, sugerindo que diferentes mecanismos de aquisição de P podem estar atuando nestes ambientes. EFUTIL mostrou alta correlação entre ambientes sugerindo que mecanismos de utilização interna de P semelhantes podem estar agindo sob baixo e alto P. ASI mostrou correlação média e negativa com PG sob baixo P. Critérios de seleção mais adequados para os diversos componentes de eficiência e resposta ao P seriam: PG sob baixo P no solo para determinar a EFABS nestes ambientes; baixo teor de P nos grãos obtido sob alto P no solo, para determinar a EFUTIL; DIFPG para determinar a resposta ao P; menores valores de ASI sob baixo P como critério auxiliar de seleção. Correlações entre variáveis de eficiência e resposta ao P indicaram ser viável obter genótipos eficientes e responsivos ao P nas condições deste estudo.

Palavras-chave: Eficiência ao P; Resposta ao P; Herança; Milho; *Zea mays L.*

ABSTRACT

Estimative of gene effects for traits related to phosphorus efficiency and responsiveness in tropical maize

Low information is available concerning the inheritance of phosphorus (P) efficiency and responsiveness in tropical maize, obtained from trials conducted until maturity in tropical environments. This information is the basis to establish selection strategies for these characteristics. The objective of this study was to investigate the inheritance and relationships between characteristics related to phosphorus efficiency and responsiveness in tropical maize. Six tropical maize lines with contrasting P use efficiency and seven F₁'s derived from them were used. The parental lines, F₁'s, F₂'s, RC₁P₁, RC₁P₂, RC₂P₁ e RC₂P₂ from each of the seven crosses were evaluated at three low P and two high P environments. Efficiency traits evaluated were: grain weight (GW), grain P concentration (GPC), total P in the shoot (PTOT), P uptake efficiency (PUPE), P internal utilization efficiency (PUTIL), P use efficiency (PUE), P harvest index (PHI) and quotient of utilization (QUTIL). Responsiveness traits evaluated were: grain difference between high and low P environments (DIFGW), ratio GW of low and high P environments (RGW), P apparent recover (PAR), P physiological efficiency (PFIS) and P agronomic efficiency (PAGR). Anther silk interval (ASI), which has been related to drought tolerance, was also determined. The generation means from each cross in each group of environments (low and high soil P) were used to estimate the parameters mean effect (m), additive effects (a), dominant effects (d) and epistatic digenic effects (aa, ad, dd). A 47,10 % mean yield reduction was observed across soil P levels. Dominance effects, followed by epistatic effects (when detected) were more important than additive effects for the majority of the traits studied. Soil P level affected the inheritance of many traits. Dominance estimatives for GW were higher at high P environments than at low P environments and generally, epistatic effects were detected more frequently at low P environments. The component PUPE showed to be two to three times more important than the component PUTIL for the variability observed for P use efficiency under low and high P environments respectively, indicating that mechanisms related to P acquisition were more important than mechanisms related to P internal utilization efficiency in the environments and genotypes studied. PUPE showed low correlation under low and high P environments, suggesting that different mechanism of soil P acquisition should be acting at these environments. PUTIL showed high correlation under low and high P environments suggesting that similar plant internal mechanisms should be acting at low and high P environments. A medium and negative correlation was observed between ASI and GW at low P environments. Selection criteria that showed to be more adequate to select for P efficiency and responsiveness were: GW under low P environments to determine PUPE under low P soils; grain P concentration under high P environments to determine PUTIL; DIFGW to determine P responsiveness and short ASI at low P environments as an additional selection criteria. Correlations between efficiency and responsiveness traits indicated that it would be possible to obtain efficient and responsive genotypes in the conditions of this study.

Key-words: P efficiency; P responsiveness; Inheritance; Maize; *Zea mays L*

1 INTRODUÇÃO

A população mundial deverá aumentar de 6,3 bilhões de pessoas em 2000 para 8,5 bilhões em 2025, com conseqüente aumento na demanda por alimentos e na pressão sobre áreas cultiváveis (BALIGAR; FAGERIA, 1997). Para se ajustar a este cenário, a produção de cereais no mundo terá que dobrar dos cerca de 2 bilhões de toneladas produzidos em 1990 para 4 bilhões de toneladas em 2025, sendo que estes aumentos, na sua maioria, deverão ser baseados em ganhos de produtividade em vez de incorporação de novas áreas (BORLAUG; DOSWELL, 1993).

Cerca de 43 % dos solos das regiões tropicais do mundo são constituídos por Latossolos e Podzólicos (Oxissols e Ultisols), os quais, na parte tropical das Américas, ocupam cerca de 1.043 bilhões de hectares sendo que 96% destes solos têm como principal limitação química a deficiência de fósforo (SANCHES; SALINAS, 1981). No Brasil, a maioria dos solos são altamente intemperizados, com baixo pH, alto conteúdo de Al na sub-superfície e baixa disponibilidade de nutrientes. Estes solos, com muito baixa disponibilidade de fósforo em condições naturais, tem sido intensivamente utilizados sendo que, em 2006, a área agrícola nestes ambientes foi de 54,82 milhões de hectares sendo 45,75 milhões cultivados com grãos (soja, milho, trigo e arroz principalmente) e 9,07 milhões com culturas como cana, café e citros (ANGHINONI, 2006).

Baligar, Fageria e He (2001) compararam a eficiência média de uso de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) pelas culturas. Os autores reportam que, para o N, estes valores são em geral menores que 50%, para o K encontram-se por volta de 40% e para o P podem ser inferiores a 10%. A baixa eficiência de uso de P está relacionada à capacidade dos solos de adsorver e tornar indisponível às plantas o P aplicado, e ainda ao mecanismo de absorção do nutriente pelas plantas (difusão), o qual exige grande proximidade entre a raiz e o nutriente no solo (SCHENCK; BARBER, 1980). A capacidade da planta de absorver e utilizar fósforo de forma mais eficiente está entre os fatores de maior importância na eficiência de uso deste nutriente (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Good, Swrawat e Muench (2004) citam que a busca por culturas mais eficientes no uso de nutrientes tem duas razões básicas: a primeira é que, fertilizantes são os insumos com maior participação no custo final da produção agrícola em escala comercial e seu uso é restrito pelo pequeno agricultor devido à falta de recursos para sua aquisição; a segunda é que, o uso

indiscriminado de fertilizantes em altas doses causa grande impacto ambiental, podendo contaminar os mananciais hídricos, como já verificado para nitrogênio e fósforo em áreas de agricultura intensiva (SHARPLEY; McDOWELL; KLEIMMAN, 2001).

Clarkson e Hawkesford (1993) citam que, cada vez mais se torna comum entre a comunidade científica o fato de que, cultivares desenvolvidos pelos programas de melhoramento de plantas voltados exclusivamente para altas produtividades em ambientes favoráveis, demandam altas doses de insumos e, em geral, utilizam estes insumos de forma muito ineficiente. Pesquisadores em nutrição mineral e fisiologia de plantas, são cada vez mais questionados sobre temas tais como: a regulação da absorção de nutrientes durante o processo de crescimento; o balanço interno na planta, entre o conteúdo de nutriente aí armazenado e seu uso para crescimento; sobre fatores que garantam uma redistribuição eficiente do nutriente no interior da planta visando maximizar sua utilização e ainda sobre as relações entre a assimilação do nutriente e os processos internos de transporte dos mesmos até as células de destino. Estas atividades podem ser reguladas por vários fatores, alguns dos quais interagem diretamente com proteínas, enquanto outros controlam a expressão de genes que codificam proteínas importantes no processo de nutrição mineral. É relevante mencionar que, no caso da atividade agrícola, a busca de plantas mais eficientes em converter nutrientes em produto final deve ser fator chave neste novo paradigma de maximização do uso dos fatores de produção. Isto ocorre principalmente porque a produção agrícola é baseada em grande parte no uso de fertilizantes os quais, ou são obtidos a partir de combustíveis fósseis (como é o caso do nitrogênio), ou dependem de recursos minerais que devem se esgotar num período relativamente curto (como é o caso do fósforo e do potássio).

Programas de melhoramento, visando aumentar a eficiência no uso de fósforo em plantas, tem sido conduzidos com menor frequência em relação àqueles de seleção para tolerância à toxidez de alumínio, principalmente devido à inexistência de métodos confiáveis de seleção na fase de plântulas (casa de vegetação/solução nutritiva), passíveis de serem realizados em condições controladas. A forma mais confiável para determinar a característica eficiência ao fósforo é a avaliação de genótipos no campo, utilizando-se áreas contrastantes quanto aos seus níveis de fósforo e conduzindo-se os ensaios até a fase de produção de grãos (ALVES et al., 1988).

O conceito de eficiência de um dado nutriente geralmente se refere à unidades de produção econômica por unidade do nutriente (disponível no meio ou presente na planta). Diferenças em

eficiência nutricional entre genótipos podem ser devidas a fatores como: a) reações e processos que ocorrem na interface solo-raiz; b) morfologia de raiz; c) propriedades de absorção da raiz; d) transporte e partição do nutriente na parte aérea e raiz; e) uso do nutriente nos processos fisiológicos que levam ao crescimento. Em geral, o conhecimento existente sobre estes processos e suas inter-relações é ainda insatisfatório (ROSEN; KORCAK, 1989).

Clark e Duncan (1991) citam que a base genética da tolerância a baixo P em plantas pode variar entre e dentro de espécies, já que, diferentes estratégias ou mecanismos relacionados à tolerância a baixo P em plantas podem ter diferentes tipos de controle gênico.

Variabilidade genética entre cultivares de milho brasileiros para conteúdo de P, distribuição, produção de massa seca de raiz e parte aérea e produção de grãos tem sido observada (FURLANI; BATAGLIA; LIMA, 1985; ALVES et al., 1988; MACHADO, 1995; PARENTONI et al., 2006a; GAMA et al. 2006).

Sobre o controle gênico destes processos, as características relacionadas à absorção de P são geralmente poligênicas (GOLDSTEIN, 1991; CLARKSON; HAWKESFORD, 1993), com dominância sendo reportada (DUNCAN, 1994); as de eficiência de utilização de P para produção de matéria seca são também poligênicas, sendo que tanto efeitos aditivos quanto dominantes têm se mostrado importantes (FAWOLE et al, 1982; GABELMAN; GERLOFF, 1983; FURLANI et al, 1984; SILVA; GABELMAN, 1992; SILVA; GABELMAN; COORS, 1992).

Para se estabelecer as bases de um programa de seleção para eficiência no uso de P é necessário considerar alguns aspectos chave, tais como: a) as relações existentes entre o solo e a planta na aquisição do nutriente; b) definição clara de componentes e conceitos ligados à eficiência e resposta a serem utilizados como critérios de seleção; c) conhecer a herança destes critérios de seleção; d) utilizar esta informação para traçar estratégias apropriadas de melhoramento. Poucos resultados de estudos de herança dos diversos critérios de seleção relacionados à eficiência e resposta ao P em plantas de milho crescidas em campo até a maturação têm sido reportados na literatura, principalmente em áreas tropicais. Esta informação é de grande importância para direcionar programas de seleção para estes caracteres.

O objetivo deste trabalho foi estudar a herança e entender as relações existentes entre diversos caracteres relacionados à eficiência e resposta ao fósforo em genótipos de milho tropicais contrastantes para estas características.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica.

2.1.1 P no solo e disponibilidade para as plantas

A biodisponibilidade de P nos solos em geral é muito baixa, apesar do conteúdo total de P nos mesmos ser de 200 a 500 vezes maior que a quantidade disponível para uso pelas plantas (LIU et al, 2006). A concentração de fosfato inorgânico na solução da maioria dos solos varia de 0,1 a 10 μM , fazendo com que as plantas, independente de serem ou não cultivadas, absorvam este nutriente de soluções com concentrações extremamente baixas (LOUGHMAN; ROBERTS; GOODWIN-BAILEY, 1983).

As principais razões para a baixa disponibilidade de P nos solos tropicais são os baixos conteúdos deste nutriente e a alta capacidade de fixação do mesmo pelo solo, principalmente em formas hidratadas amorfas de óxido de ferro (hematita), de alumínio (gibbsite) e em argila tipo caulinita (BALIGAR; FAGERIA, 1997). Este tipo de fixação está relacionada ao ambiente de formação destes solos sendo que, em ambientes mais úmidos o fósforo tende a ser precipitado sob a forma de fosfatos de alumínio e em ambientes mais secos sob a forma de fosfatos de ferro (NOVAIS; SMYTH, 1999). Práticas como a calagem e o aumento do teor de matéria orgânica, tendem a aumentar a disponibilidade de P nos solos tropicais (BALIGAR; FAGERIA, 1997) sendo que, em solos sob plantio direto no Brasil tem sido observada uma maior relação entre fração de fósforo sob a forma orgânica e inorgânica do que aquela observada no plantio convencional (ANGHINONI, 2006).

Em condições naturais sob vegetação de cerrado, o valor médio de P no solo está em torno de $1,2 \text{ mgkg}^{-1}$, e a taxa média de recuperação do fertilizante fosfatado para diversas culturas tem sido menor que 20% (FAGERIA; BALIGAR; LI, 2006).

Hinsinger et al., (2006) citam que o volume de solo explorado pelas raízes é de apenas 0,4 a 0,8% do volume total da camada superficial, limitando drasticamente a absorção de P, que ocorre pelo mecanismo de difusão (e não por fluxo de massa, como verificado para outros nutrientes como N por exemplo). Isto exige grande proximidade entre a raiz e o nutriente no solo, fazendo

com que o tamanho, e a área do sistema radicular, constituam pontos chave na habilidade das plantas de adquirir P do solo (SCHENK; BARBER, 1980).

Quanto aos processos envolvidos na aquisição de P pelas plantas, tem sido demonstrado que, a entrada do P na planta via membranas, em si, não é a etapa limitante, e que os processos chaves envolvidos são a difusão e o reabastecimento da solução do solo com o nutriente, e a elongação do sistema radicular. Este reabastecimento depende do coeficiente de difusão do P no solo (que tem sido estimado entre 10^{-12} a 10^{-13} m^2/s) e da zona de depleção de P que, para feijão, pode variar de 0,6 a 1,9 mm de distância da raiz (HINSINGER et al., 2006). Adaptações em plantas visando aumentar a superfície de raízes e conseqüentemente o volume da zona de depleção de P, têm sido relacionadas com aumento de pelos radiculares. Lynch e Ho (2005), mostraram que o investimento da planta na produção de pelos radiculares é altamente eficiente em termos de custo de carbono para aquisição de P.

Os fatores que mais afetam a aquisição de P pelas plantas são então: a taxa de elongação de raízes; a arquitetura de raízes; a presença de pelos radiculares; a associação com micorrizas, capazes de se estenderem por vários centímetros permitindo o acesso a íons distantes da superfície radicular; a associação da rizosfera com bactérias solubilizadoras de fosfato e processos induzidos pela raiz que contribuem para aumentar a concentração de P na solução. Entre estes últimos estão: mudança de pH da rizosfera; aumento da exudação de prótons, de ácidos orgânicos e de enzimas do tipo fosfatases ácidas (HINSINGER et al., 2006).

Em termos de consumo pela agricultura, o fósforo é o segundo nutriente mais consumido no mundo, ficando atrás apenas do nitrogênio (BATTEN, 1992). As reservas não renováveis de fosfato no mundo, capazes de serem exploradas a um custo atual de 40 dólares a tonelada, estão próximas da exaustão, devendo estar esgotadas nos próximos noventa anos (MURREL; FIXEN, 2006). Strangel e Von Uexkull, (1990) citados por Batten, (1992) anteciparam que o preço do fertilizante contendo fosfato deveria aumentar rapidamente nas próximas décadas devido a fatores como: esgotamento das jazidas capazes de serem extraídas a custo mais baixo; aumento dos custos de transporte devido ao aumento do preço dos combustíveis; entrada da Ásia no mercado consumidor, aliado ao natural crescimento da população mundial aumentando a necessidade de produção de alimentos e conseqüentemente o uso de fertilizantes. Este cenário se mostrou correto nos dias atuais. Na década de 90, a relação de consumo de fertilizantes contendo N e P no mundo era da ordem de 5:1 (BATTEN, 1992). No Brasil, corretivos e fertilizantes são

os fatores com maior participação no custo final da produção em milho, sendo que, para uma produtividade de 6000 kg grãos ha^{-1} , estes insumos equivalem a 36% do custo total de produção (AGRIANUAL, 2000).

Baligar e Fageria (1997) comparam a importância relativa dos diversos macronutrientes sobre a produção de milho no centro-oeste do Brasil. Os autores concluíram que o P, seguido do nitrogênio, foram os nutrientes que mais limitaram a produção, sendo que deficiência de P fez com que a produção de milho fosse próxima de 50% daquela observada no controle com dose adequada de fertilizantes, enquanto valores de 65% e 85% da produção do controle com adubação completa foram verificados sob baixos níveis de N e K no solo, respectivamente.

Conceitos de nível crítico de P externo e interno à planta foram discutidos por Salinas e Sanchez, (1976). Estes autores definem nível crítico externo e interno de P, respectivamente, como a quantidade de fósforo na solução do solo e no interior da planta acima da qual somente são verificados pequenos incrementos na produção via adição do nutriente (atingidos valores de 80 a 95% da produção máxima). Sanches e Salinas (1981), relataram que, a quantidade de P (em ppm) necessária para se atingir 80% da produção máxima num solo com nível médio de acidez (32% de saturação de alumínio) entre cultivares de arroz de sequeiro, variou de 5 a 8 ppm em três dos cinco cultivares estudados. Para milho, estes valores variaram de 15 a 24 ppm em três dos cinco cultivares estudados, indicando maior nível crítico externo de P no solo para milho que para arroz de sequeiro.

Gramíneas são geralmente mais tolerantes a baixo P no solo do que leguminosas. Esta diferença tem sido atribuída à presença de sistema radicular mais desenvolvido em gramíneas, associado ainda a uma maior habilidade destas em regular a partição de P entre raiz e parte aérea (DUNCAN, 1994).

A forma como uma planta responde à deficiência de um único nutriente depende do estágio de crescimento, da disponibilidade de água e outros nutrientes e de outras condições particulares do ambiente de cultivo. Estresse produzido pela deficiência de um dado nutriente pode ser devido a fatores como: a) baixa concentração do nutriente no solo ou na solução do solo; b) planta com mecanismos de aquisição do nutriente ineficientes; c) ligações do nutriente ao solo tornando-o indisponível; d) baixa taxa de translocação do nutriente da raiz para parte aérea e vice-versa (LOUGHMAN et al., 1983).

Quando insumos são relativamente baratos e facilmente disponíveis, é comum se alterar o ambiente para adequá-lo à necessidade das plantas. A chamada agricultura sustentável tem mudado este enfoque para aquele voltado a modificar a genética vegetal para tolerar ambientes com reduzida disponibilidade de nutrientes.

Sanches e Salinas (1981), definiram a eliminação de restrições de fertilidade dos solos via aplicação de fertilizantes ou a mudança do solo para se adequar às exigências nutricionais da cultura como “high input technology”. Um outro conceito que tem sido utilizado principalmente nas regiões tropicais é aquele que busca associar cultivares mais adaptados ao ambiente tropical e que sejam capazes de atingir níveis razoáveis de produção (não necessariamente máximos), com um mínimo uso de fertilizantes, o qual tem sido chamado de “low input soil management technology”. A obtenção de cultivares mais adaptados a ambientes com baixos níveis de nutrientes no solo, ou capazes de utilizar de maneira mais eficiente o fertilizante aplicado, seria então uma alternativa economicamente desejável, ambientalmente segura e socialmente adequada.

O conceito de “low input soil management” foi demonstrado por Sanchez e Salinas, (1981), utilizando dados de dois híbridos de sorgo plantados em solo ácido de cerrado na região de Brasília, os quais atingiram um mesmo potencial de produção ($6800 \text{ kggr\AA}^{-1}$) sob alto níveis de calagem ($8 \text{ ton calc\AA}^{-1}$). Entretanto, o híbrido Taylor Evans atingiu 80% de sua produção máxima com pouco mais de $1 \text{ ton de calc\AA}^{-1}$, enquanto o híbrido RS-610 atingiu 80% de sua produção máxima somente na dose de $3 \text{ ton de calc\AA}^{-1}$. Além disto, sem aplicação de calcário a produção dos mesmos foi respectivamente de 2300 e 600 kg de grãos ha^{-1} . Os autores concluíram que, uma redução na expectativa de produção para valores adequados, mas que possam ser atingidos com baixo uso de insumos, utilizando cultivares mais eficientes e adaptados, permitiria aos pequenos agricultores obter produções adequadas, com menor uso de capital e menor risco.

O programa de melhoramento de milho da EMBRAPA tem buscado nos últimos 20 anos obter genótipos adaptados a estresses de solos ácidos e responsivos à melhoria do ambiente, como verificado para o híbrido de milho BR201 (MAGNAVACA et al., 1988). Têm-se buscado também, genótipos adaptados a solos ácidos e eficientes no uso de fósforo, como os híbridos BRS3060, BRS1001, BRS1010 e BRS1030 (PARENTONI et al., 2006a).

Inter-relação entre P, alumínio e micronutrientes tem sido verificada. Tolerância ao alumínio tem sido positivamente correlacionada à capacidade da planta de absorver fósforo do meio de crescimento (BROWN, 1963). Clark (1983), reporta a existência de efeitos antagônicos entre fósforo e micronutrientes como ferro e cobre. Altos níveis de P no solo podem ter efeito antagônico sobre disponibilidade de zinco (BULL, 1993), confirmando a necessidade de se buscar genótipos capazes de maximizar a aquisição de P no solo em níveis médios a baixos deste nutriente.

2.1.2 Mecanismos morfológicos e fisiológicos ligados à eficiência ao P em plantas

O fósforo é elemento chave em processos metabólicos ligados à energia e ativação enzimática, e participa ainda na formação de compostos bioquímicos como ácidos nucleicos (DNA, RNA) e fosfolipídeos (que são a base do sistema de membranas celulares), dos quais depende todo o funcionamento da planta. Deficiência de fósforo acarreta então, uma série de efeitos na planta, seguidos de alterações na morfologia, na fisiologia da planta e no transporte e na utilização interna do nutriente, processos estes, que estão sob complexa regulação gênica.

Variação intra-específica na resposta das plantas a determinado estresse nutricional pode ser relacionada a uma ampla gama de fatores morfológicos, anatômicos e fisiológicos. As principais características morfológicas e fisiológicas associadas à adaptação ao estresse de fósforo podem ser divididas em quatro grupos: a) características de aquisição do nutriente, que compreendem fatores morfológicos (como alteração da relação raiz parte aérea, aumento do tamanho, densidade, diâmetro e formação de pelos do sistema radicular), associação com microorganismos (como micorrizas e bactérias solubilizadoras de fosfato), modificações do micro-ambiente na rizosfera (como secreção de ácidos orgânicos e fosfatases) e fatores bioquímicos (como transportadores de membranas), ligados à absorção do nutriente; b) características ligadas à movimentação do nutriente pelo xilema da raiz que compreendem sua transferência na endoderme, liberação no xilema e controle de sua taxa de absorção e distribuição na planta; c) distribuição e remobilização do nutriente na parte aérea, compreendendo remobilização de partes maduras como folhas velhas para meristemas de crescimento vegetativo e reprodutivo e ainda a distribuição do nutriente em compartimentos celulares como vacúolos; d) utilização do nutriente no metabolismo e crescimento da planta, compreendendo a capacidade do genótipo de manter um

metabolismo normal com concentrações reduzidas do nutriente no tecido ou ainda, manter baixas concentrações do nutriente em estruturas de suporte físico como colmos ou caules por exemplo (GERLOFF, 1987). Duncan (1994), afirma que, variações intra-específicas observadas para eficiência nutricional seriam então o resultado de diferente compartimentalização física ou metabólica do nutriente, e de seu uso após translocado para tecidos específicos.

Diversos processos biológicos têm sido relacionados à deficiência de fósforo em plantas, tais como: a) redução da área foliar fotossinteticamente ativa em várias espécies; b) aumento da concentração de amido em folhas; c) diminuição da utilização de carboidratos pelas folhas; d) redução severa na nodulação em soja; e) aumento das concentrações de amônio e arginina (ISRAEL; RUFTY, 1988).

Em plântulas de milho, os efeitos imediatos do estresse de P são um pequeno aumento no volume do sistema radicular e uma drástica redução na taxa de alongação de folhas. No longo prazo, o crescimento da parte aérea e raízes é reduzido sendo este efeito mais pronunciado sobre a parte aérea (MOLLIER; PELLERIN, 2006). A cor roxa, observada em plântulas de milho crescendo sob baixo P, é resultado da acumulação transitória de antocianina na parte aérea que ocorre nestas condições (PINTO; BERTOLDI; DELATORRE, 2006).

Dois efeitos principais parecem afetar a produção de grãos em milho sob deficiência de fósforo: a) redução da produção de área foliar nas fases iniciais de crescimento; b) redução no tempo em que as folhas se mantêm vivas e funcionais durante o período de enchimento de grãos (HANWAY, 1962). Estes efeitos afetam mais o número de grãos por planta do que o peso médio dos grãos em milho (BARRY; MILLER, 1989). Durante os estágios iniciais da deficiência de P, antes que o crescimento seja afetado, as raízes geralmente retêm menos P e transportam mais este elemento para a parte aérea, do que observado em plantas crescendo sem estresse do nutriente. Padrão inverso é observado em estágios mais avançados da deficiência de P (SCHJORRING; JENSEN, 1987).

Aumento nas taxas de absorção são frequentemente observados após períodos curtos de privação de um dado nutriente (CLARKSON; HAWKESFORD, 1993). Os autores mencionam ainda que, uma absorção precoce do nutriente quando este estiver disponível nos estágios iniciais da estação de crescimento, seguida de síntese de proteínas de armazenamento do mesmo, seria boa estratégia adaptativa para a planta, se uma remobilização deste ocorresse, tão logo a planta sentisse deficiência em seu suprimento. Estudos com a proteína RUBISCO (que é a mais

abundante proteína na folha das plantas), mostraram que, quando ocorreu limitação no suprimento de nitrogênio e enxofre, esta proteína foi rapidamente clivada para suprir aminoácidos à planta (FERREIRA; TEIXEIRA, 1992).

Mecanismos de absorção e transporte de nutrientes da raiz para o xilema são controlados via membranas e dependem da constituição química destas e da atuação de transportadores de membrana específicos, sendo que estes processos devem estar sob estrito controle genético (LOUGHMAN et al., 1983). O fósforo absorvido é liberado do simplasto da raiz para o xilema e daí transportado para o floema, principalmente sob a forma de fosfato inorgânico (SCHJORRING; JENSEN, 1987). No citoplasma, a proporção entre fosfatos orgânicos e inorgânicos pode variar e ainda, processos ligados à distribuição dos mesmos entre citoplasma e vacúolo parecem ser chave para a eficiência interna de utilização deste nutriente (LOUGHMAN et al., 1983).

Várias características morfológicas e de eficiência se alteram quando se comparam plantas crescendo em ambientes com baixo e alto P. Baligar e Fageria (1997) estudaram as alterações de parâmetros de crescimento e parâmetros do metabolismo de P em milho cultivado em vasos sob baixo e alto P. As características de crescimento que foram mais afetadas pelos níveis de P no solo foram: relação parte aérea/raiz (aumentou 307% do nível baixo para o nível alto de P) e massa seca de parte aérea (aumentou 159%). As características do metabolismo de P mais afetadas pelo nível de P no solo foram: quantidade de P na parte aérea (aumentou 931%) e porcentagem de P na parte aérea (297%). Os autores concluíram que massa seca de parte aérea e quantidade de P na parte aérea foram os parâmetros que mostraram mais alta sensibilidade à variação dos níveis de P no solo e maior facilidade de avaliação. Já Oliveira et al., (1999), verificaram que o principal fator para explicar a variabilidade observada para adaptação à baixa disponibilidade de P no solo em genótipos de pimentão foi a maior biomassa de raízes dos genótipos tolerantes, enquanto que relação raiz/parte aérea não foi identificada como característica adaptativa. Resultados semelhantes a estes últimos, tem sido observados em tomate (COLTMAN et al., 1985) e alface (BUSO; BLISS, 1988).

Alves et al., (2000) avaliaram o efeito do estresse de P em solução nutritiva, no crescimento de raízes de genótipos de milho. Foi verificado que, de quatro genótipos previamente classificados como eficientes (baseado em sua produção de grãos em solo sob alto e baixo P), três apresentaram aumento significativo no comprimento radicular, o que não foi verificado nos

genótipos ineficientes, sugerindo ser esta uma modificação morfológica que deve estar associada à eficiência ao P nestes genótipos.

Deficiência de P atrasa o aparecimento de raízes adventícias em milho, reduz o seu número final na planta e afeta severamente a taxa de alongação de raízes laterais, sem entretanto afetar a taxa de alongação das raízes adventícias nodais (PELLERIN et al., 2000). Diferenças na acumulação de P entre híbridos de milho parecem ser relacionadas tanto à profundidade do sistema radicular quanto à taxa de penetração das raízes no solo (BAKER et al., 1970).

As principais características morfológicas e fisiológicas ligadas à eficiência no uso de P em gramíneas, listadas por Baligar e Fageria (1997), são: a) sistema radicular fibroso, com alta densidade de raízes, alto comprimento de pelos radiculares e capazes de excretar ácidos orgânicos e enzimas do tipo fosfatases; b) alta capacidade da raiz de adquirir P, seja diretamente do solo, seja via associação simbiótica com micorrizas; c) maior capacidade de produzir matéria seca por unidade de P absorvido; d) partição eficiente do P em frações orgânicas e inorgânicas nos tecidos vegetais; e) níveis altos de sacarose em relação à glicose e frutose; d) conteúdo de ácido fítico nos grãos. A formação de pelos radiculares tem sido considerada importante modificação adaptativa sob deficiência de P. Estes pelos são extensões subcelulares da epiderme da raiz e desempenham papel chave na absorção de nutrientes de baixa mobilidade no solo como o P, via aumento da área de solo explorada pela raiz (ZHUL; KAEPLER; LYNCH, 2005).

Clarkson e Hawkesford (1993), citam dois tipos básicos de regulação metabólica ligada à eficiência no uso de nutrientes. O primeiro compreende a chamada “resposta generalizada” e envolve mudanças na alocação de carbono da parte aérea para raiz, alterações na morfologia de raiz e mudanças na relação entre a raiz e organismos simbióticos como micorrizas e outros solubilizadores de fosfato. O segundo, seria a “resposta específica” à deficiência de um dado nutriente a qual ocorre via regulação positiva ou negativa de transportadores de membrana.

Rengel (1999), relata existirem cerca de mil proteínas localizadas na membrana das células de raízes, especializadas na absorção seletiva de nutrientes nas diversas condições do meio, mostrando a alta capacidade das raízes das plantas de se adaptarem a ambientes deficientes em um dado nutriente.

Estreita relação parece existir entre metabolismo de açúcares e deficiência de fósforo em plantas. Duncan (1994), cita que a parte aérea de um cultivar eficiente no uso de N foi capaz de suprir seu sistema radicular com níveis crescentes de energia via carboidratos, os quais

aumentaram a eficiência de absorção de P de duas maneiras: a) fornecendo material estrutural capaz de manter os sistemas de membranas das células da raiz; b) sendo utilizados como fonte de energia para ativar bomba de prótons requerida para estabelecer o potencial de membrana necessário para absorção de P pela raiz. O autor cita ainda que, um cultivar de soja eficiente ao P submetido a baixo suprimento deste nutriente, mostrou níveis de sacarose mais altos que um cultivar ineficiente ao P, enquanto que os níveis de glicose e frutose não diferiram entre estes cultivares. Em milho, Mollier e Pellerin (2006), reportam efeito direto da deficiência de P sobre a redução na taxa de alongação de folhas enquanto não foi observado efeito imediato da deficiência de P sobre a produção de carboidratos pelas folhas.

Os parâmetros ligados à cinética de absorção de P que são o I_{max} (velocidade de absorção); o K_m (constante de afinidade, que corresponde à concentração do nutriente existente no meio quando o influxo é metade do I_{max}) e o C_{min} (que corresponde à concentração mínima abaixo da qual não ocorre a absorção), tem mostrado pequeno efeito relativo sobre a absorção de nutrientes via difusão, como é o caso do fósforo (NOVAIS; SMITH, 1999). Os autores afirmam que, fatores como o comprimento ou taxa de crescimento de raízes seriam então mais importantes na absorção de fósforo do que alterações na cinética de absorção.

Loughman, Roberts e Goodwin-Bailey (1983), reportam que níveis de ácido abscísico em meristemas apicais (1 mm) de 7 genótipos de milho mostraram variabilidade significativa e foi sugerido que o efeito deste hormônio no transporte de prótons poderia explicar as variações na absorção de fosfato observadas entre os genótipos.

Um dos mecanismos conhecidos de aumentar a aquisição de P do meio é a associação da planta com micorrizas (GOURLEY; ALLAN; RUSSELLE, 1994). Bolan, Robson e Barrow (1983) mostraram que associação entre micorriza e trevo subterrâneo, aumentou a eficiência de absorção e a produção entre genótipos no nível baixo de P, enquanto produções semelhantes foram obtidas entre genótipos inoculados e não inoculados sob suprimento adequado de P.

A taxa de absorção de macronutrientes é estritamente regulada por fatores bioquímicos, os quais variam com as taxas de uso do nutriente para crescimento das plantas. Em organismos inferiores, proteínas que atuam como fatores de transcrição se ligam à região promotora do DNA que codificam enzimas chaves dos processos de assimilação do nutriente (CLARKSON; HAWKESFORD, 1993). Em plantas, os processos de adaptação a baixa disponibilidade de P são complexos. Estes processos envolvem alterações na expressão de centenas de genes (como

indicado em análise de micro arranjos) e causam modificações no sistema de sinalização celular, na expressão de fatores de transcrição e na produção de hormônios vegetais como auxina e citoquinina (RAGHOTAMA et al., 2006). Análise da transcrição gênica em arroz submetido à baixo P mostrou aumento na expressão de genes relacionados à glicólise, à síntese de sulfolipídeos e glicolipídeos e genes codificando para canais aniônicos (SHINANO et al., 2006).

A baixa concentração de P na solução do solo faz com que a aquisição deste pela planta (movimento do P na solução do solo para a raiz), seja feita contra um alto gradiente de concentração, implicando em um sistema ativo de absorção e transporte deste P. Modelos fisiológicos em geral prevêm a existência de transportadores de alta e baixa afinidade de fósforo, sendo que transportadores de baixa afinidade tendem a ser expressos constitutivamente enquanto sistemas de alta afinidade de absorção são altamente induzidos durante deficiência de fósforo (ISMAIL et al., 2006).

Uma das estratégias encontradas em microorganismos para lidar com a deficiência de P é a produção induzida de enzimas do tipo fosfatase (“Psi-phosphatase induced system”). Em *Escherichia coli*, um complicado sistema conhecido como “pho regulon” é composto por vários genes espalhados no cromossomo, os quais são coordenadamente expressos sob estresse de P (RAO et al., 1986). Sistema semelhante foi identificado em levedura (*Saccharomyces cerevisiae*), e sugerido de atuar em plantas (GOLDSTEIN; BAERTLEIM; McDANIEL, 1988).

A capacidade da planta de produzir matéria seca sob baixa disponibilidade de P no meio se deve então ao somatório de mecanismos relacionados à aquisição deste nutriente, ao transporte do P no interior da planta e à sua utilização (SILVA; GABELMAN, 1992), sendo que este último componente tem sido definido como a capacidade de produzir matéria seca de determinado tecido como grãos ou parte aérea, por unidade do nutriente absorvido. Como no milho a maior parte do fósforo existente na planta na fase de maturação está presente nos grãos, a quantidade de grãos produzida por unidade de P nos grãos (quociente de utilização), assume grande importância em trabalhos relacionados à eficiência na utilização interna do fósforo nesta espécie.

2.1.3 Fósforo em grãos de milho

A maior parte dos minerais no grão de milho estão contidos no embrião e no aleurona e quase nada no endosperma (O'DELL; BOLAND; KOIRHTYOHANN, 1972). Cerca de 75% do P nas sementes está armazenado na forma de myo-inositol (1,2,3,4,5,6)-hexakisphosphate (InsP6), conhecido como fitato, o qual está depositado sob a forma de sais contendo vários cátions como potássio, magnésio, cálcio, ferro e zinco (RABOY, 2001). No grão de milho, 90% do fitato está localizado no embrião e 10% no aleurona (RABOY; DICKINSON; NEUFFER 1990). Durante a germinação da semente, este fitato é quebrado por enzimas presentes na semente liberando o P e outros minerais para serem utilizados pela plântula. Estes compostos contendo fitato servem então para diversas funções nos estágios iniciais da germinação tais como: atuam como doadores de P na regeneração do ATP a partir de ADP antes da reconstituição das membranas mitocondriais; atuam no processo de quebra e reparo das fitas duplas de DNA e na transferência do RNA do núcleo para o citoplasma; servem como reserva de cátions necessários ao metabolismo celular. Estudos de fisiologia vegetal tem mostrado ainda que estes fitatos tem papel importante na resposta das células guardas dos estômatos ao ácido abscísico.

Grande interesse no estudo de fitato em grãos, como o milho por exemplo, existe por duas razões principais. A primeira delas está relacionada ao aspecto nutricional. Fitato é considerado um fator anti-nutricional por atuar como agente quelante de metais, tornando-os indisponíveis. Animais monogástricos, que não possuem em seu estômago quantidade suficiente da enzima fitase (que quebra fitato liberando P), além de não terem capacidade de utilizar a maioria do P contido nos grãos de cereais e leguminosas, estão sujeitos também a sérias deficiências de ferro e zinco (WARDYN; RUSSEL, 2004). Em termos de nutrição humana, este ponto é básico, principalmente para populações que têm nas sementes seu alimento principal.

A segunda razão de interesse no estudo de fitato está relacionada à questões de meio ambiente. No milho, cerca de 80% do fósforo encontrado nos grãos ocorre sob a forma de fitato, sendo que, em geral, animais monogástricos somente utilizam 40% ou menos deste, eliminando o restante via dejetos que podem levar à eutrofização de cursos de água situados próximos à grandes criações animais (FEIL et al., 2005).

Por estes motivos, a redução dos níveis de fitato e conseqüentemente de fósforo nos grãos é uma das estratégias para aumentar o valor nutricional das culturas e reduzir problemas de poluição ambiental. Raboy (2001), reporta que este “empacotamento” do P na semente sob a

forma de fitato parece ser apenas uma maneira de armazenar P em grande quantidade nas mesmas, sendo que este fitato não teria diretamente um papel ativo no metabolismo ou no processo de sinalização celular. O autor menciona que, o fitato na semente teria talvez mais importância para plantas que crescem na natureza sem a interferência humana, do que em culturas que recebem altas doses de adubação fosfatada em seu estabelecimento. Por estes motivos, uma linha de pesquisa importante atualmente, é a busca de genótipos com menor teor de fitato (e conseqüentemente de P) nos grãos. Esta linha coincide com o conceito da aumento da eficiência no uso deste nutriente pelas plantas cultivadas via maximização da produção de grãos por unidade do nutriente disponível no solo ou na planta.

Entretanto, possíveis efeitos benéficos tem também sido associados a um maior teor de fitato nos grãos, como sua capacidade de inibir a produção de aflotoxinas e de aumentar o vigor das plântulas (BATTEN, 1992). Liao e Xiaolong (1999) reportam que, tamanho de semente em feijão, foi altamente relacionado à eficiência ao P em plântulas, afetando a expansão de folhas e a atividade fotossintética. Lorenz, Scott e Lamkey (2007) reportam correlação negativa entre teor de fitato e peso de grãos em linhagens de milho, sugerindo que seleção para baixo fitato poderia levar a um aumento no tamanho da semente nesta espécie.

O fitato nos grãos é a principal forma de exportação de P pelas colheitas. A obtenção de genótipos com menor teor de P nos grãos diminuiria a exportação deste nutriente principalmente em áreas deficientes e de agricultura de baixo uso de insumos como na África, além de melhorar o aspecto nutricional do grão (BATTEN, 1986). Este autor menciona que em trigo, a correlação observada entre quantidade de P total nos grãos e teor de fitato, para genótipos crescendo sob diferentes níveis de P no solo foi extremamente alta ($r=0,99^{**}$).

2.1.4 Conceitos de eficiência e resposta ao P

Os conceitos de eficiência de plantas a um dado nutriente, podem ser definidos, com base nos processos pelos quais as plantas adquirem, translocam, acumulam e usam este nutriente para melhor produzir matéria seca e ou grãos em condições de baixo ou alto suprimento do nutriente. A utilização destes conceitos na busca por genótipos mais eficientes na absorção, na translocação para a parte aérea e na utilização de nutrientes para conversão em biomassa e grãos deve ser

então um objetivo estratégico para programas de melhoramento de plantas para estresses minerais (HORST; ABDU; WIESLER, 1993).

Clark e Brown (1974), definem como eficiente, um genótipo capaz de acumular grande quantidade de P em um ambiente pobre neste nutriente. Este conceito não tem sido utilizado por não considerar a produtividade do genótipo neste ambiente. Já Fox (1978), classifica como eficiente, um genótipo capaz de produzir um máximo de matéria seca em ambiente deficiente no nutriente. Clark e Duncan (1991), reportam que, de forma geral, o conceito de eficiência nutricional em plantas, indica aquelas capazes de produzir melhor (matéria seca de parte aérea ou grãos), num dado nível de nutriente no solo.

Gourley, Allan e Russelle (1994), classificam as várias definições de eficiência de nutrientes em três tipos básicos: aquelas que enfatizam critérios de produção, aquelas que enfatizam a capacidade de adquirir o nutriente do meio (aqui chamada de eficiência de absorção) e aquelas ligadas ao requerimento nutricional interno da planta (eficiência de utilização), sendo cada uma delas subdivididas em diversos tipos.

Com respeito a critérios de produção, eficiência tem sido definida de pelo menos três maneiras distintas: a) habilidade da planta de produzir um máximo, em solo ou outro meio (solução nutritiva, mistura vermiculita-areia) que limitaria a produção (BUSO; BLISS, 1988); b) a chamada “eficiência de uso” que inclui produção de parte aérea ou grãos, por unidade do nutriente aplicado ao solo (MOLL; KAMPRATH; JACKSON, 1982; SAUERBECK; HELAL, 1993); c) o requerimento externo de P, que é a quantidade do nutriente no meio requerida para atingir um dado percentual da produção máxima (GOURLEY; ALLAN; RUSSELLE, 1994). Com respeito a critérios de absorção, a eficiência pode ser definida como: a) quantidade de nutriente na planta por unidade do nutriente disponível no solo (MOLL; KAMPRATH; JACKSON, 1982); b) quantidade do nutriente absorvido por unidade de raiz, ou por área ou peso de raízes (COLTMAN; GERLOFF; GABELMAN, 1985; ELLIOT; LAUCHLI, 1985). Com respeito ao requerimento nutricional interno da planta, eficiência tem sido definida como: a) biomassa total de planta, produzida por unidade do nutriente absorvido, (equivalente ao inverso da concentração do nutriente na planta). Este valor tem sido denominado quociente de utilização ou “nutrient efficiency ratio” (GOURLEY et al., 1994); b) quantidade de produto colhido (em vez de biomassa total) por unidade de nutriente absorvido (BUSO; BLISS, 1988), definida por Moll, Kamprath e Jackson (1982), como eficiência de utilização.

Steenbjerg e Jakobsen (1963), fazem uma abordagem gráfica elegante das relações existentes entre doses de um dado nutrientes e produção em plantas. Eles analisaram as chamadas “curvas de produção”, onde são plotadas, na ordenada a produção de matéria seca ou de grãos de determinada cultura e, na abscissa, as doses aplicadas do nutriente. Os autores afirmam que, “todas as outras relações que podem ser de interesse em estudos de nutrição de plantas são derivadas, ou relacionadas a esta curva”. São enumeradas então as seguintes relações básicas: a) quantidade de nutriente absorvido por quantidade do nutriente aplicado (denominada pelos mesmos de “coeficiente de absorção”); b) produção de matéria seca por unidade do nutriente absorvido na planta toda; c) produção de matéria seca (plântulas, ou grãos) por unidade do nutriente no tecido. No caso dos grãos, esta última relação corresponde a kg de grãos produzidos, por kg do nutriente no grão, sendo chamada quociente de utilização. Como o denominador do quociente de utilização (kg do nutriente no grão), é obtido multiplicando-se a concentração do nutriente no grão por kg de grãos produzidos, verifica-se que o quociente de utilização nada mais é do que o inverso da porcentagem do nutriente nos grãos; d) relação multiplicativa entre produção de matéria seca e o inverso da concentração de nutriente no tecido. Quase 20 anos mais tarde, as idéias de Steenbjerg e Jakobsen (1963), foram utilizadas por outros autores, para codificar diversas relações de eficiência nutricional, como aquelas descritas por Moll Kamprath e Jackson (1982) e por Siddiqi e Glass (1981).

A definição de eficiência baseada na quantidade de biomassa produzida por unidade do nutriente absorvido (que equivale ao inverso da % do nutriente no tecido) deve levar à seleção de genótipos que removam menos P do solo, reduzindo os custos de produção e ainda capazes de produzir grãos com menor quantidade do fator anti-nutricional que é o fitato (BATTEN, 1986). Dessa forma “genótipos eficientes” têm sido definidos como aqueles que apresentem alta produção de grãos com um menor acúmulo de nutriente nos mesmos (HORST; ABDU; WIESLER, 1993; BLAIR, 1983). Utilizando este conceito, Siddiqi e Glass (1981), propuseram um índice de eficiência que é obtido pelo produto do rendimento (g matéria seca total ou g de grão) pelo inverso da concentração de nutrientes no tecido. Este índice tem sido utilizado em trabalhos para avaliação de eficiência nutricional, em culturas como milho (MACHADO; FURLANI; MACHADO, 2001), cevada (GORNÝ; SODIKIEWICZ, 2001) e soja (FURLANI et al., 2002). Estes últimos autores relatam que, preferencialmente, este índice tem sido utilizado para avaliações conduzidas em ambientes com baixa disponibilidade do nutriente.

Moll, Kamprath e Jackson (1982), definiram eficiência de uso de um nutriente (EFUSO) como gramas de grãos produzidos (PG) por grama de nutriente suprido à cultura (Ns). Este índice é decomposto em dois componentes principais. A chamada “eficiência de absorção” (EFABS) definida como g de nutriente absorvido pela planta (Nt) dividido por g de nutriente suprido à cultura (Ns). O segundo componente é chamado “eficiência de utilização” (EFUTIL) definida como gramas de grãos produzidos (PG) por unidade de nutriente absorvido (Nt). A eficiência de utilização pode ainda por sua vez, ser dividida em dois componentes: a capacidade da planta de levar o nutriente da parte aérea para os grãos (índice de colheita do nutriente ou eficiência de redistribuição) e sua capacidade de produzir grãos por unidade do nutriente nos grãos (quociente de utilização).

As relações propostas por Moll, Kamprath e Jackson (1982), se aplicam à variáveis de natureza multiplicativa. Estes conceitos de eficiência se baseiam nas seguintes variáveis resposta, a serem obtidas experimentalmente: produção de grãos e palha, (onde palha se refere às folhas, colmos, sabugo e brácteas da espiga), teor do nutriente nos grãos e na palha (%) e quantidade do nutriente disponível no solo. Com estes dados e as matérias secas de grãos e palha são obtidas as quantidades do nutriente nos grãos, na palha e em toda a parte aérea (grãos + palha). O referencial teórico da metodologia proposta pelos autores acima se baseia nos seguintes aspectos:

1) Dadas duas variáveis “A” e “B”, é obtida a partir da multiplicação destas duas, uma terceira variável “C”.

2) Como exemplo, eficiência de uso (C) é uma relação multiplicativa entre eficiência de absorção (A) e eficiência de utilização (B). Transformação logarítmica é utilizada para converter esta relação numa relação aditiva ou $\log(C) = \log(A) + \log(B)$. Esta transformação é feita utilizando-se a média de cada tratamento para cada uma das variáveis C, A e B em cada um dos ambientes, dentro dos níveis alto e baixo do nutriente no solo. As variáveis submetidas à transformação logarítmica, podem então ser renomeadas conforme a equação 1:

$$Y = \log(C), \quad X_1 = \log(A) \quad \text{e} \quad X_2 = \log(B). \quad (1)$$

3) As variáveis y , x_1 e x_2 são definidas respectivamente como os desvios das médias de Y , X_1 e X_2 (eq.2)

$$y = Y - \mu; \quad x_1 = X_1 - \mu \quad \text{e} \quad x_2 = X_2 - \mu \quad (2)$$

4) A soma de quadrados da variável eficiência de uso, após a transformação logarítmica (Σy^2) é decomposta em duas soma de produtos (eq. 3):

$$\Sigma (x_1 * y) \text{ e } \Sigma (x_2 * y) \quad (3)$$

5) A importância relativa da eficiência de absorção sobre a eficiência de uso (EFABS/EFUSO) é igual a (eq.4):

$$EFABS/EFUSO = \Sigma(x_1 * y) / \Sigma y^2 \quad (4)$$

Da mesma forma, a importância relativa da eficiência de utilização sobre a eficiência de uso (EFUTIL/EFUSO) é igual a (eq.5)

$$EFUTIL/EFUSO = \Sigma (x_2 * y) / \Sigma y^2 \quad (5)$$

6) A importância relativa da eficiência de absorção sobre a eficiência de uso do nutriente, é função do produto do coeficiente de correlação entre eficiência de absorção (x_1) e eficiência de uso (y), multiplicado pela relação entre desvio padrão de x_1 e y que pode ser escrito como (eq 6);

$$\Sigma (x_1 * y) / \Sigma y^2 = (r_{x_1 y}) \times (S_{x_1} / S_y) \quad (6)$$

Da mesma forma, a importância relativa da eficiência de utilização de P sobre a eficiência de uso, é função do produto da correlação entre ambos, multiplicado pela relação de desvio padrões entre eles (eq 7);

$$\Sigma (x^2 * y) / \Sigma y^2 = (r_{x_2 y}) \times (S_{x_2} / S_y) \quad (7)$$

Utilizando esta metodologia para estudo da eficiência no uso de nitrogênio em híbridos de milho, os autores acima verificaram que, sob baixo N no solo, a eficiência de utilização interna de N se mostrou mais importante, enquanto sob alto N no solo, a eficiência de absorção foi mais importante que a eficiência de utilização interna de N. Os autores argumentam que, em um programa de seleção, os dois componentes de eficiência (absorção e utilização) deveriam ser considerados. Fageria, Baligar e Li (2006), reportam que a eficiência de utilização do P para produção de grãos em latossolos tropicais corrigidos, tem sido muito mais alta para gramíneas

como arroz e milho (465 e 492 kg grãos/kg P no grão) do que em leguminosas como feijão e soja (229 e 280 kg grãos/kg P no grão).

Os conceitos propostos por Moll, Kamprath e Jackson (1982), permitiram um avanço no entendimento dos processos biológicos relacionados à eficiência, por separarem os efeitos relacionados com a capacidade da planta de adquirir o nutriente do meio (absorção), dos processos metabólicos internos à mesma (utilização). Esta abordagem pode levar a uma maximização do produto econômico (como grãos por exemplo), por unidade do nutriente disponível no solo.

A avaliação de genótipos em ambientes com baixa e alta disponibilidade de um dado nutriente tem sido utilizada para medir a resposta dos mesmos ao aumento da disponibilidade do nutriente. Esta última tem sido medida como a diferença de produção de grãos entre níveis do nutriente, ou como relação entre produção de grãos no nível baixo do nutriente dividida pela produção de grãos no nível alto do nutriente (FURLANI et al., 2002). Tanto os conceitos de eficiência quanto aqueles de resposta a um dado nutriente, devem ser importantes para a identificação de genótipos eficientes e responsivos em um programa de melhoramento.

Batten, Khan e Cullis (1984), definem de forma prática cultivares eficientes e responsivos no uso de P, em função de duas situações: a) eficientes seriam aqueles capazes de produzir mais numa dose de fertilizante mais baixa que a comumente utilizada na cultura; b) responsivos seriam cultivares capazes de produzir aumentos economicamente significativos de produção em níveis de adubação superiores aos normalmente utilizados num dado ambiente. Duncan (1994), cita que, genótipos com alta capacidade de absorver e utilizar fósforo podem não necessariamente ser responsivos a doses altas de P.

Os índices de eficiência propostos por Moll, Kamprath e Jackson (1982), são obtidos separadamente para cada ambiente. Craswell e Godwin (1984) estenderam o conceito de índice de eficiência para um dado ambiente proposto por Moll, Kamprath e Jackson (1982), para uma situação onde é avaliado um par (ou dois grupos) de ambientes contrastantes com alto e baixo suprimento do nutriente. Neste caso são obtidas cinco variáveis e com elas são definidas as variáveis de resposta ao nutriente, chamadas “eficiência agrônômica” e seus dois componentes que são a “eficiência de recuperação aparente” (assim denominada por Baligar e Fageria, 1997) e a “eficiência fisiológica”. As cinco variáveis são: produção de grãos nos ambientes com alta e baixa disponibilidade do nutriente (PG_A e PG_B respectivamente), quantidade total do nutriente

absorvido pela planta nos ambientes com alta e baixa disponibilidade do mesmo (P_A e P_B respectivamente) e diferença na disponibilidade de nutriente no solo entre os ambientes com alto e baixo suprimento do nutriente ($P_{(A-B)}$). A “eficiência agrônômica (EFAGR)”, mede a eficiência de se converter o nutriente disponível no solo em grãos. EFAGR é definida como $(PG_A - PG_B) / P_{(A-B)}$. Os componentes da eficiência agrônômica são definidos como: a) eficiência de recuperação aparente (EFREC) do nutriente do solo, que avalia a quantidade do nutriente recuperado pela planta, por unidade de nutriente adicionada ao solo (sendo este último valor obtido pela diferença na quantidade do nutriente entre níveis alto e baixo). A EFREC é medida como $(P_A - P_B) / P_{(A-B)}$; b) eficiência fisiológica (EFIS), que avalia a quantidade de grãos produzida a mais pela planta entre níveis alto e baixo do nutriente, por unidade de P na planta entre estes ambientes (sendo este último valor obtido pela diferença na quantidade do nutriente na planta entre os níveis alto e baixo). A EFIS é obtida como $(PG_A - PG_B) / (P_A - P_B)$. A eficiência agrônômica é então função do produto das eficiências de recuperação pela eficiência fisiológica.

Os índices propostos por Moll, Kamprath e Jackson (1982), podem ser utilizados em ambientes individuais ou grupos de ambientes, estando relacionados aos conceitos de eficiência. Já os índices propostos por Craswell e Godwin (1984) utilizam o contraste obtido entre ambientes com alto e baixo suprimento do nutriente e dizem respeito à resposta do genótipo ao nutriente.

Fageria e Baligar (1993), propuseram uma forma de agrupar grande número de genótipos de acordo com sua eficiência e responsividade a um dado nutriente, utilizando gráficos do tipo (x,y). No eixo x tem-se a eficiência, que é definida como produção sob baixo nível do nutriente (genótipos são ditos eficientes se produzirem acima da média nesta condição). No eixo y tem-se a resposta ao nutriente que é obtida pela relação entre a diferença de produção de cada genótipo nos dois níveis do nutriente, dividida pela diferença entre doses do nutriente aplicada nos níveis alto e baixo do nutriente (eficiência agrônômica). Neste sentido, Fox (1978), alerta que, ao plotar as produções de massa seca dos genótipos em um gráfico do tipo x,y onde o eixo x corresponde à produção sob baixo P mas no eixo y é plotada a produção sob alto P, (e não a diferença de produção entre alto e baixo P) os materiais do quadrante inferior esquerdo (ineficientes e não responsivos), não deveriam ser considerados ineficientes pois isto pode, em muitos casos, ser devido somente às diferenças em vigor ou heterose entre os genótipos. Um exemplo extremo para este caso são experimentos onde são avaliados simultaneamente híbridos e linhagens em culturas alógamas como o milho. Neste sentido, Gourley, Allan e Russelle (1994), sugerem que, em

estudos de eficiência no uso de nutrientes, dever-se-ia preferencialmente utilizar genótipos que não diferissem muito entre si em condições onde houvesse suprimento adequado do nutriente. Desta forma, seria possível reduzir as chances de que, as diferenças observadas entre genótipos quanto à eficiência de um dado nutriente, fossem devidas a outros fatores relacionados ao potencial de produção e, não necessariamente, relacionados à eficiência.

2.1.5 Genética da eficiência ao P em plantas

Variabilidade genética na capacidade das plantas de absorver, translocar e utilizar nutrientes minerais têm sido verificada desde o início do século passado (HARVEY, 1939). Entretanto, somente nas últimas décadas esforços têm sido feitos no sentido de entender e explorar esta variabilidade em programas de melhoramento, o que tem se mostrado tarefa complexa, devido à herança destas características serem em geral poligênica e afetada pelo ambiente (ROSEN; KORCAK, 1989).

Variabilidade genética para a característica eficiência no uso de fósforo tem sido reportada em culturas como arroz (BALIGAR; FAGERIA, 1997), trigo (SOUZA-ROSA, 1985) e milho (SILVA; GABELMAN, 1992; BAHIA FILHO et al., 1996; PARENTONI et al., 1998) indicando o potencial de melhorar geneticamente esta característica nestas espécies.

Eficiência a fósforo tem se mostrado característica quantitativa, controlada por vários genes em feijão (FAWOLE et al., 1982), trigo (BOCHEV, 1983), arroz (FAGERIA; BALIGAR, 1997) e milho (SILVA; GABELMAN, 1992).

Whiteaker et al., (1976), estudaram a herança de produção de matéria seca em 54 linhagens de feijão crescidas sob deficiência de P, estimada pela razão entre matéria seca produzida por unidade de P acumulado. Os autores concluíram pela não existência de efeito materno para esta característica e que a mesma era de natureza poligênica.

Coltman et al., (1987), utilizaram um cruzamento entre linhagens de tomate diferindo quanto à sua capacidade de aquisição de P e verificaram alta herdabilidade no sentido amplo para esta característica e que efeitos dominantes foram mais importantes no controle da mesma. A diferença encontrada para produção de matéria seca de parte aérea nas populações segregantes cultivadas sob estresse de P deveu-se mais à habilidade dos genótipos de absorverem fósforo do meio do que às diferenças na utilização interna deste fósforo.

Barber, Thomas e Baker (1967), estudaram o controle genético da acumulação de P em folhas de milho. Os autores verificaram que híbridos resultantes de cruzamento entre linhagens com baixa acumulação de P mostraram também baixa acumulação de P e cruzamentos entre linhagens de alta acumulação de P produziram híbridos com alta acumulação de P.

Duncan (1994), relata que herança da eficiência de uso e de utilização de P tem sido quantitativa sendo que efeitos aditivos, dominantes e epistáticos têm sido identificados em diferentes trabalhos. Gorz et al., (1987), estudaram a herança da acumulação de 12 minerais em forragem de sorgo, utilizando um dialelo entre 14 linhagens (7 linhagens fêmeas e 7 linhagens macho). Os únicos elementos onde os efeitos de capacidade específica de combinação foram superiores aos de capacidade geral foram fósforo, cloro, ferro e enxofre

Fawole et al., (1982), encontraram que efeitos de dominância e efeitos epistáticos tiveram grande contribuição na herança da eficiência a P em feijão, obtida como produção de matéria seca de parte aérea em solução nutritiva sob baixo P. Resultados semelhantes têm sido verificados em ensaios em solução nutritiva utilizando tomate para estudos de eficiência no uso de macronutrientes como nitrogênio (O'SULLIVAN; GABELMAN; GERLOFF, 1974), fósforo (COLTMAN et al., 1987) e potássio (MAKMUR; GERLOFF; GABELMAN, 1978).

Gabelman e Gerloff (1983), estudaram a genética da eficiência na utilização de P (mg de matéria seca produzida por mg de P na planta) em feijão. Foram identificadas linhagens capazes de produzir 100% mais matéria seca por unidade de P no tecido e a concentração de P no tecido das linhagens eficientes (0,13 e 0,15%) foi consistentemente menor que a observada na linhagem ineficiente (0,26%). Os autores concluem que, esta capacidade do tecido de funcionar normalmente sob baixa concentração de P no mesmo, deve ser componente importante do mecanismo relacionado à eficiência de utilização de P nesta cultura.

Zhul et al., (2006), mapearam QTLs para comprimento e número de raízes seminais em milho sob baixo P numa população de linhas recombinantes. Foi detectado um QTL de grande efeito associado a comprimento de raiz e três associados a número de raízes sob baixo P, correspondendo a 11 e 25,4% da variância fenotípica observada para estas características. Interação epistática digênica (aditiva x aditiva) foi identificada tanto para comprimento quanto para número de raízes seminais sob baixo P respectivamente em 2 e 8 pares de locos, correspondendo a 23,2 e 50,6% da variância fenotípica. Os autores concluíram que epistasia é de alta importância na herança do comprimento e número de raízes seminais em milho sob baixo P.

A maior parte dos estudos de herança da eficiência no uso de P tem avaliado a absorção e acumulação de P na fase de plântulas, como por exemplo em sorgo e trigo (GORZ et al., 1987; AHSAN; WRIGHT; VIRK, 1996). Estes estudos mostraram que, tanto os efeitos aditivos, quanto os não aditivos, foram importantes no controle da eficiência no uso de P em plântulas. Já Furlani et al., (1998), encontraram que a eficiência de utilização de P em plântulas de milho avaliadas em solução nutritiva foi controlada principalmente por genes de efeito aditivo.

Correlações entre características ligadas à eficiência a P avaliadas na fase de plântulas e características relacionadas à eficiência a P avaliadas após a maturação têm sido em geral baixas (ROÈMER; SCHENK, 1998), sendo que, dados de herança da eficiência no uso de P em trabalhos conduzidos até a maturação são escassos na literatura.

Herança da variável teor de fósforo em grãos de milho foi estudada, avaliando-se progênies obtidas de uma população resultante do cruzamento das variedades Illinois High Protein e Illinois Low Protein (WARDYN; RUSSEL, 2004). A estimativa do coeficiente de herdabilidade no sentido amplo para teor de P nos grãos foi alta ($h^2=0,82$). A eficiência de seleção das progênies com base no resultado de avaliação de um único ano, ou com base na avaliação de progênies em 2 anos, indicou que a seleção baseada em um único ano foi apenas 5 % inferior à seleção baseada na avaliação em dois anos.

Chaubey, Senadhira e Gregorio (1994) estudaram a genética da tolerância a baixo P em arroz (medida como a habilidade relativa de perfilhar em condições de baixo e alto P) num dialelo entre 7 linhagens (4 eficientes, 1 intermediária e 2 ineficientes). Os autores concluíram que: a) tanto efeitos aditivos quanto não aditivos foram importantes; b) foi verificada sobredominância na herança da característica; c) herdabilidade no sentido restrito foi de 0,50; d) genitores tolerantes apresentaram maiores valores de GCA, indicando possuírem maior frequência de genes aditivos. O oposto foi verificado nos genitores suscetíveis.

Davalos (1985) avaliou um dialelo de linhagens de arroz em solo com alto e baixo P. O autor concluiu que, sob estresse de P, um modelo simples do tipo aditivo/dominante não foi capaz de explicar satisfatoriamente a eficiência no uso de P, indicando que ação gênica do tipo epistática poderia estar ocorrendo para esta característica

Um dialelo entre 5 linhagens de trigo foi avaliado quanto ao conteúdo de P na parte aérea (palha e grãos) e quanto à eficiência de utilização de P (BARRIGA; PROSCHLE, 1996). A eficiência de utilização de P foi avaliada pelos seguintes critérios: a) índice de colheita de P (P

nos grãos / P total planta); b) eficiência biológica (matéria seca total / P total na planta); c) eficiência econômica ou de utilização (matéria seca grãos/ P total na planta). Foi verificada alta heterose para todas as características estudadas. Os efeitos gênicos não aditivos foram superiores aos aditivos para todas as características estudadas.

Parentoni et al., (2000), avaliaram um dialelo entre 13 linhagens de milho em um Latossolo Vermelho Escuro-fase cerrado (LE) com alto e baixo P. Foi verificado que os efeitos não aditivos foram superiores aos aditivos para a variável gramas de grão produzido por grama de P no grão (quociente de utilização). Efeitos não aditivos mostraram alta importância na expressão do caráter produção de grãos em milho num dialelo entre doze linhagens avaliado sob baixo P no solo (GAMA et al., 2006).

2.1.6 Análise de médias de gerações

2.1.6.1 Metodologia de análise de médias de gerações

Dentre os métodos utilizados para estudar a herança de uma dada característica encontra-se a análise genética de médias de diversas gerações a partir de um cruzamento biparental, entre linhagens (genitores, F₁, F₂, retrocruzamentos etc.), permitindo quantificar a importância relativa dos efeitos gênicos que constituem as médias das populações em estudo. Estas informações incluem estimativas da magnitude e importância relativa dos efeitos aditivos, de dominância e ainda de efeitos epistáticos no controle de uma dada característica.

Análises de média de gerações têm sido utilizadas para estimar efeitos gênicos tanto em espécies alógamas quanto autógamas e estas estimativas tem sido obtidas para várias características como produção de grãos e seus componentes e tolerância a estresses bióticos e abióticos.

O material genético utilizado para obterem-se as estimativas da magnitude dos diferentes tipos de efeito gênico tem sido diferentes gerações obtidas a partir do cruzamento entre duas linhagens endogâmicas. Duas linhas básicas têm sido utilizadas nos estudos genéticos utilizando-se diversas gerações. A primeira diz respeito à quantificação da magnitude e natureza da variabilidade genética disponível na população segregante e a segunda avalia a importância

relativa dos efeitos gênicos que constituem as médias das populações em estudo (CRUZ; REGAZZI, 1997).

Vários modelos têm sido apresentados para a análise de média de gerações (ANDERSON; KEMPTHORNE, 1954; JINKS; JONES, 1958; HAYMAN, 1958, 1960; GAMBLE, 1962a; EBEHART; GARDNER, 1966; MATHER; JINKS, 1971).

A avaliação das diferentes gerações normalmente é feita em experimentos com repetições em vários ambientes. Geralmente a parcela da geração F_2 é maior que as demais para garantir uma população suficiente para a ocorrência dos genótipos resultantes das recombinações genéticas. Linhas de bordadura separando as gerações altamente endogâmicas (linhagens parentais) das demais gerações devem ser utilizadas para reduzir efeito de competição entre as mesmas (HALLAUER; MIRANDA FILHO, 1988).

Rowe e Alexander (1980), apresentaram um procedimento de computação para estimação de parâmetros genéticos em testes de escala conjunta mais geral, de fácil uso e com aplicação a vários tipos de modelos genéticos. Neste modelo é utilizada uma matriz de ponderação que consiste na inversa de uma matriz diagonal contendo as variâncias correspondentes a cada uma das gerações. A razão para esta correção é que as diferentes gerações tendem a ter diferentes variâncias, e este fato deve ser corrigido no modelo.

Arnold e Josephson (1975), citam que Hayman (1960), classificou os sistemas genéticos em três grupos: a) aqueles onde efeitos epistáticos são não significativos e efeitos aditivos e/ou dominantes são significativos; b) aqueles onde epistasia é significativa, mas efeitos aditivos e/ou dominantes são mais importantes que efeitos epistáticos; c) aqueles em que efeitos epistáticos são tão importantes quanto efeitos aditivos e ou dominantes. Nos grupos a e b, as discrepâncias nas estimativas de efeitos aditivos e dominantes não são sérias, mas no grupo c, a presença de epistasia pode afetar as estimativas de efeitos aditivos e dominantes.

Ponto importante em estudos de média de gerações é buscar utilizar genitores bastante contrastantes para a característica estudada, já que o modelo assume que todos (ou pelo menos a grande maioria) dos alelos favoráveis para uma dada característica estariam concentrados em um dos genitores. Uma limitação do estudos de médias de gerações é que efeitos de dominância bidirecionais, caso presentes, poderiam se anular (o que não ocorre em estudos que utilizem componentes de variâncias em vez de componentes de médias). A questão do efeito da dispersão gênica de alelos dominantes entre os parentais foi analisada por Kearsey e Pony (1996). Os

autores reportam que, se 70% dos alelos favoráveis estiverem em um dos genitores, níveis de dominância próximos de 0,40 poderiam fazer com que o F₁ fosse maior que média do genitor superior. No caso onde 55% dos alelos favoráveis estivessem em um dos genitores (ou seja, alta dispersão de alelos entre os pais), níveis de dominância próximos de 0,15 já seriam suficientes para que isto ocorresse. Apesar destas limitações, a metodologia de análise de médias de gerações tem sido útil para estudar as causas e magnitudes dos componentes genéticos que contribuem para a média de um dado caráter e estas informações tem sido empregadas para verificar métodos de seleção mais eficientes para estes caracteres (CRUZ; REGAZZI, 1997).

2.1.6.2 Exemplos de análises de médias de gerações

Vários estudos tem sido conduzidos em milho utilizando a metodologia de análise de médias de gerações. Para produção de grãos em milho, Gamble (1962a) e Darrah e Hallauer (1972), encontraram que efeitos gênicos dominantes foram mais importantes que os aditivos. Estes autores reportam ainda que, em linhagens de segundo ciclo, os efeitos epistáticos foram superiores aos encontrados em linhagens de primeiro ciclo de reciclagem.

Vários estudos de resistência a doenças têm encontrado maior importância de genes de efeitos aditivo no controle das mesmas. Exemplos disto são: tolerância à podridão de colmo causada por *Colletotrichum graminicola*, (PEREIRA; BALMER; MIRANDA FILHO, 1989), resistência a carvão da espiga causada por *Sphacelotheca reiliana* (BERNARDO; BOURRIER; OLIVER, 1992) e resistência à podridão de grãos causada por *Giberella zea* (CHUNG et al., 1996). Já para podridão de espigas causada por *Aspergillus flavus* (CAMPBELL; WHITE, 1995) ou causada por *Fusarium moniliforme* (NANKAN; PATAKY, 1996), os efeitos aditivos e dominantes contribuíram significativamente na expressão da resistência.

Estudos da herança de estresses abióticos em milho utilizando-se médias de gerações podem ser encontrados na literatura. Para tolerância à seca, Ivanovic et al., (1992) mostraram importância de efeitos aditivos e epistáticos, sendo os dominantes pouco significativos. Já Sanguineti et al., (1996) mostraram importância de efeitos aditivos, dominantes e epistáticos no controle desta característica, no material genético estudado. Pérez-Velásquez (2000) estimou a magnitude dos efeitos gênicos para produtividade e outras características utilizando médias de gerações, obtidas de cruzamentos entre linhagens com diferentes comportamento em solos ácidos

e avaliando as gerações em quatro solos ácidos e dois férteis. Para produção de grãos houve predominância dos efeitos dominantes tanto em solos ácidos quanto férteis, sendo que em alguns cruzamentos verificou-se a existência de efeitos epistáticos.

Gabelman e Gerloff (1983) estudaram a genética da eficiência na utilização de P (mg de matéria seca produzida por mg de P na planta) em feijão. Dois genitores com alta e baixa eficiência na utilização de P (734 e 467 mgmg⁻¹), e dois genitores intermediários na utilização de P (617 e 625 mg de matéria seca parte aérea por mg de P na parte aérea), seus F₁, F₂ e retrocruzamentos foram utilizados. As magnitudes dos efeitos de dominância ou epistasia foram superiores àquelas obtidas para os efeitos aditivos em todos os cruzamentos avaliados.

2.2 Material e Métodos

2.2.1. Material Genético

Seis linhagens endogâmicas (mínimo de sete gerações de autofecundação), desenvolvidas pelo programa de melhoramento da EMBRAPA-Milho e Sorgo em Sete Lagoas, MG com diferentes níveis de eficiência ao fósforo foram utilizadas nos cruzamentos (Tabela 1).

Estas linhagens foram selecionadas com base em seu comportamento per se quando avaliadas em um Latossolo Vermelho Escuro com alto e baixo teor de fósforo (15 ppm e 2 ppm) respectivamente. As linhagens L3, L 228-3 e L36 foram também selecionadas pelo seu comportamento em um dialelo de 13 linhagens avaliado em solo com alto e baixo teor de P (PARENTONI et al., 2000).

Tabela 1 – Germoplasma de origem, ano de obtenção e classificação quanto à eficiência ao P para seis linhagens de milho

Linhagem	Origem	Ano de obtenção	Eficiência no uso de P
L 3	Sintético Eficiente a fósforo	1999	Altamente eficiente
L 228-3	Sintético BR 106	1995	Eficiente
L36	Sintético de híbridos comerciais	1983	Medianamente Eficiente
L 22	BR 106	1983	Ineficiente
L 53	BR 111	1980	Ineficiente
Cateto AI 237/67	Cateto Água Limpa	1967	Ineficiente

No ano de 2003, foram obtidos na Embrapa Milho e Sorgo sete cruzamentos F_1 entre estas linhagens. Com base na sua produção de grãos sob baixo e alto P no solo estes cruzamentos foram classificados como eficientes ou ineficientes ao P (Tabela 2).

Tabela 2 – Cruzamentos utilizados e tipo de cruzamento baseado na produção de grãos sob baixo e alto P no solo

Cruzamento	Tipo de cruzamento
L3 x L22	Eficiente
L3 x Cateto Al 237/67	Eficiente
L3 x L36	Eficiente
L228-3 x L22	Eficiente
L3 x L53	Ineficiente
L36 x Cateto Al 237/67	Ineficiente
Cateto Al 237/67 x L53	Ineficiente

Em 2003 e 2004 foram obtidas em Sete Lagoas-MG as gerações F_1 , F_2 , RC_1P_1 , RC_1P_2 , RC_2P_1 e RC_2P_2 para cada um dos sete cruzamentos da Tabela 2. Para as gerações F_2 , RC_1 e RC_2 foram obtidas pelo menos 50 espigas de cada geração para cada um dos cruzamentos, e uma amostra balanceada destas espigas foi utilizada para representar cada uma destas gerações. A geração RC_1P_2 do cruzamento L3x22 não produziu semente em quantidade suficiente, não sendo utilizada nos estudos subsequentes. Foram então obtidos 47 tratamentos referentes a 6 genitores, 7 F_1 's, 7 F_2 's, 7 RC_1P_1 's, 7 RC_1P_2 's, 7 RC_2P_1 's e 6 RC_2P_2 's. Para efeito de “fontes de variação” na ANOVA, estas gerações foram distribuídas nas seguintes classes: genitores (6 linhagens), F_1 's (sete híbridos), F_2 's (7 F_2 's obtidos dos respectivos F_1 's), RC_1 's (7 RC_1P_1 + 7 RC_1P_2 , num total de 14 RC_1) e RC_2 (7 RC_2P_1 + 6 RC_2P_2 , num total de 13 RC_2P_2).

2.2.2 Execução experimental

Os 47 tratamentos (6 genitores, 7 F_1 's, 7 F_2 's, 7 RC_1P_1 's, 7 RC_1P_2 's, 7 RC_2P_1 's e 6 RC_2P_2 's) foram avaliados utilizando o delineamento experimental de blocos completos casualizados com três repetições por ambiente. As parcelas foram constituídas por 2 linhas de 3 m de comprimento

com espaçamento de 80 cm entre linhas para todas as gerações, exceto para as gerações F₂. Para estas últimas a parcela foi constituída por 4 linhas de 3m. Foram semeadas 30 sementes por fileira e quinze dias após a semeadura foi feito desbaste para 15 plantas por fileira. O stand ideal por parcela foi de 30 plantas para os genitores, F₁, RC₁ e RC₂ e de 60 plantas por parcela para a geração F₂. O estande médio por parcela observado na colheita para os dois ambientes sob alto P foi de 27,3 plantasparcela⁻¹, equivalente a uma densidade populacional de cerca de 56.875 plantas por hectare e para os três ambientes sob baixo P o estande médio por parcela foi de 23,2 plantasparcela⁻¹ equivalente a uma densidade populacional média de 48.333 plantasha⁻¹. Foram utilizadas bordas para separar os genitores (linhagens) das diversas gerações, evitando-se problemas de competição entre gerações.

Os experimentos foram avaliados nos anos agrícolas 2004/2005 e 2005/2006 em cinco ambientes na EMBRAPA-Milho e Sorgo em Sete Lagoas-MG. Estes ambientes foram constituídos por áreas com diferentes níveis de P em um Latossolo Vermelho Escuro-fase cerrado (LE-cerrado). Estas áreas foram previamente desenvolvidas para utilização em estudos de eficiência no uso de P. No ano agrícola 2004/2005 foi utilizada uma área sob alto P (denominada ambiente 2) e uma área sob baixo P (denominada ambiente 3) e no ano agrícola 2005/2006 foram utilizados uma área sob alto P (denominada ambiente 5) e duas áreas sob baixo P (denominadas ambientes 7 e 8). As análises de solo e ano agrícola, correspondente a cada um dos cinco ambientes encontram-se na Tabela 3. As áreas com baixa concentração de P continham de 4,40 a 7,37 mgkg⁻¹ de P na camada de solo de 0-20cm, enquanto as áreas com alta concentração de P continham de 15,31 a 16 mgkg⁻¹ na camada de solo de 0-20 cm. A adubação de plantio em todas as áreas foi feita utilizando-se uma mistura com 20 Kg de N e 60 kg de K₂O por hectare. Nas duas áreas sob alto P foi também utilizado 200 kg_{ha}⁻¹ de super-fosfato triplo no plantio, correspondendo à dose de 90 kg de P₂O₅ha⁻¹ ou 39,30 kg de Pha⁻¹ fornecido via fertilizante. O P nas análises de solo, foi obtido utilizando-se o extrator Mehlich 1.

A capacidade de suprimento de P de cada ambiente foi obtida considerando-se a quantidade de P no solo de 0 a 60 cm, fornecida pela análise de solo (P disponível nas camadas de 0-20 cm e de 20-60 cm de profundidade) adicionada à quantidade de P suprida via fertilizante. A densidade aparente dos solos utilizados foi de 1 kg/dm³. A quantidade de P suprida pelo solo (kg Pha⁻¹ de 0-60 cm de profundidade) nos três ambientes sob baixo P (ambientes 3, 7 e 8) foi respectivamente de 16,80, 25,76 e 24,82 kgPha⁻¹. Para os dois ambientes sob alto P (ambientes 2 e 5), a

quantidade de P suprida pelo solo foi respectivamente de 41,86 e 44,00 kgPha⁻¹ e a quantidade de P suprida via fertilizante foi de 39,30 kgPha⁻¹ para cada um dos dois ambientes, totalizando 81,16 kgPha⁻¹ no ambiente 2 e 83,30 kgPha⁻¹ no ambiente 5. Cerca de 30 dias após o plantio foi feita adubação de cobertura com N com 200 kg de uréiaha⁻¹. O controle de plantas daninhas e lagarta do cartucho foi feito nos ensaios. Os experimentos receberam irrigação suplementar sempre que necessário, de modo a separar efeitos referentes à eficiência ao P daqueles causados por estresse hídrico.

2.2.3 Caracteres avaliados

Abaixo seguem em **negrito**, os caracteres utilizados nas análises estatísticas e genéticas. Os outros caracteres (sem **negrito**) foram utilizados para obter aqueles que foram analisados.

- i) Florescimento masculino (**FM**): número de dias do plantio até que 50 % das plantas da parcela tivessem iniciado a liberação de pólen;
- ii) Florescimento feminino (**FF**): número de dias do plantio até que 50 % das plantas da parcela tivessem emitido estilo-estigmas;

Os dados dos caracteres **FM** e **FF** foram utilizados apenas para se obter a variável **ASI**, conforme mostrado abaixo.

- iii) Intervalo entre florescimento masculino e feminino (**ASI**): diferença (em dias) entre **FM** e **FF**;
- iv) Estande (**ES**): número de plantas por parcela no momento da colheita;
- v) Peso de espigas da parcela (**PEparc**): peso de espigas da parcela, expresso em kgparcela⁻¹ (tomados com três casa decimais);
- vi) Peso de grãos da parcela (**PGparc**): peso de grãos da parcela, expresso em kgparcela⁻¹ (tomados com três casa decimais);
- vii) Peso de sabugos da parcela (**PSparc**): obtido pela diferença entre **PEparc** e **PGparc**, expresso em kgparcela⁻¹;
- viii) Massa Fresca de Parte Aérea (**MFPApar**): peso de todas as plantas da parcela cortadas junto ao solo (incluindo colmos, folhas e brácteas da espiga), obtido após a colheita das espigas e somado ao peso de sabugos da parcela, expresso em kgparcela⁻¹ (tomados com três casa decimais);

ix) Umidade de grãos (U): uma amostra de grãos de cada parcela foi retirada após a colheita e determinada a % de umidade utilizando-se equipamento apropriado;

x) O caráter produção de grãos (**PG**) em kg ha^{-1} corrigido para 15% de umidade foi obtido utilizando a expressão (eq. 8),

$$PG = PG_{\text{parc}} \times \left[\frac{(100 - U)}{85} \right] \times \left(\frac{10.000}{AEP} \right) \quad (8)$$

em que,

U= teor de umidade dos grãos, expresso em porcentagem,

PG_{parc} é o peso de grãos da parcela, expresso em kg parcela^{-1}

AEP = área efetiva da parcela, que foi de $4,8 \text{ m}^2$ para as gerações referentes aos genitores , F_1 ,

RC_1 e RC_2 e de $9,6 \text{ m}^2$ para a geração F_2 ;

xi) caráter peso de palha (PP) em kg ha^{-1} foi obtido utilizando a expressão (eq. 9),

$$PP = MFPA_{\text{par}} \times \left(\frac{10.000}{AEP} \right) \quad (9)$$

em que,

$MFPA_{\text{par}}$ = peso de todas as plantas da parcela em kg,

AEP = área efetiva da parcela.

Para os caracteres peso de grãos e peso de palha, foram feitas correções para o estande médio, utilizando-se o método de correção por covariância descrito por Steel e Torrie (1960).

Para as análises químicas do teor de P, os grãos obtidos de cada parcela foram homogeneizados e retirada uma amostra, enviada ao laboratório. Após a pesagem no campo da MFPA, de cada parcela foram retiradas 5 plantas (incluindo colmo, folhas, palhas da espiga e sabugo). Cada amostra de 5 plantas foi moída, homogeneizada e retirada uma alíquota para análise. No laboratório as amostras de grãos e palha foram secas em estufa com ventilação forçada à $65 \text{ }^\circ\text{C}$ até peso constante, para determinação da matéria seca. As amostras foram moídas e o teor de P nos grãos e palhada foi obtido no laboratório de análises químicas de plantas da EMBRAPA-Milho e Sorgo, utilizando-se o método espectrofotométrico de análise com azul de molibdênio (Malavolta, Vitti e Oliveira, 1989; Silva, 1999).

No laboratório, foram determinadas as seguintes características:

xii) porcentagem de massa seca de grãos (%MSG);

xiii) porcentagem de fósforo na massa seca de grãos (FGR);

xiv) Teor de P na massa seca de grãos (**TPG**) expresso em gramas de P por kg de massa seca de grãos (gkg^{-1}) obtido por (eq. 10),

$$\mathbf{TPG} = \text{FGR} \times 10 \quad (10)$$

xv) porcentagem de massa seca na parte aérea (%MSPA);

xvi) porcentagem de fósforo na massa seca de parte aérea (FPAL);

Com base nos dados obtidos no campo e das análises de laboratório, foram obtidas as seguintes variáveis:

xvii) Massa seca de grãos (MSG) em kgha^{-1} , obtida utilizando a expressão (eq. 11),

$$\text{MSG} = \text{PG} \times \% \text{MSG} \quad (11)$$

xviii) Massa seca de palha (MSPA), em kgha^{-1} , obtida utilizando a expressão (eq. 12),

$$\text{MSPA} = \text{MFPA} \times \% \text{MSPA} \quad (12)$$

xix) Quantidade de P nos grãos (FOGR), em kgha^{-1} , obtida utilizando a expressão (eq. 13),

$$\text{FOGR} = \text{MSG} \times \text{FGR} \quad (13)$$

xx) Quantidade de P na palha (FOP), em kgha^{-1} , obtida utilizando a expressão (eq. 14),

$$\text{FOP} = \text{MSPA} \times \text{FPAL} \quad (14)$$

xxi) Quantidade total de P na parte aérea (**FTOT**) em kgha^{-1} , obtida pela expressão (eq. 15),

$$\mathbf{FTOT} = \text{FOGR} + \text{FOP} \quad (15)$$

xxii) Índice de colheita de P (**ICP**) que equivale a “unidades de P nos grãos por unidade de P na parte aérea” (kgkg^{-1}) e que foi multiplicado por 10^2 sendo expresso como $\text{kgkg}^{-1} \times 10^2$ e obtido utilizando a expressão (eq. 16),

$$\mathbf{ICP} = (\text{FOGR} / \text{FTOT}) \times 10^2 \quad (16)$$

xxiii) Quociente de utilização de P (**QUTIL**), que equivale a “unidades de massa seca de grãos produzidas por unidade de P nos grãos “ (em kgkg^{-1}) obtido utilizando a expressão (eq. 17),

$$\mathbf{QUTIL} = \text{MSG}/\text{FOGR} \quad (17)$$

2.2.4 Índices de Eficiência ao P utilizados

Foram utilizados os índices de eficiência propostos por Moll, Kamprath e Jackson (1982). Este índices foram obtidos para cada ambiente e também para o grupo de ambientes com baixo P no solo, para o grupo de ambientes com alto P no solo , e para os cinco ambientes em conjunto. Os autores utilizam como referência para determinar seus conceito de eficiência três variáveis básicas: P_G , P_S e P_A obtidas em cada ambiente, definidas como:

P_G = Peso de grãos (kg/ha), expresso como massa seca de grãosh $^{-1}$.

P_S = Quantidade de fósforo no solo disponível para a planta (kg ha^{-1})

$P_A = \text{FTOT}$ = Quantidade total do nutriente absorvido pela planta (kg ha^{-1})

Neste estudo a quantidade de fósforo no solo disponível para a planta para cada ambiente foi obtida conforme descrito no ítem execução experimental. A quantidade total de P absorvido pela planta corresponde à variável FTOT. Com base nestas variáveis, são definidos três tipos de eficiência do nutriente:

xxiv) Eficiência de absorção (**EFABS**), definida como a capacidade do genótipo de absorver o P disponível no solo, correspondendo a kg de P na planta por kg de P disponível no solo (kgkg^{-1}), que foi multiplicado por 10^2 sendo expressa como $\text{kgkg}^{-1} \times 10^2$ obtida pela expressão (eq. 18),

$$\mathbf{EFABS} = (\text{FTOT} / P_S) \times 10^2 \quad (18)$$

xxv) Eficiência de utilização (**EFUTIL**), definida como a capacidade do genótipo de utilizar o P absorvido pela planta para produzir grãos, correspondendo a kg de massa seca de grãos produzidos, por kg de P na planta (kgkg^{-1}), obtida utilizando a expressão (eq. 19),

$$\mathbf{EFUTIL} = \text{MSG} / P_A \quad (19)$$

xxvi) Eficiência de uso de P (**EFUSO**), definida como o produto das eficiências de absorção e utilização de P, correspondendo a kg de massa seca de grãos produzidos por kg de P disponível no solo (kgkg^{-1}), obtida utilizando a expressão (eq. 20),

$$(\mathbf{EFUSO}) = \text{MSG} / P_s \quad (20)$$

2.2.5 Índices de Resposta ao P utilizados

Foram utilizados os índices propostos por Crasweel e Godwin (1984), e dois outros de ampla utilização em trabalhos relacionados à resposta ao P que são:

xxvii) Produção relativa de grãos entre níveis baixo e alto de P no solo (**RELPG**) que foi multiplicada por 10^2 sendo expressa como $\text{kgkg}^{-1} \times 10^2$.

xxviii) Diferença de produção de grãos entre níveis alto e baixo de P (**DIFPG**) para cada um dos genótipos (kg ha^{-1});

As variáveis utilizadas para medir a resposta ao P são obtidas a partir de diferenças entre pares de ambiente com alto P e baixo P, que devem ser plantados na mesma época, para estarem submetidos à condições ambientais semelhantes. Neste aspecto, foram utilizados três pares de ambientes: a) em 2004/2005, ambientes 2 (alto P) e ambiente 3 (baixo P); b) em 2005/2006, ambientes 5 (alto P) e ambiente 7 (baixo P); c) em 2005/2006, ambientes 5 (alto P) e ambiente 8 (baixo P). Estes pares de ambientes foram plantados com diferença máxima de um dia.

As médias ajustadas de peso de grãos (PG), a quantidade de P total no grão (FTOT) e a quantidade de P total no solo (P_s) de cada ambiente, foram utilizadas para se obter as diferenças para cada um dos três pares de ambiente listados acima. As novas variáveis obtidas para cada par de ambiente foram:

xxix) Diferença entre quantidade de P disponível no solo (P_s) entre ambientes com alto (A) e baixo (B) fósforo no solo (kg), denominada $P_{(A-B)}$;

xxx) Diferença de quantidade total de P na planta entre ambientes com alto e baixo P (DIFPTOT), correspondendo à diferença de quantidade total de P na planta entre ambientes com alto e baixo P ($FTOT_A - FTOT_B$), em kg.

Foram utilizados os seguintes conceitos de resposta ao P, conforme descritos por Crasweel e Godwin (1984).

xxxii) Eficiência de Recuperação Aparente (**EFREC**), definida como capacidade do genótipo em recuperar o nutriente adicionado ao solo entre ambientes com alto e baixo P ou, kg de P recuperado por kg de P adicionado ao solo entre ambientes, que foi multiplicada por 10^2 sendo expressa como $kg\ kg^{-1} \times 10^2$ e obtida utilizando a expressão (eq. 21),

$$\mathbf{EFREC} = \text{DIFPTOT} / P_{(A-B)} \quad (21)$$

xxxiii) Eficiência Fisiológica (**EFIS**), definida como capacidade do genótipo em produzir grãos por unidade adicional de nutriente na planta entre ambientes com alto e baixo P ou, kg de grãos produzidos, por kg de P recuperado na planta entre ambientes ($kg\ kg^{-1}$), obtida utilizando a expressão (eq. 22),

$$\mathbf{EFIS} = \text{DIFPG} / \text{DIFPTOT} \quad (22)$$

xxxiiii) Eficiência agrônômica, que é obtida pelo produto da eficiência de recuperação aparente pela eficiência fisiológica, sendo definida como a capacidade do genótipo de produzir unidades de grão por unidade de fertilizante adicionado ao solo ($kg\ kg^{-1}$), obtida utilizando a expressão (eq. 23),

$$\mathbf{EFAGR} = \text{DIFPG} / P_{(A-B)} \quad (23)$$

Pode-se verificar que, os conceitos de eficiência propostos por Moll, Kamprath e Jackson (1982), se referem à dados obtidos a partir de ambientes individuais, sendo considerados conceitos de eficiência. Já os conceitos propostos por Crasweel e Godwin (1984) são obtidos a partir de diferenças entre ambientes contrastantes, sendo considerados conceitos de resposta ao P.

2.2.6 Análises Estatístico-Genéticas

2.2.6.1 Análises de Variâncias

Todas as análises estatístico-genéticas foram realizadas utilizando-se o programa computacional SAS versão 8.2. O modelo matemático (eq. 15) para as análises de variância para cada ambiente, segundo Cochran e Cox (1966) é:

$$y_{ij} = \mu + t_i + r_j + e_{ij} \quad (24)$$

em que,

y_{ij} : é o valor observado do tratamento i na repetição j ;

μ é a média geral do experimento, $E(\mu) = \mu$ e $E(\mu^2) = \mu^2$,

t_i é o efeito do tratamento i ($i = 1, 2, \dots, 47$), $E(t_i) = t_i$ e $E(t_i^2) = t_i^2$,

r_j é o efeito da repetição j ($j = 1, 2, 3$), $E(r_j) = 0$ e $E(r_j^2) = \sigma_r^2$,

e_{ij} : erro experimental associado à parcela i dentro da repetição j , $e_{ij} \cap N(0, \sigma^2)$, e $E(e_{ij}) = 0$ e $E(e_{ij}^2) = \sigma_e^2$

A soma de quadrados (SQ) de tratamentos foi desdobrada em SQ de genitores, SQ F₁'s, SQ F₂'s, SQ RC₁'s, SQ RC₂'s e SQ entre gerações, para cada ambiente. Os seguintes caracteres foram analisados: peso de grãos (PG), intervalo de florescimento masculino e feminino (ASI), teor de P na massa seca de grãos (TPG), quantidade de P total na parte aérea (FTOT), eficiência de absorção (EFABS), eficiência de utilização (EFUTIL), eficiência de uso (EFUSO), índice de colheita de P (ICP) e quociente de utilização (QUTIL).

Para os caracteres submetidos às ANOVAS individuais, foi feita uma análise de variância conjunta para os cinco ambientes. A soma de quadrados de ambientes nesta análise foi desdobrada em ambientes com alto P, ambientes com baixo P e entre níveis de P. Duas outras análises de variância conjunta para cada caráter foram realizadas, considerando-se separadamente os três ambientes sob baixo P no solo e os dois ambientes sob alto P. O modelo

matemático (eq. 16), considerado fixo (exceto para repetições dentro de ambientes), para as análises de variância conjunta para os cinco ambientes, segundo Cochran e Cox (1966) foi:

$$y_{ijl} = \mu + a_l + r_{j(l)} + t_i + (ta)_{il} + e_{ijl} \quad (25)$$

em que,

y_{ijl} é o valor observado do tratamento i na repetição j , no ambiente l ,

μ é a média geral do experimento, $E(\mu) = \mu$ e $E(\mu^2) = \mu^2$,

a_l é o efeito do ambiente l ($l=1,2,3,4,5$), $E(a_l) = a_l$ e $E(a_l^2) = a_l^2$,

$r_{j(l)}$ é o efeito da repetição j ($j = 1, 2, 3$), dentro do ambiente l , $E(r_{j(l)}) = 0$ e $E(r_{j(l)}^2) = \sigma^2_{r/a}$,

t_i é o efeito do tratamento i ($i = 1, 2, \dots, 47$), $E(t_i) = t_i$ e $E(t_i^2) = t_i^2$,

$(ta)_{il}$ é o efeito da interação tratamento i e ambiente l , $E[(ta)_{il}] = (ta)_{il}$ e $E[(ta)_{il}^2] = (ta)_{il}^2$,

e_{ijl} é o erro efetivo associado ao tratamento i , na repetição j , para o ambiente l ; $e_{ijl} \cap N(0, \sigma^2)$

onde $E(e_{ijl}) = 0$ e $E(e_{ijl}^2) = \sigma_e^2$.

O quadro da análise conjunta de variância com a decomposição da soma de quadrados para tratamentos de acordo com as gerações consideradas encontra-se na Tabela 4.

As médias ajustadas das ANOVAS individuais foram utilizadas para obter uma ANOVA conjunta para os três ambientes sob baixo P, uma outra para os dois ambientes sob alto P e outra para os cinco ambientes. A soma de quadrados de tratamentos foi desdobrada em genitores, F_1 's, F_2 's, RC_1 's, RC_2 's e entre gerações. A soma de quadrados da interação tratamento x ambiente foi desdobrada em genitores x ambientes, F_1 's x ambientes, F_2 's x ambiente, RC_1 's x ambiente, RC_2 's x ambiente e entre gerações x ambientes.

2.2.6.2 Análises de variâncias para caracteres de resposta ao P

As médias ajustadas das análises de variância individuais, foram utilizadas para se obter as diferenças entre pares de ambientes, utilizadas na análise de caracteres de resposta ao P (conforme descrito no item caracteres avaliados). Foi feita uma análise utilizando os dados dos três pares de locais. O quadrado médio de tratamentos foi desdobrado nos efeitos correspondentes às cinco gerações (genitores, F_1 's, F_2 's, RC_1 's e RC_2 's) e entre gerações. Todos os efeitos foram testados com o erro experimental.

2.2.6.3 Estimativas dos efeitos gênicos

As médias de gerações foram utilizadas para se estimar os efeitos gênicos, conforme metodologia proposta por Matther e Jinks (1971). Considerando dois progenitores P_1 e P_2 de genótipos AABB e aabb respectivamente, e sua gerações derivadas (F_1 , F_2 , RC_1P_1 , RC_1P_2 , RC_2P_1 e RC_2P_2), esta metodologia permite expressar as médias de cada geração, excluindo os erros experimentais, pelos seguintes componentes genéticos:

Genitores – Linhagens P_1 e P_2 :

Admitindo-se que a linhagem P_1 acumule maior quantidade de alelos favoráveis e que P_2 acumule menor quantidade de alelos favoráveis, os valores genotípicos esperados (eq. 26 à eq. 29), seriam :

$$P_1 = m + a_A + a_B + a_{AAB} \quad (26)$$

$$P_2 = m - a_A - a_B + a_{AAB} \quad (27)$$

Para n locos tem-se:

$$P_1 = m + a + aa \quad (28)$$

$$P_2 = m - a + aa \quad (29)$$

em que

m é a média dos possíveis homozigotos, considerando-se todos os genes que controlam o caráter;

a_A é o valor genotípico do genótipo AA,

a_B é o valor genotípico do genótipo BB,

$a_{AA}a_B$ é o efeito resultante da interação gênica inter-alélica,

$$a = a_A + a_B = \sum_i a_i \text{ (para n locos);}$$

$$aa = a_{AA}a_B = \sum_i \sum_{i < j} a_i a_j \text{ (para n locos)}$$

Geração F₁:

A geração F₁, obtida de cruzamentos entre genitores homozigóticos e contrastantes, apresenta-se em heterozigose e, portanto, sua média genotípica esperada (eq. 30 e eq. 31) é:

$$F_1 = m + d_A + d_B + d_A d_B \quad (30)$$

$$F_1 = m + d + dd \quad (31)$$

em que,

m é conforme definido acima;

d_A é o valor genotípico do genótipo Aa,

d_B é o valor genotípico do genótipo Bb,

$d_A d_B$ é o efeito resultante da interação gênica inter-alélica,

$$d = d_A + d_B = \sum_i d_i \text{ (para n locos);}$$

$$dd = d_A d_B = \sum_i \sum_{i < j} d_i d_j \text{ (para n locos)}$$

Gerações F₂, RC₁ e RC₂:

Seguindo o raciocínio utilizado nas gerações acima, pode-se obter os componentes genéticos das médias para a geração F₂, para o primeiro retrocruzamento (RC₁P₁ e RC₁P₂) e segundo retrocruzamento (RC₂P₁, RC₂P₂). Para cada uma destas gerações e considerando-se n locos tem-se então os seguintes componentes genéticos das médias (eq.32 à eq.36) :

$$F_2 = m + \frac{1}{2} d + \frac{1}{4} dd \quad (32)$$

$$RC_1P_1 = m + \frac{1}{2} a + \frac{1}{2} d + \frac{1}{4} aa + \frac{1}{4} ad + \frac{1}{4} dd \quad (33)$$

$$RC_1P_2 = m - \frac{1}{2} a + \frac{1}{2} d + \frac{1}{4} aa - \frac{1}{4} ad + \frac{1}{4} dd \quad (34)$$

$$RC_2P_1 = m + \frac{3}{4} a + \frac{1}{4} d + \frac{9}{16} aa + \frac{3}{16} ad + \frac{1}{16} dd \quad (35)$$

$$RC_2P_2 = m - \frac{3}{4} a + \frac{1}{4} d + \frac{9}{16} aa - \frac{3}{16} ad + \frac{1}{16} dd \quad (36)$$

em que

m ,a, d, aa e dd já definidos acima e,

$$ad = da = a_A d_B + d_A a_B = \sum_{i < j} a_i d_j \quad (\text{para } n \text{ locos})$$

Para cada cruzamento, o modelo completo para uma média observada na k-ésima geração, incluindo todos os efeitos de acordo com a notação de Gamble (1962a) é (eq.37):

$$g_k = m + (\alpha_k) a + (\delta_k) d + (\alpha_k^2) aa + (\alpha_k \delta_k) ad + (\delta_k^2) dd \quad (37)$$

em que

g_k é a média da k-ésima geração (média de i ambientes e r repetições),

m é a média de todos os possíveis homozigotos, considerando-se todos os genes que controlam o caráter,

α_k , δ_k são coeficientes determinados pelo grau de parentesco da k-ésima geração,

a são os efeitos gênicos aditivos,

d são os efeitos gênicos dominantes,

aa são os efeitos gênicos epistáticos do tipo aditivo x aditivo,

ad são os efeitos gênicos epistáticos do tipo aditivo x dominante

dd são os efeitos gênicos epistáticos do tipo dominante x dominante

Os parâmetros *m*, *a*, *d*, *aa*, *ad*, *dd* foram estimados utilizando-se o método dos quadrados mínimos ponderados. A notação matricial para o modelo de quadrados mínimos (eq. 38) é:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{e} \quad (38)$$

em que

\mathbf{y} é o vetor de médias de gerações,

\mathbf{X} é a matriz de coeficientes, de acordo com o componente genético que expressa a média de cada geração considerada na análise (Tabela 5),

$\boldsymbol{\beta}$ é o vetor de efeitos gênicos,

\mathbf{e} é o vetor de erros associados às médias.

Tabela 5 – Matriz \mathbf{X} de coeficientes de efeitos gênicos

Coeficientes de efeitos gênicos						
Gerações	<i>m</i>	[<i>a</i>]	[<i>d</i>]	[<i>aa</i>]	[<i>ad</i>]	[<i>dd</i>]
P ₁	1	1	0	1	0	0
P ₂	1	-1	0	1	0	0
F ₁	1	0	1	0	0	1
F ₂	1	0	1/2	0	0	1/4
RC ₁ P ₁	1	1/2	1/2	1/4	1/4	1/4
RC ₁ P ₂	1	-1/2	1/2	1/4	-1/4	1/4
RC ₂ P ₁	1	3/4	1/4	9/16	3/16	1/16
RC ₂ P ₂	1	-3/4	1/4	9/16	-3/16	1/16

O sistema de equações pode ser representado na forma matricial $\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \mathbf{e}$ onde,

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ F_1 \\ F_2 \\ RC_1P_1 \\ RC_1P_2 \\ RC_2P_1 \\ RC_2P_2 \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 1/4 \\ 1 & 1/2 & 1/2 & 1/4 & 1/4 & 1/4 \\ 1 & -1/2 & 1/2 & 1/4 & -1/4 & 1/4 \\ 1 & 3/4 & 1/4 & 9/16 & 3/16 & 1/16 \\ 1 & -3/4 & 1/4 & 9/16 & -3/16 & 1/16 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\beta} = \begin{bmatrix} m \\ a \\ d \\ aa \\ ad \\ dd \end{bmatrix}, \mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \\ e_7 \\ e_8 \end{bmatrix}$$

A solução deste sistema de equações pelo método dos quadrados mínimos permite obter estimativas dos parâmetros m , a , d , aa , ad e dd usando-se as médias das gerações.

Para as análises, foram utilizadas as médias de cada um dos grupo de ambientes (alto P, baixo P e todos os cinco ambientes) das gerações de cada cruzamento para as variáveis peso de grãos (PG), intervalo florescimento masculino e feminino (ASI), teor de P nos grãos (TPG), quantidade total de P na parte aérea (FTOT), eficiência de absorção de P (EFABS), eficiência de utilização de P (EFUTIL), eficiência de uso de P (EFUSO), índice de colheita de P (ICP) e quociente de utilização (QUTIL). As estimativas dos efeitos aditivos, dominantes e epistáticos foram obtidas para cada cruzamento utilizando-se de análises de regressão mediante o procedimento dos quadrados mínimos ponderados (eq. 39) cuja expressão é :

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}'\mathbf{D}^{-1}\mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}'\mathbf{D}^{-1}\mathbf{y} \quad (39)$$

em que

$\hat{\boldsymbol{\beta}}$ é o vetor $n \times 1$ de estimativas de efeitos genéticos,

\mathbf{X} é a matriz $n \times p$ de coeficientes de efeitos genéticos (Tabela 5),

\mathbf{y} é o vetor $n \times 1$ de médias de gerações para um cruzamento particular,

\mathbf{D} é a matriz diagonal de ponderações,

\mathbf{X}' indica a tranposta e \mathbf{X}^{-1} indica a inversa da matriz \mathbf{X}

$n=8$ refere-se ao número de gerações e $p=6$ refere-se ao número de parâmetros do modelo completo (m , a , d , aa , ad , dd). Para o cruzamento L3x22 foram utilizadas apenas seis gerações

nas análises (n=6), já que o RC₂P₂ não foi obtido, e decidiu-se não incluir o RC₂P₁ nas análises genéticas neste cruzamento.

Para todos os caracteres, exceto as variáveis de resposta, as variâncias das médias de cada geração foram estimadas conforme sugerido por Arnold & Josepson (1975) como (eq. 40):

$$V_{gi} = QM(\text{interação } gi \text{ x ambiente } a) / RA \quad (40)$$

em que

i refere-se à *i*-ésima geração,

R e A referem-se ao número de repetições e de ambientes, respectivamente.

A variância da interação *gi* x ambiente foi obtida para o grupo de ambientes sob alto P, para o grupo de ambientes sob baixo P e para os cinco ambientes. O produto do número de repetições (3) pelo número de ambientes foi de 6, para os dois ambientes sob alto P, 9 para os três ambientes sob baixo P e de 15 para os cinco ambientes.

Para as variáveis de resposta, obtidas à partir de diferenças entre pares de ambientes, a matriz de ponderação D utilizada foi a matriz diagonal com as variâncias de cada geração, conforme sugerido por Rowe e Alexander (1980). Estas variâncias foram divididas pelo número de repetições (r=3).

Para a análise genética de médias de gerações foi inicialmente considerado o modelo aditivo-dominante e foram estimados os coeficientes de determinação (R²) e o Qui-quadrado (χ²) obtidos entre valores observados e valores estimados das médias das diversas gerações de cada cruzamento, sendo este último também chamado de “Teste de Escala”. A seguir, nos cruzamentos onde os dados se ajustaram ao modelo aditivo-dominante, foram obtidas respectivamente as estimativas dos efeitos médios, aditivos e dominantes. Quando o teste χ² foi significativo, os efeitos de interação digênica foram sequencialmente adicionados para testar, após cada adição, o quadrado médio dos desvios e determinar a necessidade de adicionar-se novos parâmetros. Para os modelos que incluíram efeitos de interação digênica, somente foram considerados aqueles componentes que apresentaram significâncias em suas estimativas.

Os valores de χ² para o modelo utilizado foram obtidos conforme descrito por Rowe e Alexander, (1980), de acordo com a equação 41:

$$\chi^2_{\text{com } n-p \text{ graus de liberdade}} = (y - \hat{y})' (D^{-1}) (y - \hat{y}) \quad (41)$$

em que,

y é o vetor $n \times 1$ de médias de gerações observadas para um cruzamento particular,

\hat{y} é o vetor $n \times 1$ de médias de gerações estimadas para um cruzamento particular,

D é a matriz diagonal de ponderações,

n é o número de gerações utilizadas no modelo e

p é o número de parâmetros estimados

O número de graus de liberdade para testar a significância do χ^2 em um dado cruzamento foi igual ao número de gerações utilizadas (n) menos o número de parâmetros estimados no modelo (p). Conforme sugerido por Kearsey e Pooni (1996), modelos mais simples com ajuste adequado, são sempre preferíveis à modelos mais complexos, mesmo que estes últimos mostrem melhor ajuste. No presente estudo, para seis dos sete cruzamentos, foram avaliadas oito gerações. Neste caso, para o modelo reduzido, onde são estimados apenas três parâmetros (m, a, d), o χ^2 tabelado terá 5 graus de liberdade. Os valores de χ^2 tabelado à 5% e 1% para cinco graus de liberdade são 11,07 e 15,09. Valores calculados de χ^2 inferiores a estes números, serão então não significativos, à 5% ou à 1% de probabilidade. À medida que se acrescentem novos parâmetros no modelo, diminui-se o número de graus de liberdade do χ^2 . Para o cruzamento L3x22, onde foram utilizadas nas análises genéticas, apenas seis gerações, no caso do modelo reduzido, o χ^2 tabelado terá 3 graus de liberdade. Os valores de χ^2 tabelado à 5% e 1% para três graus de liberdade são 7,82 e 11,34. Valores calculados de χ^2 inferiores a estes números, serão então não significativos, à 5% ou à 1% de probabilidade.

O coeficiente de determinação (R^2) foi utilizado para obter a proporção da variação na variável dependente (valores médios de cada geração estimados conforme o modelo utilizado) que pode ser atribuída ao modelo. O R^2 do modelo foi estimado elevando-se ao quadrado o coeficiente de correlação (r) obtido entre os valores das médias observadas e os valores das médias estimadas conforme o modelo utilizado (PIMENTEL GOMES, 2000).

A significância dos efeitos gênicos foram obtidas pelo teste “t” (eq. 42), conforme descrito por Rowe e Alexander (1980), como mostrado a seguir:

$$t = \frac{\hat{\beta}_i}{s_i} \quad (42)$$

em que,

$\hat{\beta}_i$ = estimativa do efeito genético,

s_i = erro padrão da estimativa do efeito genético i (eq. 43), obtido da diagonal de:

$$s_i = [(X'D^{-1}X)^{-1}]^{1/2} \quad (43)$$

2.2.6.4 Correlações fenotípicas

Dados das médias dos diversos caracteres obtidos em cada ambiente foram utilizados para se obter os coeficientes de correlação de Pearson entre estas variáveis. Utilizou-se apenas dados das gerações F_1 , F_2 e RC_1 devido ao fato de que, dominância pode vir a ser importante fator no controle gênico de algumas das variáveis estudadas, como é o caso de peso de grãos em milho por exemplo (HALLAUER; MIRANDA FILHO, 1988). Neste caso, o uso de gerações endogâmicas (linhagens) ou com maior grau de endogamia (retrocruzamentos 2), poderia não ser adequado. Estas correlações foram obtidas então a partir de 28 observações por ambiente (7 F_1 's, 7 F_2 's e 14 RC_1 's). Para os três ambientes sob baixo P, foram utilizadas 84 observações de cada caráter. Para os dois ambientes sob alto P, foram utilizadas 56 observações por caráter. A significância destas correlações foi determinada, conforme procedimento apropriado utilizado pelo programa SAS 8.2 Windows.

Para o caso das variáveis de resposta ao P, foram seguidos os seguintes procedimentos. Como estas variáveis são obtidas a partir de diferenças entre ambientes com alto e baixo P, no caso dos 3 ambientes sob baixo P (ambientes 3, 7 e 8), os valores referentes a cada uma das três repetições para as variáveis de resposta ao P (diferença entre ambientes 2 e 3; diferença entre ambientes 5 e 7; e diferença entre ambientes 5 e 8) foram utilizados respectivamente na matriz de correlações sob baixo P, como referentes aos ambientes 3, 7 e 8. No caso dos ambientes sob alto P (ambientes 2 e 5), a diferença entre os ambientes 2 e 3 foi utilizada na matriz de correlação com variáveis do ambiente 2 e a média das diferenças (diferença entre ambientes 5 e 7 e diferença entre ambientes 5 e 8) foi utilizada para correlações com variáveis referentes ao ambiente 5.

2.2.7 Relações propostas por Moll, Kamprath e Jackson (1982)

Para obter as relações de importância relativa de duas variáveis sobre uma terceira, obtida a partir da multiplicação das duas outras, Moll, Kamprath e Jackson (1982), utilizaram médias das ANOVA conjunta sob baixo e alto N para as variáveis peso de grãos, peso de palha, concentração de P nos grãos e concentração de P na palha. Com estas médias, foram estimadas as variáveis eficiências de absorção (X_1), e eficiência de utilização (X_2). A eficiência de uso (Y) foi obtida a partir do produto das médias de eficiência de absorção e eficiência de utilização, para cada um dos híbridos F_1 analisados. No caso em que se obtêm dados à nível de parcela para cada uma destas eficiências (X_1 , X_2 e Y), como ocorreu no presente estudo, o produto das médias por local para eficiência de absorção e eficiência de utilização é próximo, mas não idêntico ao valor observado para eficiência de uso obtida à nível de parcela neste ambiente. Neste caso, deve-se utilizar as médias ajustadas de eficiência de absorção e de eficiência de utilização obtidas em cada ambiente e, pelo produto das mesmas, é obtida uma nova “eficiência de uso”, que é bastante próxima, mas não idêntica àquela obtida à nível de parcela, sendo este procedimento necessário para manter a ortogonalidade da relação conforme descrito na metodologia original.

Além das relações entre eficiência de absorção e eficiência de utilização, sobre o caráter eficiência de uso de P, dois outros casos de relações multiplicativas relacionadas à eficiência e resposta ao P foram estudados no presente trabalho. A primeira delas é a eficiência de utilização de P (EFUTIL), que é função do produto entre índice de colheita de P (kg de P nos grãos por kg de P na planta) pelo quociente de utilização (quantidade de grãos produzidos por kg de P nos grãos). A segunda relação multiplicativa é a eficiência agrônômica (EFAGR), que é função do produto entre eficiência de recuperação aparente (EFREC) pela eficiência fisiológica (EFIS).

Da mesma forma como exposto anteriormente no item referente à obtenção de correlações fenotípicas entre variáveis, no caso do estudo das relações propostas por Moll, Kamprath e Jackson (1982) foram utilizados os dados por ambiente das gerações F_1 , F_2 e RC_1 , não se utilizando dados obtidos das linhagens (genitores) e dos RC_2 , pelas mesmas razões expostas anteriormente. Foram utilizadas então um total de 84 observações nos ambientes sob baixo P (3 ambientes e 28 genótipos em cada ambiente) e 56 observações nos ambientes sob alto P (2 ambientes e 28 genótipos em cada ambiente).

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Análise geral dos resultados

As análises de solo mostraram que os cinco ambientes diferiram quanto ao fósforo (P) disponível no solo nos níveis baixo e alto deste nutriente, mas diferiram também quanto a outras propriedades químicas como pH e saturação de bases (Tabela 3). Entretanto, a correlação observada entre produção média de grãos (PG) e quantidade de P disponível no solo de 0-60 cm para os cinco ambientes foi de $r=0,95^{**}$, indicando que, cerca de 90,25 % da variabilidade observada entre médias de tratamentos para peso de grãos nos cinco ambientes (R^2) pôde ser explicada pela variação na quantidade de P disponível no solo.

Diferenças significativas entre médias dos ambientes sob alto e baixo P no solo foram verificadas para a maioria dos caracteres estudados (Tabela 6), com exceção de índice de colheita de P (ICP). A média geral (todas as gerações), para peso de grãos (PG) nos três ambientes sob baixo P foi 47,10 % inferior à média obtida nos dois ambientes sob alto P no solo (2657 kg ha^{-1} vs 5023 kg ha^{-1}). Para os dois ambientes sob alto P as médias de PG foram de 4391 e 5654 kg ha^{-1} , e para os três ambientes sob baixo P, as médias de PG foram de 2295, 2817 e 2859 kg ha^{-1} . Menor produção de grãos, entre ambientes no nível alto de P foi observada no ano agrícola 2004/2005, em relação ao ano agrícola 2005/2006. Fox (1978), reporta redução média no peso de grãos entre híbridos de milho sob alto e baixo P no solo de 35%. Reduções médias de PG em milho entre níveis alto e baixo de P de cerca de 45% tem sido observadas em diversos ensaios conduzidos na EMBRAPA-Milho e Sorgo (PARENTONI et al., 2006a). Os coeficientes de variação experimental (cv) para peso de grãos nos ambientes sob baixo P no solo variaram de 22,60 a 24,85 % e foram mais altos que os verificados nos ambientes sob alto P (12,18 e 14,86 %), principalmente em função da redução das médias nos ambientes sob baixo P (Tabelas 7 a 11). Valores mais altos de cv em ambientes sob estresse mineral em relação a ambientes de alta fertilidade tem sido comumente reportados (VELÁZQUES, 2000).

O valor médio para intervalo entre florescimento masculino e feminino (ASI) nos ambientes sob baixo P foi cerca de 3,48 vezes maior que nos ambientes sob alto P no solo (4,00 e 1,15 dias respectivamente). Aumento nos valores de ASI tem sido associado com maior susceptibilidade a diversos tipos de estresses como seca (RIBAUT et al., 1996) e deficiência de nitrogênio

(LAFFITE ; EDMEADES, 1994). Não se encontrou na literatura, referências associando aumento de ASI com estresse de P, sendo então esta, uma observação relevante.

Para o caráter teor de P nos grãos (TPG), a média nos três ambientes sob baixo P foi 7,36 % inferior à obtida nos dois ambientes sob alto P (2,39 vs 2,58 g de P por kg de matéria seca de grãos), sendo que, para os dois ambientes sob alto P, as médias de TPG foram de 2,22 e 2,94 gkg⁻¹ e para os três ambientes sob baixo P, as médias de TPG foram de 1,93 2,64 e 2,61 gkg⁻¹. Aumento no teor de P nos grãos de milho em ambiente com alto P em relação à ambiente com baixo P (1,10 e 4,20 gkg⁻¹) e (2,10 e 2,70 gkg⁻¹) foram reportados por Baligar e Fageria (1997), e Prado, Fernandes e Roque (2001), respectivamente. Valores médios para concentração de P nos grãos de milho em ambientes de alta fertilidade nos EUA e Canadá foram de 0,32% ou 3,20 gkg⁻¹ (WARDYN; RUSSEL, 2004), com amplitude de variação para TPG em progênies S₁ (obtidas do cruzamento entre as populações de milho Illinois High and Low Protein), variando de 2,20 a 4,80 gkg⁻¹. Novais e Smyth (1999) reportam valores médios de TPG para soja de 0,47 % ou 4,7 gkg⁻¹.

A média para quantidade de P total na parte aérea (FTOT) nos três ambientes sob baixo P foi 53,18 % inferior à obtida nos dois ambientes sob alto P (7,52 kgha⁻¹ vs 16,06 kgha⁻¹), sendo que, para os dois ambientes sob alto P, as médias de FTOT foram de 13,41 e 18,71 kgha⁻¹ e para os três ambientes sob baixo P, as médias de FTOT foram de 5,59 8,27 e 8,71 kgha⁻¹.

Para eficiência de absorção de P (EFABS), a média nos três ambientes sob baixo P foi 72,81 % superior à obtida nos dois ambientes sob alto P (33,82 vs 19,57 kgkg⁻¹x10²), sendo que, para os dois ambientes sob alto P, as médias de EFABS foram de 16,52 e 22,62 (equivalentes a 16,52 e 22,62 % do P disponível no solo) e para os três ambientes sob baixo P, as médias de EFABS foram de 33,26 33,12 e 35,09 kgkg⁻¹x10². Novais e Smyth (1999), citam que o termo “absorção” indica o transporte de nutrientes para dentro da planta através de membranas celulares. Como consequência do seu significado restrito, os autores mencionam que este termo tem sido substituído pelo termo “aquisição de nutrientes”, que englobaria qualquer forma da planta de retirar o P do solo. Por razões didáticas, decidiu-se manter ao logo deste trabalho o termo “eficiência de absorção”, mas estando ciente de que o termo mais apropriado seria “eficiência de aquisição de P”.

Para o caráter eficiência de utilização de P (EFUTIL), a média nos três ambientes sob baixo P foi 9,25 % superior à obtida nos dois ambientes sob alto P (297,94 vs 272,71 kg de massa seca de grãos produzidos por kg de P na parte aérea), sendo que, para os dois ambientes

sob alto P, as médias de EFUTIL foram de 284,24 e 261,18 kgkg^{-1} e para os três ambientes sob baixo P, as médias de EFUTIL foram de 332,67 283,23 e 277,91 kgkg^{-1} . Maior EFUTIL sob baixo P no solo, comparada à observada sob alto P tem sido reportada em milho (FOX,1978), trigo (BATTEN; KHAN; CULLIS, 1984), alfafa e trevo branco (GOURLEY; ALLAN; RUSSELLE, 1994).

A média para eficiência de uso de P (EFUSO) nos três ambientes sob baixo P foi 101,16 % superior à obtida nos dois ambientes sob alto P (107,60 vs 53,49 kg de massa seca de grãos produzidos por kg de P disponível no solo), sendo que, para os dois ambientes sob alto P, as médias de EFUSO foram de 47,20 e 59,78 kgkg^{-1} e para os três ambientes sob baixo P, as médias de EFUSO foram de 122,04 97,72 e 103,05 kgkg^{-1} . Uma explicação para o fato de que maior eficiência (EFABS, EFUTIL, EFUSO) é observada sob níveis mais baixos de um dado nutriente no solo é dada por Steenbjerg e Jakobsen (1963). Os autores reportam que, em estudos com doses de um nutriente variando de baixas à altas, as curva obtidas entre produção (y) e quantidade aplicada do nutriente (x), ou entre kg do nutriente absorvido (y) por kg de nutriente aplicado (x) tendem a ter forma sigmóide ou convexa. Este formato, faz com que os acréscimos em produção advindos de aumentos constantes na dose aplicada do nutriente (kg de grão por kg de nutriente aplicado, ou “eficiência de uso”) e acréscimos em kg de nutriente absorvido por kg de nutriente aplicado (“eficiência de absorção”) tendam a ser decrescentes ou seja, as eficiências de uso e de absorção tendem a ser maiores nas doses mais baixas do nutriente, diminuindo com o aumento da dose do mesmo.

O único caráter onde não foi verificada diferença significativa entre níveis de P no solo foi o índice de colheita de fósforo (ICP), que mede a relação entre a quantidade de P nos grãos e a quantidade de P total na parte aérea. Os valores médios observados nos níveis baixo e alto de P foram de 67,66 e 66,54 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$. Para os dois ambientes sob alto P as médias de ICP foram de 60,46 e 74,86 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$ e para os três ambientes sob baixo P, as médias de ICP foram de 58,65 72,49 e 68,49 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$. Estes resultados indicam que os genótipos não diferiram quanto à sua capacidade de redistribuir o P da parte aérea para os grãos entre níveis baixo e alto P, apesar de haver diferença para este caráter entre ambientes dentro de um mesmo nível de P no solo (Tabela 6). A média geral de ICP (considerando-se todas as gerações) nos cinco ambientes foi de 66,99 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$, indicando que na colheita, cerca de 67,00 % do P na parte aérea dos genótipos

estudados estava localizada nos grãos e o restante estava distribuído entre folhas, colmos, sabugos e palhas da espiga.

O quociente de utilização de P (QUTIL), que mede a quantidade de massa seca de grãos produzida por unidade de P nos grãos, teve média nos três ambientes sob baixo P 7,10 % superior à obtida nos dois ambientes sob alto P (499,82 vs 466,69 kgkg⁻¹), sendo que, para os dois ambientes sob alto P as médias de QUTIL foram de 537,62 e 395,75 kgkg⁻¹ e para os três ambientes sob baixo P, as médias de QUTIL foram de 620,25 433,44 e 445,78 kgkg⁻¹. Steenbjerg e Jakobsen (1963), reportam que em estudos com um nutriente presente em quantidades limitantes, aumentos de matéria seca implicam em uma redução na concentração do nutriente no tecido (efeito de diluição). Por esta razão, o QUTIL, que é o inverso da porcentagem do nutriente no tecido (FGR), tende a ser máximo nos ambientes com baixo suprimento do nutriente, e decai com o aumento da dose do mesmo. Novais e Smyth (1999), reportam valores médios de QUTIL para soja de 213,00 kgkg⁻¹ sendo que, ao se variar o P em equilíbrio na solução onde a planta foi cultivada do nível mínimo até 30 mgL⁻¹ de P os valores de QUTIL variaram de 437,00 a 141,00 kg de grãos por kg de P nos grãos, indicando, como observado por outros autores, que maiores valores de QUTIL são obtidos nas menores doses de P.

Quanto aos genótipos utilizados neste estudo, as seis linhagens parentais foram previamente selecionadas com base em sua produção de grãos em solo com baixo e alto P na EMBRAPA-Milho e Sorgo, sendo que as linhagens L3 e L228-3 haviam sido classificadas como altamente eficiente e eficiente ao P, a linhagem L36 como medianamente eficiente e as linhagens L22, L53 e Cateto como ineficientes. Na média dos três ambientes sob baixo P (Tabela 16), as linhagens L3 (2.140 kgha⁻¹) e L 228-3 (2.115 kgha⁻¹) produziram respectivamente 2,35 vezes e 2,32 vezes mais grãos que a média das três linhagens ineficientes (910 kgha⁻¹). A linhagem considerada como medianamente eficiente, L36 (1.000 kgha⁻¹) produziu 1,10 vezes mais que a média das três linhagens ineficientes. Na média dos dois ambientes sob alto P, as linhagens L3 e L228-3 produziram respectivamente 1,94 vezes e 1,73 vezes mais que a média das 3 linhagens ineficientes (1.614 kgha⁻¹), enquanto a linhagem medianamente eficiente (L36) produziu 1,86 vezes mais que a média das 3 linhagens ineficientes (o que indica que a linhagem L36 seria bastante responsiva ao P). Estes dados indicam que a classificação de eficiência feita anteriormente com base no comportamento das linhagens “per se” para produção de grãos em solos sob baixo P estava correta.

Gourley, Allan e Russele (1993) definiram conceitos para distinguir entre “genótipos superiores” e “genótipos eficientes” em estudos de eficiência nutricional em plantas. De acordo com estes autores, atividade metabólica superior em um dado genótipo deverá resultar em produções mais altas, independente da disponibilidade de P no meio e neste caso, um genótipo superior (e não um genótipo eficiente) estaria sendo identificado. A condição chave para classificar um par de genótipos como eficiente e ineficiente seria então que os mesmos atingissem produções semelhantes sob níveis adequados do nutriente e que diferissem entre si nos ambientes sob baixo suprimento do mesmo. As médias de peso de grãos sob baixo e alto P no solo para os sete híbridos F_1 utilizados neste estudo permitiram classificar estes genótipos em quatro pares de materiais eficientes e ineficientes (sendo que dois destes pares tiveram um genótipo comum), baseado em sua produção semelhante sob alto P e distinta sob baixo P no solo (Figura 1). O primeiro par foi composto pelos híbridos L3x22 (eficiente ao P) e L3x53 (ineficiente ao P). O segundo par incluiu os cruzamentos L3x36 (eficiente) e L36xCateto (ineficiente). Os híbridos L3xCateto e 228-3x22 podem ser classificados como eficientes ao P e o híbrido Catetox53 seria um cruzamento ineficiente a ser comparado a estes dois híbridos. A produção média de grãos sob baixo e alto P no solo para os quatro híbridos eficientes foi de 5088 e 8167 kg ha^{-1} respectivamente e para os três híbridos ineficientes estes valores foram de 3612 e 8393 kg ha^{-1} respectivamente. Estes dados mostram que as médias de peso de grãos dos cruzamentos F_1 classificados como eficientes e ineficientes ao P diferiram nos ambientes sob baixo P no solo, mas não nos ambientes sob alto P no solo, indicando que os cruzamentos F_1 utilizados neste estudo compreenderam um grupo balanceado de genótipos eficientes e ineficientes ao P, concordando com os conceitos propostos por Gourley, Allan e Russele (1993).

Estes sete cruzamentos podem ainda ser divididos conforme a classificação prévia obtida da avaliação de produção de grãos sob baixo P das linhagens “per se”, utilizadas como genitoras. Dos cinco cruzamentos obtidos entre uma linhagem eficiente e uma linhagem ineficiente (ou moderadamente eficiente) ao P, quatro cruzamentos foram classificados como eficientes, com base em sua produção de grãos sob baixo e alto P no solo (L3x22, L3x36, L3xCateto e 228-3x22). Somente o cruzamento entre as linhagens L3x53 (eficiente x ineficiente), foi classificado como ineficiente ao P. Os dois cruzamentos entre linhagens ineficientes (ou moderadamente eficiente) e uma linhagem ineficiente foram classificados como ineficientes ao P (L36xCateto e Catetox53). Corrales et al., (2007) verificaram que o híbrido simples obtido do cruzamento entre

as duas linhagens eficientes utilizadas no presente estudo (híbrido L3x228-3) mostrou maior capacidade de crescer em meio com baixa disponibilidade de P, comparado à um híbrido simples ineficiente (2841x50.46), mostrando ainda alta capacidade de aquisição de P neste meio.

2.3.2 Análises de variâncias

As análises de variância individuais, mostraram diferenças altamente significativas ($P \leq 0.01$) para os efeitos de tratamento, para todos os caracteres avaliados em todos os ambientes. Estes resultados eram esperados já que, nesta fonte de variação estão incluídas as diferenças entre todos os genótipos, incluindo as linhagens genitoras, os híbridos F_1 's, as gerações F_2 's, RC_1 's e RC_2 's e a variância entre gerações (Tabelas 7 à 11).

Nas análises conjuntas, foram considerados três tipos de análises: a) para os três ambientes sob baixo P (que serão chamados de BP); b) para os dois ambientes sob alto P (que serão chamados de AP); c) considerando-se os cinco ambientes (AP+BP). Antes de efetuar o agrupamento dos experimentos, foi feito o teste de homogeneidade de variâncias para os diversos caracteres, nos grupos de experimentos considerados para as análises conjuntas. Box et al., (1953) citado por Pimentel Gomes (2000), reportam que, se todos os experimentos têm o mesmo número de parcelas, a situação ideal para análise de variância de grupos de experimentos é que o quociente entre o maior e menor quadrado médio do resíduo das análises individuais não seja superior a 3. Entretanto, utilizando o teste de F máximo de Pearson e Harley (1956), Pimentel Gomes (2000), na página 137, reporta que, no caso de grupos de experimentos similares em que todos os tratamentos tenham o mesmo número de repetições, pode-se fazer a análise conjunta para um determinado caráter, se o quociente entre o maior e menor quadrado médio do resíduo nos diferentes ambientes for menor que 7.

Para o grupo de ambientes sob alto P e para o grupo de ambientes sob baixo P, o quociente entre o maior e menor quadrado médio do resíduo foi menor que 7 para todos os caracteres estudados, permitindo a realização das ANOVAs conjuntas. Quando considerados em conjunto os cinco ambientes, a relação entre o maior e o menor quadrado médio do resíduo somente foi superior à 7 para as variáveis quociente de utilização (9,49) e eficiência de uso (15,3). Dados da análise conjunta nos cinco ambientes para estas duas variáveis devem então ser utilizados com reservas.

2.3.2.1 Produção de grãos (PG)

A análise conjunta para os cinco ambientes para produção de grãos (PG) mostrou efeitos altamente significativos entre níveis de P e entre ambientes no nível alto de P e não significativos entre ambientes no nível baixo de P no solo (Tabela 12). Estes resultados indicam que os genótipos foram avaliados sob condições distintas nos ambientes sob alto e baixo P; que dentro dos ambientes sob baixo P as condições de avaliação para PG foram semelhantes, e que para os ambiente controle sob alto P, houve diferença entre os ambientes, com o controle de 2005/2006 produzindo mais que o de 2004/2005.

As médias de PG nos ambientes sob baixo e alto P no solo (Tabelas 13 e 14) para os genitores (linhagens) foram de 1.331 vs 2.297 kg ha^{-1} , com redução de 42,05 % entre níveis de P; para os F_1 estes valores foram de 4.455 vs 8.263 kg ha^{-1} , com redução de 46,08 %; para os F_2 estes valores foram de 2.798 vs 5.305 kg ha^{-1} , com redução de 47,26 %; para os RC_1 estes valores foram de 2.736 vs 5.308 kg ha^{-1} , com redução de 48,45 %; para os RC_2 estes valores foram de 2.142 vs 4.194 kg ha^{-1} , com redução de 48,93 %. Estes resultados indicam que as diferentes gerações foram avaliadas em condições contrastantes e que baixo nível de P no solo reduziu significativamente a produção de grãos em milho, o que está de acordo com o reportado por Novais e Smyth, 1999.

Para o efeito de tratamentos foram detectadas diferenças altamente significativas nas análises de variância conjunta em AP, BP e AP+BP. Na decomposição desse efeito observaram-se diferenças significativas para os genitores, F_1 's, RC_1 's, RC_2 's e entre gerações nos três grupos de ambientes e para a geração F_2 nos ambientes AP e BP, as diferenças entre genótipos dentro desta geração foram não significativas. A significância observada dentro e entre gerações evidencia a existência de diferenças genéticas nas mesmas e que estas ocorreram tanto nos ambientes sob baixo quanto nos ambientes sob alto P. Estes resultados confirmam que as linhagens parentais diferiram para PG e que existe variabilidade genética para este caráter dentro das gerações derivadas dos diferentes cruzamentos entre estas linhagens.

A interação tratamentos x ambientes mostrou significância para AP, BP e AP+BP. Na decomposição desta interação verifica-se que a principal razão para esta significância foram as interações entre F_1 's e ambiente que foram significativas nos três grupos (AP, BP e AP+BP) e a interação entre gerações e ambientes, que foram significativas nos grupos AP e AP+BP. Arnold e

Josephson (1975) reportam que, interação genótipo x ambiente em milho tem sido menor para linhagens, que para outras gerações (F_1 , F_2 e RC).

Nos casos em que foi observada (como ocorreu para os F_1 's), a significância da interação de uma dada geração com ambientes dentro de um grupo de ambientes, indica desempenho diferencial dos genótipos desta geração para PG no grupo de ambientes considerado ou seja, nesta geração, alguns genótipos terão desempenho superior em um dado ambiente, mas não em outro, não mantendo o mesmo comportamento relativo dentro deste grupo de ambientes. Naquelas situações onde não foi observada interação geração x ambiente, conclui-se que os genótipos de uma dada geração que foram superiores em um ambiente mantiveram esse padrão nos demais ambientes.

O fato de genótipos terem capacidade produtiva semelhante sob adequada disponibilidade do nutriente e mostrarem variação em solo com baixo suprimento do mesmo tem sido reportado na literatura como sendo desejável para seleção de genótipos eficientes ao P (BUSO; BLISS, 1988; GOURLEY; ALLAN; RUSSELE, 1993; OLIVEIRA et al., 1999). Sob este aspecto, os híbridos L3x22, L3x36, L36xCateto e 228-3x22 foram classificados como eficientes ao P e os híbridos L3x53, L36xCateto e Catetox53 foram classificados como ineficientes ao P (Figura 1). O híbrido L3x53 foi aquele que mostrou comportamento mais extremo entre os grupos de ambientes com baixo e alto P, estando entre os menos produtivos nos ambientes sob baixo P e entre os mais produtivos no ambiente sob alto P no solo. Esta inversão foi em grande parte responsável pela significância da interação F_1 's x ambientes, observada na ANOVA conjunta para PG nos cinco ambientes (Tabela 12).

2.3.2.2 Intervalo entre florescimento masculino e feminino (ASI)

A análise conjunta para os cinco ambientes para o intervalo entre florescimento masculino e feminino (ASI) mostrou efeitos significativos tanto entre níveis de P, quanto dentro dos três grupos de ambientes (AP, BP e AP+BP). Estes resultados indicam que os genótipos foram avaliados para ASI sob condições distintas nos ambientes sob alto e baixo P; que tanto dentro do grupo de ambientes sob baixo P quanto dentro dos grupo de ambientes sob alto P as condições de avaliação para ASI foram distintas (Tabela 12).

A média geral para ASI obtida nos ambientes sob baixo (BP) e alto P (AP) no solo foi de 4,00 e 1,15 dias respectivamente (Tabelas 13 e 14), indicando grande aumento para este caráter quando se comparam ambientes sob baixo e alto P (247,83 %). Aumentos na variável ASI para estresses de seca e nitrogênio em relação à ambientes sem estresse tem sido reportados na literatura (BOLANOS;EDMEADES, 1993; LAFITTE; EDMEADES, 1995; RIBAUT et al., 1996). O milho é uma espécie protândrica, sendo esta característica acentuada em condições de estresse, principalmente pelo atraso no início do florescimento feminino (WEERATHAWORN; al., 1992). Esta ausência de sincronia entre florescimento masculino e feminino leva a uma escassez de pólen durante a fase de emissão dos estilo-estigmas, como também a um abortamento de grãos logo após a polinização (RIBAUT et al., 1996). Como consequência destes fatos, uma redução média de 8,70% na produção de grãos em milho em ambientes sob estresse de seca tem sido verificada para cada dia de acréscimo no ASI (BOLANOS; EDMEADES, 1993).

As médias de ASI nos ambientes sob baixo e alto P para os genitores (linhagens) foram de 5,09 vs 1,92 dias, com redução de 165,10 % entre níveis de P; para os F_1 estes valores foram de 3,06 vs 0,53, com redução de 477,36 %; para os F_2 estes valores foram de 3,59 vs 0,74 dias, com redução de 385,13 %; para os RC_1 estes valores foram de 3,88 vs 1,04 dias, com redução de 273,08 %; para os RC_2 estes valores foram de 4,34 vs 1,46 dias, com redução de 197,26 %. Estes resultados indicam que as diferentes gerações foram avaliadas para ASI em condições contrastantes e que baixo nível de P no solo aumentou significativamente o intervalo entre florescimento masculino e feminino. Conforme já mencionado, não se encontrou na literatura relatos associando especificamente alterações no ASI, com estresse de P em milho.

Para o efeito de tratamentos para a variável ASI foram detectadas diferenças altamente significativas nas análises de variância conjunta em AP, BP e AP+BP. Na decomposição desse efeito, nos três grupos de ambiente (AP, BP e AP+BP) observaram-se diferenças altamente significativas dentro de todas as gerações e entre gerações nos três grupos de ambientes. A significância observada dentro e entre gerações evidencia a existência de diferenças genéticas nas mesmas para o caráter ASI e que estas ocorreram tanto nos ambientes sob baixo quanto nos ambientes sob alto P. Estes dados confirmam que as linhagens parentais diferiram para ASI nos ambientes sob baixo P e alto P no solo e ainda, que existe variabilidade genética para esta característica dentro das gerações derivadas dos diferentes cruzamentos entre estas linhagens.

Para o caráter ASI, a interação tratamentos x ambientes mostrou significância em BP, AP e AP+BP. No grupo de ambientes BP, esta interação foi significativa para F_1 's x ambientes, RC_1 's x ambientes e RC_2 's x ambientes, não sendo significativa para genitores x ambiente, F_2 's x ambientes e entre gerações x ambientes. Observação importante nestes resultados é que, no caso de avaliação de ASI feita nas linhagens “per se” nos ambientes sob baixo utilizados neste estudo, os dados obtidos em um único ambiente seriam adequados para se classificar estas linhagens quanto à seu ASI, não havendo mudanças na classificação das mesmas entre os ambientes sob baixo P. Esta hipótese, se confirmada numa maior gama de ambientes sob baixo P e utilizando um número maior de linhagens, poderia facilitar a seleção para esta característica em ambientes sob baixo P semelhantes aos utilizados neste estudo. No grupo de ambientes AP esta interação foi significativa somente para RC_1 's x ambientes e RC_2 's x ambientes. No grupo AP+BP a interação entre ASI e ambientes foi significativa para todas as gerações exceto F_2 's x ambientes e não foi também significativa para entre gerações x ambiente.

Duas gerações chave neste estudo, são aquela constituída pelas seis linhagens genitoras e aquela constituída pelos sete híbridos F_1 's, obtidos a partir de diferentes combinações entre estas linhagens. A razão disto é que, um dos objetivos de se estudar a herança de características em culturas alógamas como o milho é verificar quais características poderiam ser avaliadas em linhagens “per se” (ou seja, quais características apresentam predominância de efeitos aditivos) e quais deveriam preferencialmente ser avaliadas em combinações híbridas (aquelas com predominância de efeitos não aditivos). Uma abordagem detalhada da variação observada entre genótipos dentro de cada uma destas duas gerações nos ambientes sob baixo e alto P no solo, é importante para indicar o grau de variabilidade observada dentro de cada uma delas e deverá ser feita para cada um dos caracteres estudados (Tabelas 16 a 19).

Valores observados para o caráter ASI nas seis linhagens genitoras e nos sete híbridos F_1 sob baixo e alto P no solo mostraram que a amplitude de variação para as linhagens sob baixo P (-0,11 a 7,44 dias) foi maior que a observada para os híbridos (1,33 a 4,89 dias) e valores mais baixos de ASI sob baixo P foi observado em híbridos e linhagens classificados como eficientes ao P, comparados aos valores observados para genótipos ineficientes ao P (Figura 2). Sob este aspecto parece que uma avaliação de ASI feita em linhagens “per se”, permitiria melhor discriminação deste caráter, mas a possibilidade ou não de se fazer isto irá depender da análise dos dados referentes ao tipo de herança do mesmo.

O fato do valor médio de ASI sob baixo P ser mínimo na geração F_1 (3,06 dias) e aumentar nas gerações F_2 , RC_1 e RC_2 (3,59 3,88 e 4,34 dias respectivamente) indica que dominância deve atuar no sentido de reduzir a média deste caráter (dominância negativa ou recessividade). Dominância no sentido de reduzir o número de dias até o florescimento tem sido observada em milho (VENCOVSKY; BARRIGA, 1992).

Maiores valores de ASI sob baixo P no solo foram observados nas linhagens Cateto e L53 (7,44 e 7,33 dias), seguidos por L22 e L36 (6,67 e 6,33 dias), por L228-3 (2,89 dias) e a linhagem L3 mostrou protoginia (florescimento feminino antes do florescimento masculino), com ASI de -0,11 dias, mesmo nos ambiente sob baixo P (Tabela 16). Tendência semelhante para ASI foi observada sob alto P, com as linhagens L3 e 228-3 mostrando menores valores e as linhagens L53, L36, L22 e Cateto mostrando mais altos valores de ASI (Figura 2).

Ribault et al., (1996), utilizaram linhagens de milho contrastantes para ASI para mapear QTLs para esta característica tanto em ambientes sob níveis intermediários de estresse de seca quanto em nível drástico de estresse de seca. Nos níveis intermediários, de seca, as médias observadas para ASI nas linhagens genitoras utilizadas naquele trabalho foram de -0,10 e 5,80 dias e no nível drástico de seca estes valores foram de -0,60 e 8,20 dias, indicando que linhagens sensíveis à seca tenderam a ter altos valores de ASI, e mostraram grande aumento deste em condição de estresse. No presente estudo, foi possível verificar que, estresse de P em linhagens de milho, provocou aumentos no ASI semelhantes àqueles observados em condições extremas de seca. Exemplo disto pode ser visto analisando o comportamento da linhagem L53 que mostrou ASI de 2,33 dias na média dos ambientes sob alto P e de 7,33 dias na média dos ambientes sob baixo P no solo (Figura 2). Da mesma forma, no outro extremo, foi possível identificar linhagens como a L3 que ainda mostrou protoginia mesmo sob estresse de P. O caráter ASI, avaliado sob estresse de P, poderia vir a ser um critério de seleção auxiliar para adaptação à ambientes sob baixo P, da mesma forma como vem sendo utilizado na seleção para tolerância à seca.

O valor médio de ASI observado para os sete híbridos F_1 nos ambientes sob baixo P foi de 3,06 dias, sendo que os maiores valores foram observados nos dois híbridos que tem como um dos genitores a linhagem L53 que são L3x53 e Catetox53 (4,89 e 4,33 dias). Deve-se mencionar que as linhagens L53 e Cateto foram aquelas que mostraram maiores valores de ASI nos ambientes sob baixo P (Figura 2). Caso se fizesse seleção para ASI em linhagens “per se” sob baixo P, as linhagens L53 e Cateto teriam sido descartadas, e com elas, teriam sido eliminados os

dois híbridos F_1 que foram menos produtivos sob baixo P (L3x53 e Catetox53). Foi verificada certa coerência entre os valores de ASI observados para os F_1 nos ambientes sob baixo e alto P, exceto para o híbrido L3x53 que mostrou o maior ASI sob baixo P, mas não sob alto P. O alto ASI sob baixo P verificado neste híbrido foi devido a um grande atraso no florescimento feminino. Isto pode indicar que, para genótipos que tenham ciclo semelhante, a avaliação de florescimento feminino feita, por exemplo, em lote de despendoamento obtido em ambientes sob baixo P, poderia vir a ser um bom indicador do ASI destes genótipos.

O fato da interação linhagens x ambientes para ASI não ter sido significativa no grupo de ambientes sob baixo P, conforme discutido anteriormente, pode indicar que uma seleção inicial em um grande número de linhagens para ASI poderia ser conduzida em um único ambiente sob baixo P, o que facilitaria o processo inicial de seleção. Os dados de herança desta característica deverão indicar se, avaliações para ASI poderiam ser conduzidos em linhagens “per se”, ou em cruzamentos.

Uma análise geral dos resultados observados para o caráter ASI indicaram que: a) deficiência de P aumentou de forma pronunciada o intervalo entre florescimento masculino e feminino em milho; b) maiores valores de ASI e maior amplitude de variação para esta característica foram observados em linhagens do que nas outras gerações, principalmente quando avaliadas sob baixo P; c) não foi verificada interação entre linhagens x ambientes no grupo de ambientes sob baixo P. Estes pontos indicariam que, caso o estudo de herança desta característica não aponte no sentido de que efeitos não aditivos seriam de alta importância no controle da mesma, e ainda se for observada correlação significativa entre menores valores de ASI e características ligadas à eficiência e ou resposta ao P, a avaliação de linhagens per se para ASI sob baixo P no solo poderia vir a ser um critério de seleção adicional útil, em programas de seleção para eficiência no uso de P em milho.

2.3.2.3 Teor de P nos grãos (TPG)

A análise conjunta dos cinco ambientes para teor de P nos grãos (TPG) mostrou efeitos altamente significativos tanto entre níveis de P, quanto entre ambientes no nível baixo de P (BP) quanto entre ambientes no nível alto de P (Tabela 12). Estes resultados indicam que os genótipos foram avaliados sob condições distintas para TPG nos ambientes sob alto e baixo P e que, tanto dentro dos ambientes sob baixo P, quanto dentro dos ambientes sob alto P, as condições de avaliação foram distintas para este caráter.

Para o efeito de tratamentos foram detectadas diferenças altamente significativas nas análises de variância conjunta nos três grupos de ambientes (AP, BP e AP+BP). A decomposição do efeito de tratamento mostrou alta significância dentro de todas as gerações e entre gerações para TPG nos três grupos de ambientes. A significância observada dentro e entre gerações para TPG evidencia a existência de diferenças genéticas nas mesmas e que estas ocorreram nos três grupos de ambientes. Estes dados confirmam que as linhagens parentais diferiram para TPG nos ambientes sob baixo e alto P e ainda, que existe variabilidade para esta característica dentro das gerações derivadas dos diferentes cruzamentos entre estas linhagens.

A média geral obtida nos ambientes sob baixo e alto P no solo foi de 2,39 e 2,58 gkg^{-1} , indicando valores de TPG superiores sob alto P (7,36 %), para a média das diversas gerações. Maiores valores médios para TPG em trigo cultivado em ambientes sob alto P comparado àqueles obtidos sob baixo P são reportados por Batten (1986). Wardyn e Russel (2004), avaliaram o teor de P em grãos (%) de 177 progênies S_1 de milho em dois ambientes sob alto P no solo (38 e 71 ppm P). Foi verificado que o teor médio de P nos grãos aumentou com o aumento do P disponível no solo (3,20 e 3,60 gkg^{-1} respectivamente).

Para as linhagens, as médias nos ambientes sob baixo e alto P (Tabelas 13 e 14) foram próximas (3,02 vs 2,84 gkg^{-1}); para os F_1 estes valores foram de 2,03 vs 2,31 gkg^{-1} , com redução de 12,12 % sob baixo P no solo; para os F_2 estes valores foram de 2,36 vs 2,64 gkg^{-1} , com redução de 10,60 %; para os RC_1 estes valores foram de 2,29 vs 2,50 gkg^{-1} , com redução de 9,17 %; para os RC_2 estes valores foram de 2,44 vs 2,65 gkg^{-1} , com redução de 7,92 %. Estes resultados indicam que as diferentes gerações foram avaliadas para TPG em condições contrastantes, que baixo nível de P no solo reduziu significativamente o teor de P nos grãos em milho nas diversas gerações, sendo este efeito menos pronunciado para linhagens. Foi ainda

verificado que, dentre as gerações avaliadas, a máxima expressão de teor de P nos grãos ocorreu nas linhagens. Concentração mais alta de nutrientes em linhagens comparadas à híbridos F_1 em culturas como o milho que mostram alta heterose tem sido verificada na literatura e tem sido atribuída aos efeitos de diluição devido ao aumento da produção que ocorre em híbridos, quando comparados às linhagens (GORSLINE; THOMAS; BAKER, 1964).

O teor médio de P nos grãos para as linhagens “per se” nos ambientes sob baixo P foi cerca de 1,49 vezes superior ao observado nos híbridos F_1 (3,02 e 2,03 gkg^{-1} respectivamente) e 1,23 vezes superior nos ambientes sob alto P (2,84 e 2,31 gkg^{-1} respectivamente). O aumento na concentração de P nos grãos observado da geração F_1 para as gerações F_2 e retrocruzamentos indica que a dominância deve atuar no sentido de diminuir a média deste caráter (dominância negativa), da mesma forma como foi observado para o intervalo entre florescimento masculino e feminino (ASI).

A interação tratamentos x ambientes mostrou significância nos três grupos de ambientes. Na decomposição desta interação verifica-se que nos três ambientes sob baixo P foram significativas as interações, F_2 's x ambientes, RC_1 's x ambientes e RC_2 's x ambientes e entre gerações x ambientes. Não foram significativas as interações genitores x ambientes e F_1 's x ambientes. Nos ambientes sob alto P foram significativas as interações RC_1 's x ambientes e RC_2 's x ambientes. Não foram significativas as interações genitores x ambientes, F_1 's x ambientes, F_2 's x ambientes e entre gerações x ambientes. Nos cinco ambientes analisados em conjunto, foram significativas as interações F_2 's x ambientes, RC_1 's x ambientes e RC_2 's x ambientes e entre gerações x ambientes. A significância das interações RC_1 's x ambientes e RC_2 's x ambientes pode estar associada ao fato de que, dentro de cada um destes componentes, estão incluídos os retrocruzamentos tanto para o genitor superior, quanto para o genitor inferior. As interações genitores x ambientes e F_1 's x ambientes para TPG foram então não significativas nos três grupos de ambientes..

Interação genótipo x ambiente não significativa para teor de P nos grãos em milho é reportada por Feil et al., (2005). Estes autores avaliaram quatro genótipos (dois híbridos e duas variedades), sob dois regimes hídricos (estresse de seca e irrigado) e três doses de nitrogênio, por três anos consecutivos. Foi verificada diferença significativa para TPG entre os genótipos (amplitude de 3,00 à 3,70 gkg^{-1}), mas a interação TPG x níveis de irrigação e TPG x doses de N foi não significativa nos três anos. Os autores concluíram que os níveis de água e N tiveram

efeito reduzido na classificação dos cultivares para TPG, indicando que diferenças neste caráter entre genótipos parecem ser bastante estáveis entre ambientes, o que deve facilitar programas de seleção deste caráter em milho. Os autores reportam ainda que, interação TPG x ambientes tem sido observada em pequenos cereais (trigo, aveia e centeio), ao contrário do que tem sido verificado em milho. Os dados obtidos no presente estudo concordam com àqueles obtidos por Feil et al., (2005), já que, para as linhagens e para os híbridos F_1 não foi observada interação genótipo x ambiente em nenhum dos três grupos de ambientes. Esta ausência de interação sugere que não devem ter ocorrido mudanças na classificação das linhagens e dos F_1 entre ambientes. Neste caso, seria esperada uma correlação média/alta entre valores observados nestas gerações entre ambientes sob baixo e alto P. As correlações para TPG entre níveis de P foram obtidas entre os pares de ambientes com alto e baixo P em 2004/2005 e em 2005/2006. Estes valores foram de $r=0,90^{**}$ para as linhagens e $r=0,77^{**}$ para os híbridos F_1 , indicando que, avaliação de TPG, principalmente em linhagens, ou mesmo em híbridos, se for feita em ambiente com alto P, poderia ser um bom indicador dos valores de TPG esperados sob baixo P. Esta observação é importante no estabelecimento de uma estratégia de seleção para programas de melhoramento que utilizem o caráter TPG em milho, sejam estes estudos voltados para eficiência no uso de P, ou relacionados à melhoria da qualidade nutricional do grão, onde o objetivo seria reduzir o teor de fitato nos mesmos.

O teor de fósforo nos grãos das linhagens classificadas como eficientes ao P tenderam a ser menores que a das linhagens classificadas como ineficientes, tanto sob baixo P quanto sob alto P no solo. Já para os híbridos F_1 este fato foi verificado nos ambientes sob alto P, mas não nos ambientes sob baixo P. Desta forma, nos ambientes sob alto P no solo, o caráter TPG permitiu separar os grupos de híbridos eficientes e ineficientes ao P, o que não ocorreu nos ambientes sob baixo P no solo (Figura 3). Para teor de P nos grãos (TPG) nas linhagens, nos ambientes sob baixo P, o mais alto valor foi para Cateto ($3,84 \text{ gkg}^{-1}$), seguido das linhagens L22, L53 e L36 ($3,23$, $3,01$ e $2,84 \text{ gkg}^{-1}$). Valores mais baixos foram observados nas linhagens L3 e L228-3 ($2,61$ e $2,57 \text{ gkg}^{-1}$). Comportamento semelhante entre as linhagens para TPG foi observado nos ambientes sob baixo e alto P, com altos valores sendo observados na linhagem Cateto e menores valores nas linhagens L 228-3, L3 e L36 (esta última, principalmente nos ambientes sob alto P).

Wardyn e Russel (2004), em solo com alta disponibilidade de P, verificaram teor de P nos grãos da linhagem de milho Mo17 utilizada como testemunha, de $2,70 \text{ gkg}^{-1}$, valor próximo ao

verificado sob alto P para a média das seis linhagens utilizadas neste estudo ($2,84 \text{ gkg}^{-1}$). Gabelman e Gerloff (1983), verificaram que a concentração de P no tecido de duas linhagens de feijão eficientes ao P (0,13 e 0,15%) foi consistentemente menor que aquela observada em uma linhagem ineficiente ao P (0,26%). Os autores concluem que a capacidade do tecido de funcionar normalmente sob baixa concentração de P no mesmo, deve ser componente importante no mecanismo relacionado à eficiência de utilização de P nesta cultura.

Mais altos valores de teor de P nos grãos nos híbridos F_1 nos ambientes sob baixo P (Figura 3), foram observados nos cruzamentos Catetox53, L36xCateto, L228-3x22 e L3x36 ($2,33$ $2,10$ $2,10$ e $2,08 \text{ gkg}^{-1}$). Valores mais baixos foram observados nos híbridos L3x53, L3x22 e L3xCateto ($1,84$ $1,86$ e $1,92 \text{ gkg}^{-1}$). Nos ambientes sob alto P, o mais alto valor de TPG foi observado no cruzamento Catetox53 ($2,90 \text{ gkg}^{-1}$), seguido dos híbridos L3x53, L36xCateto, L228-3x22 e L3xCateto ($2,45$ $2,43$ $2,18$ e $2,15 \text{ gkg}^{-1}$). Valores mais baixos foram observados nos híbridos L3x36 e L3x22 ($2,05$ e $2,02 \text{ gkg}^{-1}$). Verifica-se aí que o caráter TPG permitiu discriminar híbridos eficientes e ineficientes ao P quando avaliado nos ambientes sob alto P no solo, mas não quando avaliado nos ambientes sob baixo P no solo (Figura 3).

Prado, Fernandes e Roque (2001), estudaram o teor de P nos grãos de um híbrido de milho, com aplicação de doses de P no solo de 0 e $135 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ha}^{-1}$ e diferentes modos de aplicação. Com a aplicação do P à lanço, os valores de TPG para estas doses de P no solo foram de $2,10$ e $2,40 \text{ gkg}^{-1}$. Para aplicação no sulco de plantio os valores de TPG foram de $2,10$ e $2,70 \text{ gkg}^{-1}$ respectivamente, valores estes próximos à amplitude de variação observada para os sete híbridos nos dois níveis de P neste estudo, que foi de $1,84$ a $2,90 \text{ gkg}^{-1}$. Batten, Khan e Cullis (1984) reportam teor de P nos grãos de genótipos de trigo na média de 3 anos, sob dose baixa e alta de P de 0,19 e 0,23% (equivalendo a $1,90$ e $2,30 \text{ g}$ de P por kg de grãos), indicando aumento de 1,21 vezes para TPG entre níveis de P. Para os sete híbridos F_1 's avaliados neste trabalho, os valores médios de TPG obtidos nos ambientes sob baixo e alto P foram de $2,03$ e $2,31 \text{ gkg}^{-1}$ respectivamente, indicando aumento de TPG de 1,14 vezes do nível baixo para o nível alto de P no solo.

2.3.2.4 Quantidade total de P na parte aérea (FTOT)

A análise conjunta para os cinco ambientes para quantidade total de P na parte aérea incluindo grãos, sabugos e palha (FTOT) mostrou efeitos altamente significativos entre níveis de P e entre ambientes no nível baixo e no nível alto de P (Tabela 12). Estes resultados indicam que os genótipos foram avaliados para FTOT sob condições distintas nos ambientes sob alto e baixo P no solo e que, houve diferença para este caráter entre os ambientes dentro de cada um dos grupos de ambientes.

Para o efeito de tratamentos foram detectadas diferenças altamente significativas nas análises de variância conjunta em AP, BP e AP+BP. Na decomposição desse efeito nos ambientes sob baixo P (BP) foi verificado diferenças significativas para F_1 's, RC_1 's e entre gerações, e não significativas para genitores, F_2 's e RC_2 's (Tabela 13). Nos ambientes sob alto P esta decomposição mostrou diferenças significativas para F_1 's, e entre gerações, e não significativas para genitores, F_2 's, RC_1 's e RC_2 's (Tabela 14). Quando se analisaram os cinco ambientes em conjunto (AP+BP) a decomposição da soma de quadrados de tratamentos para FTOT mostrou significância para RC_1 's, RC_2 's e entre gerações e não indicou diferença significativa entre genótipos dentro das gerações genitores, F_1 's e F_2 's. Estes dados mostram que as linhagens parentais não diferiram entre si para FTOT em nenhum dos três grupos de ambientes, mas que, apesar deste fato, existe diferença entre genótipos dentro de alguns tipos de gerações para o caráter FTOT, tanto nos ambientes sob baixo P quanto nos ambientes sob alto P no solo.

A média de FTOT dos sete híbridos F_1 nos ambientes sob baixo P no solo foi de 10,12 kg de Pha^{-1} , sendo que os híbridos L228-3x22, L3xL36 e L3xCateto mostraram valores mais altos (12,37 11,90 e 11,15 $kgkg^{-1}$), os híbridos L3x22 e L36xCateto mostraram valores intermediários (10,01 e 9,81 $kgkg^{-1}$) e os híbridos Catetox53 e L3x53 mostraram valores mais baixos (8,02 e 7,56 $kgkg^{-1}$). Nos ambientes sob alto P a média dos sete híbridos F_1 para FTOT foi de 22,44 $kg ha^{-1}$ de P (Tabela 19). Extração de P em híbridos de milho cultivado em ambiente semelhante ao utilizado neste estudo (Latossolo Vermelho Escuro, no estado de Goiás, corrigido para P) foi reportada por Fageria, Baligar e Li (2006). Os autores verificaram produção de grãos de 8221 $kg ha^{-1}$ e de palha de 11006 $kg ha^{-1}$, com uma extração de P nos grãos de 16,70 $kg ha^{-1}$ e na palha

de $4,50 \text{ kg ha}^{-1}$ de P, totalizando $21,20 \text{ kg ha}^{-1}$ de P total na parte aérea, valor este, muito próximo ao verificado no presente estudo ($22,44 \text{ kg ha}^{-1}$ de P).

Fox (1978) avaliou 17 híbridos e seis variedades de milho em solo com baixo (5 ppm de P) e alto P (aplicados 448 kg Pha^{-1}). O autor reporta produções médias de parte aérea (grão e palha) de $10.400 \text{ kg ha}^{-1}$ no nível baixo de P e $15.600 \text{ kg ha}^{-1}$ no nível alto de P. A variação de quantidade de P total na parte aérea observada entre os genótipos foi de $7,80$ a $12,30 \text{ kg Pha}^{-1}$ no nível baixo de P e $25,80$ a $40,50 \text{ kg Pha}^{-1}$ no nível alto de P. Neste trabalho, para os sete híbridos F_1 foram obtidas produções médias de parte aérea (grãos e palha) de 9.042 kg ha^{-1} sob baixo P e de $19.034 \text{ kg ha}^{-1}$ sob alto P. As quantidades de P total na parte aérea para os sete F_1 's variaram de $7,56$ a $12,37 \text{ kg Pha}^{-1}$ nos ambientes sob baixo P e $17,75$ a $26,96 \text{ kg Pha}^{-1}$ nos ambientes sob alto P. Os valores obtidos para quantidade de P total na parte aérea para os sete F_1 's foram muito próximos aos reportados por Fox (1978) no ambiente sob baixo P e menores que os reportados pelo mesmo autor no ambiente sob alto P. Deve-se mencionar entretanto que, naquele estudo, foi aplicada ao solo dose de 448 kg Pha^{-1} no nível alto de P, enquanto no presente estudo, a média de P disponível nos ambientes sob alto P foi mais de cinco vezes menor ($82,2 \text{ kg Pha}^{-1}$), o que explicaria as discrepâncias observadas.

A interação tratamentos x ambientes mostrou significância apenas na análise conjunta dos cinco ambientes (AP+BP) e foi não significativa no grupo de ambientes sob baixo P (BP) e no grupo de ambientes sob alto P (AP). Na decomposição desta interação no grupo AP+BP, verifica-se que a principal razão para esta significância foi a interação entre F_1 's x ambientes e entre gerações x ambientes. Baker, Thomas e Gorsline (1964), reportam que, em geral, uma interação híbrido x local significativa para acumulação de um dado nutriente, é resultado de acumulação mais alta de nutrientes em alguns híbridos num dado local, do que o observado para estes mesmos híbridos em outros locais

2.3.2.5 Eficiência de absorção de P (EFABS)

A análise conjunta para os cinco ambientes para o caráter eficiência de absorção de P (que corresponde à quantidade de P na planta dividida pela quantidade de P disponível no solo) mostrou efeitos altamente significativos entre níveis de P no solo e entre ambientes no nível alto de P no solo e não houve diferença entre os ambientes dentro do nível baixo de P (Tabela 12).

Estes resultados indicam que os genótipos foram avaliados para EFABS sob condições distintas nos ambientes sob alto e baixo P; que houve diferença entre os ambientes dentro do grupo de ambientes sob alto P (AP) e não houve diferença entre os ambientes dentro do grupo de ambientes sob baixo P (BP).

Para o efeito de tratamentos foram detectadas diferenças altamente significativas nas análises de variância conjunta em AP, BP e AP+BP (Tabelas 12, 13 e 14). Na decomposição desse efeito nos ambientes sob baixo P (BP) observaram-se diferenças significativas para os genitores, F_1 's, RC_1 's, e entre gerações, e não significativas para os F_2 's e RC_2 's. Nos ambientes sob alto P esta decomposição indicou diferenças significativas somente para F_1 's, e entre gerações, e não significativas para genitores, F_2 's, RC_1 's e RC_2 's. Quando se analisaram os cinco ambientes em conjunto (AP+BP) a decomposição da soma de quadrados de tratamentos para EFABS mostrou significância apenas para RC_1 's, RC_2 's e entre gerações e não indicou diferença significativa entre genótipos dentro de genitores, F_1 's e F_2 's. A significância observada dentro e entre gerações evidencia, nos casos onde ocorre, a existência de diferenças genéticas nas mesmas e ainda, que estas ocorreram tanto nos ambientes sob baixo quanto nos ambientes sob alto P. Estes dados confirmam que, nos ambientes sob baixo P, as linhagens diferiram para EFABS, não diferindo para esta característica nos ambientes sob alto P, mostrando que existe variabilidade para esta característica dentro das gerações derivadas dos diferentes cruzamentos entre estas linhagens, principalmente sob baixo P. O fato de genótipos cultivados em ambiente sem limitação nutricional mostrarem comportamento semelhante para uma dada característica relacionada à estresse mineral mas mostrarem comportamento diferente para a mesma quando cultivados em ambientes com baixa disponibilidade deste nutriente, tem sido reportado na literatura como sendo desejável para seleção de genótipos para esta característica (BUSO; BLISS, 1988; GOURLEY; ALLAN; RUSSELE, 1993; OLIVEIRA et al., 1999).

A média geral para EFABS verificada nos ambientes sob baixo (BP) e alto P no solo (AP) foi de 33,82 e 19,57 $\text{kgkg}^{-1} \times 10^2$ indicando que nos ambientes sob baixo P os genótipos foram capazes de absorver em média, 33,82 % do P disponível no solo e nos ambientes sob alto P este valor foi de apenas 19,57 % (Tabelas 13 e 14). Estes dados indicam um aumento médio de 72,81 % para a eficiência de absorção de P nos ambientes sob baixo P quando comparados aos ambientes sob alto P. As médias de EFABS nos ambientes sob baixo e alto P para os genitores(linhagens) foram de 24,79 vs 12,56 $\text{kgkg}^{-1} \times 10^2$, com aumento médio de 97,37 % entre

níveis de P; para os F₁ estes valores foram de 45,05 vs 26,93, com aumento médio de 67,28 %; para os F₂ estes valores foram de 36,71 vs 21,32, com aumento médio de 72,18 %; para os RC₁ estes valores foram de 33,71 vs 20,07, com aumento médio de 67,96 %; para os RC₂ estes valores foram de 29,33 vs 17,36 kgkg⁻¹x10², com aumento médio de 68,95 %. Estes resultados indicam que as diferentes gerações foram avaliadas em condições contrastantes para EFABS e que, baixo nível de P no solo aumentou significativamente a eficiência de absorção de P em milho. Este efeito foi mais pronunciado nas linhagens do que nas demais gerações.

Tanto para o grupo de linhagens quanto para o grupo de híbridos, genótipos classificados como eficientes dentro de cada uma destas gerações mostraram maior eficiência de absorção de P nos ambientes sob baixo P no solo do que genótipos ineficientes, o que não ocorreu nos ambientes sob alto P (Figura 4). Exemplo extremo disto foi observado nos híbridos onde, nos ambientes sob alto P, os híbridos classificados como ineficientes ao P mostraram mais alta eficiência de absorção que os híbridos eficientes. No caso das linhagens, EFABS sob baixo P no solo permitiu discriminar entre linhagens eficientes e ineficientes, o que não ocorreu nos ambientes sob alto P no solo. Este fato indica que programas de seleção para eficiência ao P devem avaliar o caráter eficiência de absorção em ambientes com baixo suprimento deste nutriente.

Nos ambientes sob baixo P no solo, as linhagens L3 e L 228-3 mostraram eficiência de absorção semelhante (32,80 e 31,93 kgkg⁻¹x10²) e as demais linhagens mostraram menor EFABS e não diferiram entre si (Figura 4), sendo que os valores observados para as linhagens L22, Cateto, L36 e L53 foram respectivamente 23,83 21,93 21,73 e 16,50 kgkg⁻¹x10². Não foram detectadas diferenças significativas para EFABS entre linhagens nos ambientes sob alto P (Tabela 16).

A morfologia do sistema radicular das linhagens L3 e L22 foi estudada por Brasil (2003). O autor avaliou a morfologia do sistema radicular de 3 linhagens e 5 híbridos de milho crescidos em solução nutritiva com alto e baixo P. As linhagens identificadas naquele trabalho como 1 e 3, correspondem às linhagens L22 e L3 utilizadas no presente trabalho. A quantidade de P (mgplanta⁻¹) absorvida pelas plântulas aos 14 dias, nos dois níveis de P na solução (2,3 µm e 129 µm de P) foi significativamente superior para a linhagem L3 quando comparada à linhagem L22. A quantidade de P absorvida pelas linhagens L3 e L22 foi de 0,39 e 0,31 mg de P sob baixo P e 0,79 e 0,45 mg de P sob alto P. Já para quantidade de P nas raízes, não foi observada diferença

significativa entre as linhagens estudadas. O autor relata que, no nível baixo de P na solução, a linhagem L3 mostrou maior quantidade de P total na planta (parte aérea e raiz = 0,51 mg/planta), do que todos os genótipos avaliados, incluindo os híbridos, indicando a alta capacidade da mesma de absorver P. Os valores observados para a relação matéria seca de raiz e parte aérea foram de 0,59 e 0,46 para as linhagens L3 e L22 respectivamente, indicando que a L3 apresentou maior sistema radicular em relação ao tamanho da parte aérea, do que a L22. O volume do sistema radicular (cm^3 de raiz) da L3 foi significativamente superior ao observado para a L22 (2,41 e 1,08 respectivamente), não sendo observadas diferenças significativas para área, comprimento e diâmetro de raízes. A linhagem L3 apresentou maior comprimento de raiz seminal e maior número de raízes laterais na análise conjunta sob baixo e alto P, mostrando ainda maior comprimento de raiz lateral na solução sob baixo P. A distribuição do sistema radicular em função da profundidade (definido como perfil radicular), foi obtido via análise de intercepção a partir da região do coleto. Foi verificado que o sistema radicular da L3 além de possuir mais raízes que a L22 até 20 cm de profundidade, conseguia crescer raízes até 35 cm de profundidade, enquanto a L22 não passou dos 20 cm. A capacidade da L3 de absorver mais P está então relacionada a uma maior relação raiz parte aérea, maior volume do sistema radicular e melhor distribuição deste no perfil do solo. Entender a genética destas características e incluí-las em um programa de seleção, pode ser oportunidade ímpar de associar fisiologia vegetal e seleção para adaptação à estresse mineral.

A eficiência de absorção (EFABS) para os sete híbridos F_1 nos ambientes sob baixo P em ordem decrescente foi: L228-3x22, L3x36, L3xCateto, L3x22, L36xCateto, Catetox53 e L3x53 (55,27 52,43 48,50 45,90 43,87 36,70 e 32,73 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$, respectivamente). As mais altas eficiências de absorção nos ambientes sob alto P foram verificadas nos híbridos L3x53, Catetox53 e L36xCateto, seguidos dos híbridos L3xL22 e L3x36. Mais baixas eficiências de absorção foram verificadas nos híbridos L228-3x22 e L3xCateto. Tanto para os híbridos, quanto para as linhagens, a EFABS sob baixo P no solo permitiu melhor discriminação entre genótipos eficientes e ineficientes ao P do que a EFABS avaliada nos ambientes sob alto P no solo (Figura 4).

A interação tratamentos x ambientes para EFABS foi não significativa nos grupos de ambiente AP e BP mostrando significância apenas na análise conjunta dos cinco ambientes (AP+BP). A decomposição desta interação no grupo (AP+BP) mostrou significância apenas para

as interações F_1 's x ambientes e RC_1 's x ambientes. A não existência de efeito significativo para a interação tratamento x ambiente para a variável EFABS nos grupos de ambientes sob baixo e alto P indica que, dentro de cada um destes grupos, a eficiência de absorção dos genótipos seguiu uma mesma sequência, com genótipos superiores em um dado ambiente mantendo este comportamento nos outros ambientes e genótipos inferiores em um dado ambiente também sendo inferiores para EFABS nos outros ambientes que compõe o grupo.

Comportamento bastante distinto quanto à EFABS para os F_1 foi verificado nos ambientes sob baixo e alto P, sendo que os três híbridos que mostraram maior EFABS nos ambientes sob baixo P (L228-3x22, L3xL36 e L3xCateto) foram aqueles que mostraram menor EFABS nos ambientes sob alto P. Da mesma forma, os dois híbridos que mostraram maior EFABS nos ambientes sob alto P (L3x53 e Catetox53) foram aqueles que mostraram menor EFABS nos ambientes sob baixo P (Figura 4). Este fato confirma o verificado na ANOVA conjunta para os cinco ambientes, onde a interação F_1 x ambientes foi altamente significativa (Tabela 12), e indicaria a dificuldade de selecionar híbridos com alta EFABS simultaneamente nos ambientes sob baixo e alto P no solo.

2.3.2.6 Eficiência de utilização de P (EFUTIL)

Para a eficiência de utilização (quantidade de matéria seca de grãos produzida por unidade de P na parte aérea da planta), a análise conjunta para os cinco ambientes mostrou efeitos significativos entre níveis de P e entre ambientes no nível baixo de P e não houve diferença entre os ambientes dentro do nível alto de P (Tabela 12). Estes resultados indicam que os genótipos foram avaliados para EFUTIL sob condições distintas nos ambientes sob alto e baixo P, que houve diferença entre os ambientes dentro do grupo de ambientes sob baixo P (BP) e não houve diferença entre os ambientes dentro do grupo de ambientes sob alto P (AP).

Para o efeito de tratamentos foram detectadas diferenças altamente significativas nas análises de variância conjunta em AP, BP e AP+BP. Na decomposição desse efeito nos ambientes sob baixo P (BP) e AP+BP, observaram-se diferenças significativas para todas as gerações e entre gerações. Nos ambientes sob alto P esta decomposição indicou diferenças significativas para todas as gerações e entre gerações, exceto para a geração F_2 .

A média geral para EFUTIL obtida nos ambientes sob baixo (BP) e alto P (AP) no solo foi de 297,94 e 272,71 kgkg^{-1} indicando que nos ambientes sob baixo P os genótipos foram capazes de produzir em média 297,94 kg de grãos por kg de P existente na parte aérea dos mesmos e nos ambientes sob alto P foi produzido em média 272,71 kg de grãos por kg de P existente na parte aérea dos genótipos (Tabelas 13 e 14). Estes dados mostram que, ao contrário do observado para eficiência de absorção (que foi bem maior nos ambientes sob baixo P que nos ambientes sob alto P), a eficiência de utilização média dos genótipos não mudou muito entre níveis de P, aumentando apenas cerca de 9,25 % nos ambientes sob baixo P, em relação aos ambientes sob alto P. As médias de EFUTIL nos ambientes sob baixo e alto P para os genitores foram de 152,81 vs 198,51 kgkg^{-1} , com redução média de 23,02 % do nível baixo para o nível alto de P; para os F_1 estes valores foram de 392,11 vs 341,55 kgkg^{-1} , com aumento médio de 14,80 % nos ambientes sob baixo P em comparação à observada nos ambientes sob alto P; para os F_2 estes valores foram de 313,82 vs 271,87 kgkg^{-1} , com aumento médio de 15,43 %; para os RC_1 estes valores foram de 317,19 vs 287,61 kgkg^{-1} , com aumento médio de 10,28 %; para os RC_2 estes valores foram de 284,92 vs 256,73 kgkg^{-1} , com aumento médio de 10,98 %. Estes resultados indicam que as diferentes gerações foram avaliadas em condições contrastantes e que baixo nível de P no solo aumentou a eficiência de utilização de P nas diferentes gerações, exceto para as linhagens, onde foi observado o oposto ou seja a eficiência de utilização de P foi maior nos ambientes sob alto P, o que pode ser devido à maior sensibilidade a estresse em geral observada em linhagens, quando comparadas a outras gerações, afetando sua capacidade de converter o P na planta em grãos.

As linhagens classificadas como eficientes ao P mostraram geralmente, maior eficiência de utilização deste nutriente tanto nos ambientes sob baixo P quanto nos ambientes sob alto P (Figura 5). Já para os híbridos F_1 , foi verificada situação oposta a que ocorreu para o caráter EFABS ou seja, híbridos classificados como eficientes ao P mostraram maior EFUTIL que híbridos classificados como ineficientes nos ambientes sob alto P, mas isto não ocorreu nos ambientes sob baixo P no solo. Este fato pode ser uma primeira indicação de que EFUTIL poderia ser preferencialmente avaliada em ambientes sob alto P no solo.

Para eficiência de utilização (EFUTIL) nos ambientes sob baixo P, a linhagem L3 foi superior às demais (267,40 kgkg^{-1}), seguida da linhagem L228-3 (221,60 kgkg^{-1}). As linhagens L53 e L36 foram semelhantes (149,50 e 118,57 kgkg^{-1}) e as linhagens Cateto e L22 mostraram

menor eficiência de utilização (91,61 e 68,23 kgkg^{-1}). Nos ambientes sob alto P, as mesmas tendências quanto a classificação das linhagens foram observadas. Nos dois grupos de ambientes pôde-se então dividir as linhagens quanto à sua EFUTIL em três classes: as mais eficientes seriam as L3 e L228-3 (média de 249,48 kgkg^{-1} nos dois grupos de ambientes), as intermediárias seriam L36 e L53 (média de 174,00 kgkg^{-1}) e as inferiores seriam L22 e Cateto (média de 103,52 kgkg^{-1}). Deve-se ressaltar que a linhagem L53, apesar de sua muito baixa EFABS sob estresse de P, ainda consegue manter níveis médios de EFUTIL nestes ambientes (Figura 5). Variação de até 100% para EFUTIL de P (medida como mg de matéria seca por mg de P no tecido) foi observada em linhagens de feijão (GABELMAN; GERLOFF, 1983).

A eficiência de utilização de P é função da capacidade da planta de redistribuir o P da parte aérea para os grãos (que é dada pelo índice de colheita de P) e da capacidade da planta de produzir grãos por unidade de P nos grãos (QUTIL). Os altos valores de eficiência de utilização observados nos ambientes sob baixo P para as linhagens L3 e 288-3 (Figura 6-A) foram devidos tanto à altos valores de índice de colheita de P-ICP (67,66 e 55,60 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$) quanto à altos quocientes de utilização-QUTIL (445,00 e 454,37 kgkg^{-1}). A linhagem L53 mostrou valores médios de eficiência de utilização de P (149,50 kgkg^{-1}) em função de associar valores médios à altos de ICP (43,83 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$) com valores médios de QUTIL (392,76 kgkg^{-1}). A L36 também mostrou valor médio de eficiência de utilização de P (118,57 kgkg^{-1}), mas isto se deveu ao fato da mesma associar um baixo ICP (31,80 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$) com um alto QUTIL (414,97 kgkg^{-1}). As linhagens Cateto e L22 mostraram baixa eficiência de utilização de P devido a baixos valores tanto de ICP quanto de QUTIL.

Nos ambientes sob alto P, pode-se verificar que o mais alto valor de eficiência de utilização (EFUTIL) observado para a linhagem L228-3 (272,21 kgkg^{-1}) foi devido à combinação do mais alto ICP (64,10 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$) com o mais alto QUTIL de P (503,54 kgkg^{-1}). Já o alto valor de EFUTIL verificado para a L3 sob alto P (236,73 kgkg^{-1}) foi em função de um alto ICP (62,05 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$), mas de um médio QUTIL de P (441,90 kgkg^{-1}). Estes resultados indicam que uma característica que pode ser melhorada em genótipos relacionados à L3, cultivados em ambientes com alto P, seria seu coeficiente de utilização de P (Figura 6-B). Os valores semelhantes de EFUTIL observados para as linhagens L36 e L53 sob alto P (216,45 e 211,47 kgkg^{-1}) se deveram a razões distintas. A L36 associou um ICP médio (52,65 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$) a um alto valor de QUTIL (482,76 kgkg^{-1}). Já a L53 associou um alto ICP (62,75 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$) a um valor médio de QUTIL

(390,35 kgkg⁻¹). Valores semelhantes de eficiência de utilização de P podem então ser obtidos via diferentes mecanismos relacionados ao índice de colheita de P (ICP) ou ao coeficiente de utilização (QUTIL). Buscar genótipos que maximizem estes dois componentes pode ser chave na busca por altos valores de eficiência de utilização interna de P.

A média de EFUTIL dos sete F₁'s nos ambientes sob baixo P foi de 392,11 kg de grão por kg de P na parte aérea (lembrando que a EFUTIL foi obtida com base na matéria seca de grãos). Fageria, Baligar e Li (2006) reportam dados médios de produção de grãos em híbrido de milho cultivado em latossolo sob cerrado com níveis adequados de P, de 8221 kg ha⁻¹, com uma extração total de P na parte aérea de 21,20 kg ha⁻¹, o que equivale à uma EFUTIL de 388 kg de grãos por kg de P na parte aérea. Estes dados são muito próximos aos obtidos na média dos sete híbridos F₁ utilizados neste trabalho onde, nos solos sob alto P, foi obtida uma média de produção de grãos de 8263 kg ha⁻¹, com uma quantidade média de P total na parte aérea de 22,44 kg ha⁻¹, o que equivale a uma EFUTIL de 368 kg de grãos (corrigidos para 15% de umidade) por kg de P na parte aérea.

A eficiência de utilização de P avaliada nos ambientes sob alto P, permitiu separar os híbridos eficientes e ineficientes ao P, o que não foi possível nos ambientes sob baixo P no solo (Figura 5). Comportamento oposto havia sido identificado para o caráter EFABS de P (Figura 4). Estes dados sugerem que, eficiência de absorção deveria ser preferencialmente avaliada em ambientes sob baixo P no solo enquanto que eficiência de utilização interna de P (EFUTIL) deveria ser preferencialmente avaliada em ambientes sob alto P no solo.

Da mesma forma como observado anteriormente para eficiência de absorção (EFABS), para eficiência de utilização de P (EFUTIL), a interação tratamentos x ambientes foi não significativa nos grupos de ambiente AP e BP mostrando significância apenas na análise conjunta dos cinco ambientes (AP+BP). A decomposição desta interação no grupo (AP+BP) mostrou significância apenas para a interação entre gerações x ambientes. Estes resultados indicam que, dentro de cada um dos três grupos de ambientes, a eficiência de utilização dos genótipos segue a mesma seqüência, com genótipos superiores em um dado ambiente mantendo este comportamento nos outros ambientes e genótipos inferiores em um dado ambiente sendo também inferiores quanto a sua EFUTIL nos outros ambientes que compõe o grupo.

2.3.2.7 Eficiência de uso de P (EFUSO)

A análise conjunta para os cinco ambientes para eficiência de uso de P (quantidade de matéria seca de grãos produzida, por unidade de P disponível no solo) mostrou efeitos significativos entre níveis de P e entre ambientes no nível baixo de P e não houve diferença entre os ambientes dentro do nível alto de P (Tabela 12). Estes resultados indicam que os genótipos foram avaliados para EFUSO sob condições distintas nos ambientes sob alto e baixo P, e que houve diferença entre os ambientes dentro do grupo de ambientes sob baixo P (BP) e não houve diferença entre os ambientes dentro do grupo de ambientes sob alto P (AP).

Para o efeito de tratamentos foram detectadas diferenças altamente significativas nas análises de variância conjunta em AP, BP e AP+BP. Na decomposição desse efeito nos ambientes sob baixo P (BP) e nos ambientes sob alto P (AP) observaram-se diferenças altamente significativa para todas as gerações e entre gerações, exceto para os F_2 's. Para os cinco ambientes (AP+BP) esta decomposição indicou diferenças significativas para todas as gerações e entre gerações. Estes dados confirmam que, tanto nos ambientes sob baixo P quanto nos ambientes sob alto P, as linhagens parentais diferiram para EFUSO e que existe variabilidade genética para esta característica dentro das gerações derivadas dos diferentes cruzamentos entre estas linhagens.

As médias de EFUSO nos ambientes sob baixo e alto P para as linhagens foram de 53,66 vs 24,25 kgkg^{-1} , com aumento médio de 121,27 % entre níveis de P; para os F_1 estes valores foram de 181,53 vs 88,47 kgkg^{-1} , com aumento médio de 105,19 %; para os F_2 estes valores foram de 113,26 vs 56,37 kgkg^{-1} , com aumento médio de 100,92 %; para os RC_1 estes valores foram de 110,11 vs 56,48 kgkg^{-1} , com aumento médio de 94,95 % e para os RC_2 estes valores foram de 86,94 vs 44,62 kgkg^{-1} , com aumento médio de 94,84 %. Estes resultados indicam que as diferentes gerações foram avaliadas em condições contrastantes e que baixo nível de P no solo aumentou significativamente a eficiência de uso de P nos genótipos estudados (Tabelas 13 e 14).

A EFUSO nos ambientes sob baixo P para as linhagens L3 e L228-3 foi semelhante (89,05 e 84,23 kg de massa seca de grão por kg de P no solo), enquanto as demais linhagens não diferiram entre si (variando de 34,48 a 38,90 kgkg^{-1}). Nos ambientes sob alto P, as linhagens L3, L36 e L228-3 foram semelhantes (33,36 31,82 e 29,37 kgkg^{-1}), seguidas da linhagem L53 (21,84 kgkg^{-1}), enquanto as linhagens Cateto e L22 mostraram menor eficiência de uso de P (16,45 e 12,63 kgkg^{-1}). Pôde-se observar então que, tanto sob baixo quanto sob alto P no solo, as

linhagens L3 e L 228-3 foram capazes de produzir mais grãos por unidade de P disponível no solo (Figura 7). Já a linhagem L36 somente mostrou boa EFUSO nos ambientes sob alto P no solo, indicando que a mesma deve mostrar alta resposta ao P. A linhagem L53 mostrou baixa EFUSO sob baixo P e média EFUSO nos ambientes sob alto P, enquanto L22 e Cateto mostram baixa EFUSO nos dois grupos de ambientes.

A eficiência de uso de P é função das eficiências de absorção e de utilização de P. Nos ambientes sob baixo P, pôde-se verificar que as mais altas eficiências de uso de P observadas nas linhagens L3 e L228-3 se deveram tanto à uma alta eficiência de utilização (267,40 e 221,60 kgkg^{-1}), quanto a uma alta eficiência de absorção de P (32,80 e 31,93 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$). A linhagem L36 mostrou valor médio a baixo de eficiência de uso de P sob baixo P (38,56 kgkg^{-1}), em função de valores médios tanto de eficiência de absorção (21,73 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$), quanto de eficiência de utilização de P (118,57 kgkg^{-1}). As linhagens L22, L53 e Cateto também mostraram valores médios à baixos de eficiência de uso de P (38,90 36,76 e 34,48 kgkg^{-1}), mas por razões distintas. A L22 e a Cateto mostraram média eficiência de absorção (23,83 e 21,93 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$) associada a baixa eficiência de utilização de P (68,23 e 91,61 kgkg^{-1}). Já a L53 mostrou baixa eficiência de absorção (16,50 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$) associada a média eficiência de utilização de P (149,50 kgkg^{-1}). Estes resultados indicam que, uma melhor eficiência de uso de P pode ser obtida em linhagens de milho tanto via aumento da eficiência de absorção, quanto aumentando a eficiência de utilização do P pela planta.

O caráter EFUSO obtido nos ambientes sob baixo P discriminou bem entre genótipos classificados como eficientes e ineficientes tanto entre as linhagens quanto nos híbridos F_1 . Entretanto, principalmente no caso dos híbridos, EFUSO obtida nos ambientes sob alto P não foi capaz de discriminar genótipos eficientes e ineficientes (Figura 7). Estes dados indicam que, da mesma forma como já havia sido verificado para o caráter EFABS, a eficiência de uso de P deveria ser preferencialmente avaliada em ambientes sob baixo suprimento deste nutriente.

Uma análise simultânea das contribuições das eficiências de absorção e de utilização de P sobre a EFUSO de P (Figuras 4, 5 e 7), permite concluir que, da mesma forma como havia sido verificado para as linhagens “per se”, no caso dos híbridos F_1 é possível buscar-se aumentos na eficiência de uso de P tanto via aumentos na eficiência de absorção, quanto na eficiência de utilização interna de P. Sendo que, isto pode ocorrer tanto nos ambientes sob baixo P quanto nos ambientes sob alto P.

Machado et al., (1999), encontraram que máxima eficiência de uso foi observada para o híbrido P 6875 (107 kg de grãos por kg de P aplicado no solo), enquanto que para as variedades de polinização aberta estes valores variaram de 50 a 77 kgkg^{-1} . Conforme já discutido, a avaliação de EFUSO das gerações no presente trabalho foi feita com base em kg de massa seca de grãos por kg de P na parte aérea. Se tomarmos os dados médios de PG dos híbridos F_1 nos ambientes sob alto P (8263 kg ha^{-1}) e a quantidade média de P disponível no solo nestes ambientes ($82,2 \text{ kg ha}^{-1}$), obtêm-se uma média de EFUSO de 101 kg de grãos por kg de P no solo para estes F_1 's, valor este bastante próximo do reportado pelos autores acima para o híbrido P 6875.

Para eficiência de uso de P (EFUSO) nos F_1 's sob baixo P (Figura 7), os híbridos L3x22, L3x36 e L3xCateto mostraram maiores valores de EFUSO (223,68 212,47 e 205,09 kgkg^{-1}), seguidos dos híbridos L228-3x22 e L36xCateto (190,25 e 168,54 kgkg^{-1}). Menores eficiências de uso de P foram observadas nos híbridos L3x53 e Catetox53 (137,32 e 133,34 kgkg^{-1}). Nos ambientes sob alto P, maiores EFUSO foram observadas nos híbridos L3x53, L3x22, L3x36 e L36xCateto (101,64 100,17 95,83 e 93,10 kgkg^{-1}). O híbrido L3xCateto foi intermediário (81,75 kgkg^{-1}) e, menores eficiências de uso de P foram observadas nos híbridos Catetox53 e L228-3x22 (75,85 e 70,94 kgkg^{-1}). Pode ser verificado que a classificação dos híbridos quanto à EFUSO tanto nos ambientes sob baixo P quanto nos ambientes sob alto P foi praticamente a mesma observada para a variável peso de grãos (PG), o que seria esperado já que eficiência de uso (EFUSO) nada mais é que PG dividido por uma constante que é a quantidade de P disponível no solo. Da mesma forma como verificado para o caráter PG, para EFUSO o híbrido L3x53 mostrou comportamento extremo entre os grupos de ambientes com baixo e alto P, estando entre os menos produtivos nos ambientes sob baixo P e entre os mais produtivos nos ambientes sob alto P. Esta inversão deve ter sido um dos responsáveis pela significância da interação F_1 x ambientes, observada na ANOVA conjunta para EFUSO nos cinco ambientes (Tabela 12).

A interação tratamentos x ambientes para EFUSO foi significativa nos três grupos de ambiente (AP, BP AP+BP). A decomposição desta interação no grupo de ambientes sob baixo P (BP), mostrou significância apenas para a interação F_1 's x ambientes. Nos ambientes sob alto P (AP) esta decomposição indicou significância para F_1 's x ambientes e entre gerações x ambientes. Nos cinco ambientes (AP+BP) foi verificada significância para as interações F_1 's x ambientes, RC_1 's x ambientes e entre gerações x ambientes. A não existência de efeito

significativo para a interação de determinada geração x ambiente para a variável EFUSO indica que, no grupo de ambientes estudados, os genótipos dentro de cada geração seguiram a mesma tendência quanto a sua classificação. Ou seja, genótipos superiores em um dado ambiente mantiveram este comportamento nos outros ambientes e genótipos inferiores em um dado ambiente também foram inferiores para EFUSO nos outros ambientes que compõe o grupo.

2.3.2.8 Índice de colheita de P (ICP)

A análise conjunta para os cinco ambientes para índice de colheita de P (quantidade de P nos grãos dividida pela quantidade de P total na parte aérea) não mostrou efeitos significativos entre os níveis de P. Isto indica que variações semelhantes na relação quantidade de P nos grãos e quantidade total de P na parte aérea ocorreram da mesma forma nos grupos de ambientes sob baixo e sob alto P no solo. Foi observada diferença significativa para ICP entre ambientes tanto dentro do grupo de ambientes BP quanto dentro do grupo AP (Tabela 12). Estes resultados indicam que as condições de avaliação para ICP sob baixo e alto P foram semelhantes, mas que houve diferenças entre ambientes dentro dos grupos de ambientes BP e AP.

A média geral para ICP obtida nos ambientes sob baixo (BP) e alto P (AP) no solo foi de 66,54 e 67,66 $\text{kgkg}^{-1} \times 10^2$ não havendo diferença significativa entre estes dois valores (Tabelas 13 e 14). Estes números indicam que na média dos genótipos, cerca de 67,00 % do fósforo na parte aérea encontrava-se nos grãos. Se considerarmos somente os híbridos F_1 , a média de ICP observada para esta geração sob baixo e alto P foi 77,38 e 75,81 $\text{kgkg}^{-1} \times 10^2$, indicando que, para os híbridos, cerca de 76,76% do P na parte aérea (na média dos cinco ambientes), estava localizado nos grãos.

Para o efeito de tratamentos foram detectadas diferenças significativas nas análises de variância conjunta em AP, BP e AP+BP. Na decomposição desse efeito nos grupo de ambientes BP foram significativos os efeitos de genitores, RC_1 's, RC_2 's e entre gerações e não significativos os efeitos de F_1 's e F_2 's. Nos grupos de ambiente AP esta decomposição da soma de quadrado de tratamentos mostrou significância para genitores, RC_2 's e entre gerações e foi não significativa para F_1 's, F_2 's e RC_1 's. Na análise conjunta para os cinco ambientes a decomposição desse efeito mostrou significância para genitores, RC_1 's, RC_2 's e entre gerações não sendo significativa para F_1 's e F_2 's. A significância observada dentro e entre gerações, quando verificada, evidencia a

existência de diferenças genéticas nas gerações e que estas ocorreram tanto nos ambientes sob baixo quanto nos ambientes sob alto P.

Para índice de colheita de P (ICP) nas linhagens sob baixo P no solo (Tabela 16), foi verificado que a L3 mostrou mais alto valor ($67,66 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$), seguida da L228-3 ($55,60 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$) e da L53 ($43,83 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$). As linhagens Cateto e L36 mostraram valores semelhantes ($33,43$ e $31,80 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$) e a linhagem L22 foi a de valor mais baixo ($21,97 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$). Para ICP nos ambientes sob alto P, maiores valores foram observados nas linhagens L228-3, L53 e L3 ($64,10$ $62,75$ e $62,05 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$), seguidas das linhagens L36 e Cateto ($52,65$ e $46,40 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$). Mais baixo ICP foi observado na L22 ($36,40 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$). Pode-se concluir então que nos dois grupos de ambientes, existe tendência das linhagens L3, L228-3 e L53 terem melhores ICP, as linhagens Cateto e L36 tendem a ter valores intermediários de ICP e a L22 tem baixos valores de ICP nos dois grupos de ambientes.

Para o caráter índice de colheita de P (ICP), não foi observada diferenças significativas entre os híbridos nem nos ambientes sob baixo P, nem nos ambientes sob alto P, nem na média dos cinco ambientes. O valor médio para ICP dos híbridos F_1 's nos cinco ambientes foi de $76,76 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$ (ou $76,76 \%$). Valores de ICP para diversas culturas, em latossolos brasileiros (após correção da fertilidade do solo) tem sido em média de 76% para arroz de sequeiro, 79% em milho, 85% em feijão e 89% em soja (FAGERIA; BALIGAR; LI, 2006). Resende et al., (2002), reportam ICP (denominado naquele trabalho de índice de redistribuição de P) em um híbrido de milho de 75% . Hanway (1962), reporta ICP para híbridos de milho em áreas com alto e baixo P variando de 72 a 82% .

A interação tratamentos x ambientes para ICP não foi significativa em nenhum dos três grupos de ambiente (AP, BP AP+BP), o que indica que, dentro de cada um dos grupos de ambientes estudados, os genótipos dentro de cada geração seguiram a mesma tendência nos diferentes ambientes quanto à sua classificação para ICP. Neste caso, genótipos superiores em um dado ambiente devem ter mantido este comportamento nos outros ambientes e genótipos inferiores em um dado ambiente devem também ter sido inferiores para ICP nos outros ambientes que compõe o grupo.

2.3.2.9 Quociente de utilização de P (QUTIL)

A análise conjunta para os cinco ambientes para quociente de utilização (unidades de massa seca de grãos produzida por unidade de P nos grãos) mostrou efeitos significativos entre níveis de P e entre ambientes tanto no nível baixo de P, quanto no nível alto de P (Tabela 12). Estes resultados indicam que os genótipos foram avaliados para QUTIL sob condições distintas nos ambientes sob alto e baixo P e que, houve diferença entre os ambientes dentro do grupo de ambientes sob baixo P (BP) e sob alto P (AP).

Para o efeito de tratamentos foram detectadas diferenças altamente significativas nas análises de variância conjunta em AP, BP e AP+BP. Na decomposição desse efeito nos três grupos de ambientes foi verificada significância para todas as gerações e entre gerações, exceto para os F_2 's dentro do grupo de ambientes sob alto P. A significância observada dentro e entre gerações evidencia a existência de diferenças genéticas nas mesmas e que estas ocorreram tanto nos ambientes sob baixo quanto nos ambientes sob alto P. Estes dados confirmam que as linhagens diferiram para QUTIL tanto nos ambientes sob baixo P quanto nos ambientes sob alto P, mostrando ainda que existe variabilidade para esta característica dentro das gerações derivadas dos diferentes cruzamentos entre estas linhagens. A interação tratamentos x ambientes para QUTIL não foi significativa em nenhum dos três grupos de ambientes

A média geral para QUTIL obtida nos ambientes sob baixo (BP) e alto P (AP) no solo foi de 499,82 e 466,69 kgkg^{-1} , indicando que nos ambientes sob baixo P os genótipos foram capazes de produzir em média, 499,82 kg de massa seca de grãos por kg de P contido nos grãos (Tabelas 13 e 14). Estes dados indicam que, nos ambientes sob baixo P o quociente de utilização de P dos genótipos aumentou 7,10 % em relação ao observado nos ambientes sob alto P. As médias de QUTIL nos ambientes sob baixo e alto P para as linhagens foram de 395,98 vs 425,29 kgkg^{-1} , com redução média de 6,89 % entre níveis de P; para os F_1 estes valores foram de 574,55 vs 521,33 kgkg^{-1} , com aumento médio de 10,21 % nos ambientes sob baixo P em comparação ao observado nos ambientes sob alto P; para os F_2 estes valores foram de 505,03 vs 451,37 kgkg^{-1} , com aumento médio de 11,89 %; para os RC_1 estes valores foram de 513,90 vs 480,32 kgkg^{-1} , com aumento médio de 6,99 %; para os RC_2 estes valores foram de 489,55 vs 449,93 kgkg^{-1} , com aumento médio de 8,81 %. Estes resultados indicam que as diferentes gerações foram avaliadas em condições contrastantes e que baixo nível de P no solo aumentou o quociente de

utilização de P nas diferentes gerações, exceto para as linhagens, onde foi observado o oposto ou seja a quociente de utilização de P foi maior nos ambientes sob alto P. Este fato pode estar relacionado a uma maior susceptibilidade das linhagens ao estresse de P, em relação às outras gerações, afetando mais seu metabolismo interno de P.

Israel e Rufty (1988), avaliaram as relações existentes entre 5 doses de P em solução nutritiva (0 à 2 mM) com os valores obtidos para o quociente de utilização de P-QUTIL (massa seca por unidade de P na planta) em cada um destes níveis de P, em soja. Foi verificado que, quanto menor o nível de P na solução, maior a capacidade da planta de produzir unidades de matéria seca por unidade de P na planta. Deve-se mencionar novamente que o QUTIL é exatamente o inverso da % de P no tecido e que esta última é sempre mínima nos níveis mais baixos de P. Isto faz com que o QUTIL tenha comportamento oposto ao verificado para concentração de P no tecido, ou seja, máximos QUTIL serão sempre obtidos nos níveis mais baixos de P no meio, conforme verificado por outros autores (JARRELL; BEVERLY, 1981). Este fato foi também verificado neste estudo onde as médias de QUTIL dos genótipos estudados foram significativamente menores nos ambientes sob alto P.

Maiores valores de QUTIL sob baixo P no solo foram observados nas linhagens L228-3 e L3 (454,37 e 445,00 kgkg^{-1}), seguido das linhagens L36 e L53 (414,97 e 392,76 kgkg^{-1}) e mais baixos valores foram observados nas linhagens L22 e Cateto (359,64 e 310,17 kgkg^{-1}). Nos ambientes sob alto P, maiores valores foram observados nas linhagens L228-3 L36 e L3 (503,54 482,76 e 441,90 kgkg^{-1}), seguido das linhagens L22 e L53 (418,13 e 390,35 kgkg^{-1}) e mais baixo valor foi observado na linhagem Cateto (315,10 kgkg^{-1}). As linhagens L3 e L228-3 mostraram então alto QUTIL nos dois grupos de ambientes, a L36 mostrou médio QUTIL sob baixo P e alto QUTIL nos ambientes sob alto P, a L53 mostrou médios valores de QUTIL nos dois grupos de ambientes e as linhagens L22 e Cateto mostraram baixos valores de QUTIL nos dois grupos de ambientes (Figura 6).

Maiores valores de QUTIL para os F_1 's sob baixo P no solo foram observados nos cruzamentos L3x53 e L3x22 (647,07 e 630,79 kgkg^{-1}), seguido dos cruzamentos L3xCateto, L3x36 (599,07 e 560,54 kgkg^{-1}) e mais baixos valores foram observados nos cruzamentos L36xCateto, L228-3x22 e Catetox53 (545,48 542,43 e 496,47 kgkg^{-1}). Nos ambientes sob alto P, maiores valores foram observados nos cruzamentos L3x22, L3xCateto, L3x36 e L 228-3x22 (583,77 564,48 557,76 e 555,10 kgkg^{-1}), seguido dos cruzamentos L36xCateto e L3x53 (499,84

e 491,09 kgkg⁻¹). O mais baixo valor de QUTIL nos ambientes sob alto P foi observado no cruzamento Catetox53 (397,30 kgkg⁻¹). Tendências semelhantes para QUTIL entre os F₁ foram então observadas nos ambientes sob baixo e alto P no solo (Figura 6).

Os valores de QUTIL reportados neste trabalho, foram obtidos com base na massa seca de grãos. Se calcularmos o QUTIL com base no peso médio de grãos dos F₁ corrigido para 15% de umidade nos ambientes sob alto P (média de 8263 kgha⁻¹) e na quantidade de P nos grãos para os F₁ (17,09 kgha⁻¹), será obtido um QUTIL de 483 kg de grãos por kg de P nos grãos. Este valor é muito semelhante ao reportado por Fageria, Baligar e Li, (2006), que foi de 492 kg grãos de milho por kg de P nos grãos.

2.3.3 Análises de variâncias para caracteres de resposta ao P

Neste estudo foram avaliados dois ambientes em 2004/2005 (baixo e alto P) e três ambientes em 2005/2006 (dois sob baixo P e um sob alto P no solo). As variáveis de resposta ao P (EFREC, EFIS e EFAGR) foram obtidas como as diferenças entre pares de ambientes (alto e baixo P) plantados num mesmo ano e foi feita uma análise de variância com estas três repetições. No caso de experimentos onde se tem diferentes doses de P (baixa, média e alta), em um mesmo ano, é possível verificar a relação entre valores das variáveis de resposta e aumento da dose de P (média-baixa e alta-baixa), o que não foi possível de ser obtido neste estudo. Da mesma forma como foi observado para variáveis de eficiência, foi verificado que variáveis de resposta tenderam também a diminuir, com o aumento da dose de P aplicada ao solo. Neste sentido, Fageria, Baligar e Li (2006), verificaram que, em arroz irrigado cultivado sob 6 doses de P no solo, ocorreu uma redução em todas as variáveis de resposta com o aumento da dose de P no solo. Estes valores nas doses de 131 e 655 kg Pha⁻¹ aplicados ao solo foram de 6,30% e 2,70% para eficiência de recuperação aparente de P (EFREC), 604,00 e 439,00 kg de grãos por kg de P na parte aérea para eficiência fisiológica (EFIS) e 15,50 e 6,20 kg de grãos por kg de P aplicado no solo para eficiência agrônômica de P (EFAGR).

O teste de F detectou diferenças significativas ($P \leq 0.05$) ou altamente significativas ($P \leq 0.01$) para a fonte de variação tratamentos para todas os caracteres relacionados à capacidade de resposta ao P (Tabela 15). Os coeficientes de variação (cv) para estes caracteres foram em geral altos, indo de 25,79 % para eficiência fisiológica, até 34,69 % para eficiência de recuperação

aparente. Uma das razões para isto pode ser devida ao fato de que, estas variáveis são obtidas via diferenças, ou via relações entre valores observados nos ambientes sob alto e baixo P. Fageria e Baligar (1997) reportam cv de 25,00 % para eficiência fisiológica de P em milho, obtida em ensaio realizado em casa de vegetação. Para eficiência agrônômica de N em cultivares de arroz, Fageria e Baligar (1999), reportam cv de 32,00 %, valor este muito próximo àquele observado para EFAGR de P neste estudo (32,59 %).

Para o caráter diferença de peso de grãos entre pares de ambientes sob alto e baixo P (DIFPG) foram observadas diferenças significativas ($P \leq 0.05$) ou altamente significativas ($P \leq 0.01$) dentro dos F_1 , dos RC_1 e entre as gerações. O valor médio observado para DIFPG foi de 2.698 kg grãos entre níveis alto e baixo de P. As médias observadas para as gerações foram: genitores (1.181 kg), F_1 's (4.113 kg), F_2 's (2.762 kg), RC_1 's (2.915 kg) e RC_2 's (2.258 kg). Não foram observadas diferenças significativas entre médias das linhagens para DIFPG e este fato pode estar relacionados à magnitude do coeficiente de variação observado neste caráter, que pode ter reduzido o poder de detecção de diferenças significativas entre estas médias (Tabela 17).

O uso de DIFPG como caráter de resposta ao P nos híbridos F_1 e produção de grãos sob baixo P como caráter de eficiência ao P mostrou que, cruzamentos classificados como eficientes ao P tiveram resposta média ou baixa a este nutriente (Figura 8).

Para o caráter relação entre peso de grãos nos ambientes sob baixo e alto P no solo (RELPG) foram observadas diferenças significativas ($P \leq 0.05$) ou altamente significativas ($P \leq 0.01$) dentro dos genitores e dos RC_1 . Diferenças significativas ao nível de 10% de probabilidade ($P \leq 0.10$) foram observadas dentro dos F_1 e entre as gerações. O valor médio para RELPG foi de $51,32 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$, indicando que, no nível baixo de P, foram produzidas em média, 51,32 kg de grãos para cada cem kg de grãos produzidos sob alto P no solo. As médias de RELPG observadas para as diversas gerações foram: genitores ($60,83 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$), F_1 's (53,33), F_2 's (50,57), RC_1 's ($49,10 \text{ kgkg}^{-1}$) e RC_2 's ($48,64 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$).

Gerloff (1987) denomina o caráter RELPG de “relação de equivalência” e sugere que este possa evitar que características intrínsecas dos genótipos, não necessariamente relacionadas ao estresse mineral estudado, venham a agir no sentido de dificultar a detecção de diferenças relacionadas à eficiência diferencial entre os genótipos. Bhadoria et al., (2002) utilizaram a produção relativa de parte aérea sob baixo e alto P para comparar a eficiência ao P em milho,

amendoim e trigo. De acordo com este critério, o milho foi a espécie mais eficiente seguida por amendoim e trigo.

Maiores valores de RELPG foram observados nas linhagens L228-3, L22 e L3 (86,33 83,67 e 66,63 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$), enquanto as linhagens Cateto, L53 e L36 mostraram valores mais baixos e semelhantes (52,33 42,67 e 33,33 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$). Deve-se mencionar que as linhagens L3 e L228-3 mostraram alto valor de RELPG, mas associaram alta produção de grãos tanto nos ambientes sob baixo P quanto nos ambientes sob alto P. Já a linhagem L22, mostrou alto valor de RELPG mas associado á baixa produção tanto sob baixo quanto sob alto P no solo (Tabela 17). O emprego da variável RELPG isoladamente como critério de seleção pode levar, na maioria das vezes, à seleção de genótipos como a L22 que podem ser considerados ineficientes e não responsivos ao P. Já a linhagem L36 por exemplo, mostrou o mais baixo valor para RELPG, porque, apesar de mostrar uma média produção de grãos sob baixo P (1.000 kg ha^{-1}), foi a linhagem que mostrou maior capacidade de resposta ao P, produzindo 3.004 kg ha^{-1} de grãos na média dos ambientes sob alto P. Da mesma forma, a linhagem L53 mostrou valor baixo de RELPG por associar baixa produção de grãos nos ambientes sob baixo P (884 kg ha^{-1}), com uma boa capacidade de responder ao P (produziu 2.057 kg ha^{-1} nos ambientes sob alto P). A variável RELPG penaliza então, os genótipos responsivos.

Altos valores de RELPG foram verificados para os cruzamentos L3xCateto e L 228-3x22 ($67,00$ e $66,33 \text{ kgkg}^{-1}\times 10^2$), seguidos de L3x36 e L3xL22 ($59,00$ e $56,00 \text{ kgkg}^{-1}\times 10^2$). Os cruzamentos L36xCateto, Catetox53 e L3x53 mostraram valores menores e semelhantes para este caráter ($45,67$ $44,33$ e $35,00 \text{ kgkg}^{-1}\times 10^2$). Da mesma forma como foi verificado para a linhagem L22, os dois híbridos com maior RELPG (L3xCateto e L228-3x22), foram aqueles menos responsivos ao P (Tabela 18).

Para o caráter eficiência de recuperação aparente de P ou EFREC (que mede a relação entre a diferença da quantidade total de P na planta entre níveis de P, dividida pela diferença entre o P disponível no solo nos ambientes sob alto e baixo P no solo), foram observadas diferenças altamente significativas ($P \leq 0.01$) para F_1 's, RC_1 's e entre gerações (Tabela 15). O valor médio observado para EFREC foi de $16,07 \text{ kgkg}^{-1}\times 10^2$, indicando que uma diferença média de $16,07 \text{ kg}$ de P na planta para cada cem kg de P à mais entre níveis alto e baixo de P, foi observada. Outra forma de reportar este valor é dizer que, em média, $16,07 \%$ do P entre níveis alto e baixo de P foi recuperado pela planta de milho. Neste sentido, a EFREC variou de $8,76 \%$ nas linhagens à

22,57 % nos híbridos. Os valores médios de recuperação aparente encontrados para os F_1 neste trabalho estão de acordo com aqueles citados por Fageria, Baligar e Li (2006) que reportam eficiência média de recuperação do fertilizante fosfatado nos solos brasileiros em geral de cerca de 20,00 %. Saharawat e Sika (2002) reportam EFREC de P em arroz irrigado variando de 4,80 a 11,00 %. Novais e Smyth (1999), reportam valores de EFREC para soja variando de 2,24% à 16,29%, sob diferentes níveis de P no solo.

Não foram observadas diferenças significativas entre as linhagens para eficiência de recuperação aparente (EFFREC). Como já mencionado, este fato pode ter ocorrido devido ao alto coeficiente de variação observado nesta variável, que pode ter reduzido o poder de detecção de diferenças significativas entre as médias das linhagens (Tabela 17). Os híbridos L3x53 e Catetox53 mostraram os mais altos valores de EFREC (35,50 e 32,80 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$). Estes dois cruzamentos tem em comum a linhagem L53, o que pode indicar que esta linhagem tende a dar uma maior eficiência de recuperação do fertilizante fosfatado nos cruzamentos nos quais participa. A seguir vieram os cruzamentos L36xCateto e L3x22 (27,73 e 23,40 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$). Menores valores de recuperação aparente de P foram verificados nos cruzamentos L3x36, L3xCateto e L 228-3x22 (15,00 12,30 e 11,27 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$), conforme mostrado na Tabela 18.

Para o caráter eficiência fisiológica de P ou EFIS (que mede a quantidade de grãos produzida por unidade adicional de P no interior da planta entre níveis alto e baixo de P no solo), foram observadas diferenças significativas ($P \leq 0.05$) ou altamente significativas ($P \leq 0.01$) para as gerações correspondentes aos genitores, RC_1 e entre gerações. Diferenças significativas ($P \leq 0.10$) foram observadas para a geração F_1 . O valor médio observado para EFIS foi de 284,95, indicando que, para cada kg de P na planta entre níveis alto e baixo de P, foram produzidos 284,95 kg de massa seca de grãos. A EFIS variou de 237,25 kg de massa seca de grãos por kg de P na planta entre níveis de P nas linhagens, até 321,34 kgkg^{-1} nos híbridos. Baligar e Fageria (1997), reportam eficiência fisiológica média de P sob níveis médios e altos de P aplicados ao solo de 197 e 109 kg grãos/kg P na planta, em seis genótipos de arroz.

Maior EFIS foi verificada na linhagem L36 (346,87 kg de massa seca de grãos por kg de P extra na planta), seguida das linhagens L228-3, L22 e L53 (287,25 260,04 e 246,19 kgkg^{-1}). Menores valores para eficiência fisiológica foram observados para as linhagens L3 e Cateto (195,10 e 107,09 kgkg^{-1}). Pôde-se observar então que a linhagem L36 mostrou maior resposta para converter em grãos o P na parte aérea entre ambientes com alto e baixo P. Já a linhagem L3,

apesar de altamente eficiente na utilização de P, mostrou capacidade interna de resposta ao P (eficiência fisiológica) média à baixa. Estes dados indicam que, um desafio no melhoramento para estresse mineral nos materiais utilizados neste estudo, seria obter genótipos que associassem a eficiência da L3 com a capacidade de resposta da L36 por exemplo.

Maiores eficiências fisiológicas foram obtidas nos cruzamentos L3x36, L228-3x22, L3xCateto e L3x22 (416,19 353,27 322,83 e 321,94 kgkg^{-1}), seguidos de L36xCateto e L3x53 (314,73 e 301,76 kgkg^{-1}). O menor valor para eficiência fisiológica foi verificado no cruzamento Cateto x 53 (218,63 kgkg^{-1}), conforme mostrado na Tabela 18.

Para o caráter eficiência agrônômica de P ou EFAGR (que mede a relação entre a diferença da quantidade total de grãos produzida por um dado genótipo, nos níveis alto e baixo de P, dividida pela diferença na quantidade de P disponível no solo nos níveis alto e baixo de P), foram observadas diferenças significativas ($P \leq 0.05$) ou altamente significativas ($P \leq 0.01$) para as gerações F_1 , RC_1 e entre gerações (Tabela 15). O valor médio observado para EFAGR foi de 45,62 indicando que, para cada kg de P disponível no solo entre níveis alto e baixo de P foram produzido 45,62 kg de massa seca de grãos. A EFAGR variou de 20,82 kg de massa seca de grãos por kg de P entre níveis alto e baixo de P no solo para as linhagens, até 68,97 kgkg^{-1} nos híbridos. Baligar e Fageria (1997), reportam eficiência agrônômica média de P sob níveis médios e altos de P aplicados ao solo de 81 e 99 kg de grãos por kg de fertilizante aplicado no solo, em seis genótipos de arroz.

Não foram observadas diferenças significativas entre as linhagens para eficiência agrônômica (EFAGR), o que pode ser devido ao alto coeficiente de variação observado para este caráter. Maior eficiência agrônômica entre os híbridos foi observada no cruzamento L3x53. Valores altos de eficiência agrônômica foram ainda verificados nos cruzamentos L36xCateto, L3x22 e Catetox53 (84,14 79,73 e 71,34 kgkg^{-1}). Baixos valores de eficiência agrônômica foram observados nos cruzamentos L3x36, L 228-3x22 e L3xCateto (59,62 42,44 e 40,69 kgkg^{-1}).

O alto valor de eficiência agrônômica observado no cruzamento L3x53 (104,81 kgkg^{-1}) foi função de uma muito alta eficiência de recuperação aparente de P-EFREC (35,50 $\text{kgkg}^{-1} \times 10^2$), associada à uma alta eficiência fisiológica (301,76 kgkg^{-1}). Já o valor alto de EFAGR observado para o cruzamento L3xL22 (79,73 kgkg^{-1}) foi função de uma alta eficiência fisiológica (321,94 kgkg^{-1}) e uma média eficiência de recuperação aparente (23,40 $\text{kgkg}^{-1} \times 10^2$). O cruzamento L3xL36 mostrou baixo valor de EFAGR (59,62 kgkg^{-1}), apesar de mostrar a mais alta eficiência

fisiológica-EFFIS ($416,19 \text{ kgkg}^{-1}$). Entretanto este cruzamento mostrou muito baixa EFREC ($15,00 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$). Estes resultados indicam que uma maior resposta ao P adicionado ao solo para produzir grãos (EFAGR), pode ser obtida tanto via aumento da eficiência de recuperação aparente de P, quanto via aumento na eficiência fisiológica.

O peso de grãos sob baixo P foi utilizado como uma medida de eficiência ao P nos híbridos F_1 e a diferença de peso de grãos entre níveis alto e baixo de P no solo (DIFPG) como uma medida de resposta ao P (Figura 8). Dentre os híbridos classificados como eficientes ao P, os cruzamentos L3x22 e L3x36 mostraram média capacidade de resposta ao P, e os cruzamentos 228-3x22 e L3xCateto classificados como eficientes, não responderam ao P. Já dos três cruzamentos classificados como ineficientes, dois mostraram média resposta ao P (Catetox53 e L36xCateto) e o cruzamento ineficiente L3x53 foi altamente responsivo ao P. Programas de seleção voltados para a obtenção de genótipos eficientes e responsivos ao P deveriam então utilizar índices de seleção incluindo estes dois caracteres (PG sob baixo P e DIFPG).

2.3.4 Estimativas de efeitos gênicos

Os estudos da natureza e magnitude dos efeitos gênicos que controlam um dado caráter são de alta importância nos processos de seleção e predição do comportamento de gerações híbridas e segregantes. Estes estudos se baseiam na avaliação fenotípica de um dado caráter em múltiplos ambientes, seguida de análises estatístico-genéticas do mesmo, as quais são utilizadas para estimar parâmetros que definem o tipo de ação gênica envolvida na expressão deste caráter.

O grande interesse do melhorista de plantas na estimação de efeitos gênicos controlando um caráter, é utilizar métodos de seleção mais adequados para explorar favoravelmente os tipos predominantes de efeitos gênicos identificados (FALCONER, 1989). Em milho, diversos estudos mostram que efeitos de dominância contribuem significativamente para a expressão de caracteres como produção de grãos e altura de planta e espiga (GAMBLE 1962ab; MORENO-GONZALES; DUDLEY, 1981), e ainda detectaram contribuição significativa de epistasia digênica na expressão destes caracteres em combinações específicas. No caso da eficiência ao P em milho cultivado até a fase de planta adulta, pouca informação existe sobre a importância relativa dos efeitos gênicos sobre caracteres ligados à eficiência e resposta ao P.

Ao todo foram ajustados neste estudo 189 modelos genéticos para caracteres de eficiência ao P (9 caracteres, 7 cruzamentos e três grupos de ambientes) e 35 modelos para caracteres de resposta ao P (5 caracteres e 7 cruzamentos), num total de 224 modelos genéticos. Deste total, 7 modelos (3,12 % do total) mostraram valor de χ^2 significativo à 5%, e em apenas um caso, o modelo com melhor ajuste teve χ^2 significativo à 1% de probabilidade. Deve-se ressaltar que, dos 8 modelos com χ^2 significativos, cinco deles foram verificados no caráter quociente de utilização de P (QUTIL). Como discutido anteriormente, para este caráter não foi observada homogeneidade de variância entre os cinco ambientes utilizados na ANOVA conjunta, o que pode estar relacionado ao pior ajuste dos modelos verificado no mesmo.

As estimativas dos parâmetros genéticos indicam o tipo ou tipos de ação gênica e sua importância. A contribuição dos diversos efeitos gênicos sobre a média dos cruzamentos estudados é verificada pela magnitude das estimativas de cada parâmetro (m, a, d, aa, ad, dd). A média das estimativas de cada um destes parâmetros para os sete cruzamentos num dado grupo de ambientes foi utilizada para verificar a contribuição relativa dos efeitos aditivos e não aditivos (dominância e epistasia), sobre a herança de um dado caráter. Com base na média das estimativas destes parâmetros nos sete cruzamentos, foi verificado se o ambiente (baixo ou alto P no solo) tendeu a afetar a herança do caráter e também se esta variou entre a média dos cruzamentos classificados como eficientes ao P (L3x22, L3xCateto, L3x36 e 228-3x22) ou ineficientes ao P (L3x53, L36xCateto e Catetox53).

Uma análise crítica baseada nos dados de herança de cada caráter foi utilizada para verificar possíveis estratégias de melhoramento que seriam mais adequadas num programa de seleção visando o desenvolvimento de híbridos de milho eficientes e responsivos ao P. Por exemplo, caracteres com herança predominantemente aditiva poderiam ser avaliados em progênies endogâmicas (S₃-S₄), ou em linhagens avaliadas “per se”. Já aqueles caracteres onde os efeitos não aditivos (dominância e/ou epistasia) forem muito mais importantes que os efeitos aditivos, deveriam ser preferencialmente avaliados em cruzamentos (“top-crosses”, dialelos, seleção recorrente interpopulacional, etc.). Por fim, caracteres com importância semelhante de efeitos aditivos e não aditivos poderiam ser avaliados tanto em cruzamentos, quanto em avaliação “per se” de progênies menos endogâmicas (S₁-S₂). A investigação do tipo de herança dentro de cada grupo de ambiente (alto e baixo P no solo), permite então verificar quais estratégias de seleção seriam mais adequadas em cada um destes ambientes. Por fim, o estudo da herança dos diversos

caracteres entre os grupos de cruzamentos classificados como eficientes ou ineficientes ao P utilizados neste estudo, pode sugerir se existe alguma tendência do tipo predominante de ação gênica atuando sobre a média de um dado caráter variar entre genótipos eficientes ou ineficientes ao P. Esta informação pode ser útil na escolha de estratégias de seleção para um dado caráter, em programas de melhoramento que trabalhem com germoplasma pouco melhorado para estes caracteres, ou em programas já com base genética bastante selecionada para os mesmos.

Para cada caráter, e cada cruzamento, nos três grupos de ambientes (BP, AP e AP+BP), são mostrados: a) médias das gerações P_1 , P_2 , F_1 , F_2 , RC_1P_1 , RC_1P_2 , RC_2P_1 , RC_2P_2 ; b) estimativas e significância dos parâmetros do modelo ajustado (m , a , d , aa , ad , dd); c) ajuste do modelo, verificado tanto pelo R^2 quanto pelo χ^2 (Tabelas 20 à 28). São mostrados ainda a média das estimativas de cada um dos parâmetros para os sete cruzamentos observada nos ambientes sob baixo e alto P, a média destas estimativas para cruzamentos eficientes e ineficientes ao P e a média das relações d/a e $d/epistasia$ para ambientes sob baixo e alto P no solo e para cruzamentos eficientes e ineficientes ao P (Tabela 29). As estimativas do parâmetro “ m ” foram significativas em praticamente todos os caracteres, cruzamentos e ambientes estudados, e este fato não será novamente mencionado na discussão abaixo.

2.3.4.1 Estimativas de efeitos gênicos de caracteres de eficiência ao P

2.3.4.1.1 Efeitos gênicos: peso de grãos (PG)

As estimativas do parâmetro d foram significativas em todos os sete cruzamentos, nos três grupos de ambientes (BP, AP e BP+AP) e estimativas do parâmetro “ a ” foram significativas em cinco cruzamentos sob baixo P (BP), seis cruzamentos sob alto P (AP) e nos sete cruzamentos para os cinco ambientes avaliados em conjunto (BP+AP). Coeficientes de determinação (R^2) para os diversos modelos para PG ficaram acima de 0,91 nos três grupos de ambientes (Tabela 20). Para PG nos ambientes sob baixo P observa-se que o modelo aditivo-dominante foi suficiente para explicar a variação observada entre médias de gerações para cinco dos sete cruzamentos. Nos ambientes sob alto P isto ocorreu em quatro dos sete cruzamentos, indicando que efeitos epistáticos digênicos foram detectados com certa frequência para o caráter PG tanto sob baixo quanto sob alto P no solo.

A relação entre a média das estimativas do parâmetro “m” para os sete cruzamentos, verificada sob baixo P no solo (1342 kg ha^{-1}) e sob alto P (2351 kg ha^{-1}) foi de 0,57 indicando redução média de 42,92% na estimativa deste parâmetro sob baixo P no solo.

Na média dos sete cruzamentos, efeitos de dominância foram muito superiores aos efeitos aditivos para PG (Tabela 29), sendo ainda mais importantes sob alto P ($d/a=10,34$) do que sob baixo P no solo ($d/a=6,41$). Estes dados concordam com aqueles obtidos por Pérez-Velazques (2000) que encontrou que efeitos de dominância para PG em milho foram muito superiores aos efeitos aditivos e ainda que efeitos de dominância foram ainda mais importantes em solo sem estresse (solo fértil ou solo com alto P), do que nos ambientes sob estresse mineral (solos ácidos).

Gamble (1962a), estimou os parâmetros m, a, d, aa, ad, dd em quinze cruzamentos de milho avaliados por dois anos em dois ambientes. Foi verificado que os efeitos de dominância foram os que mais contribuíram para a variação observada em produção de grãos em milho em todos os quinze cruzamentos, sendo que todas as estimativas de “d” foram positivas, altamente significativas e de grande magnitude, enquanto estimativas do componente aditivo foram significativas em apenas sete dos quinze cruzamentos sendo todas de pequena magnitude.

A média das estimativas de efeitos aditivos sob baixo e alto P no solo foram próximas (456 e 578 kg ha^{-1} respectivamente), enquanto efeitos de dominância mostraram média quase duas vezes superior nos ambientes sob alto P (5982 kg ha^{-1}) do que nos ambientes sob baixo P no solo (2924 kg ha^{-1}). Dos 18 modelos com estimativas de “a” significativas nos três grupos de ambientes (BP, AP e BP+AP), em 16 deles as estimativas de “a” foram positivas, indicando que na maior parte das vezes, a linhagem escolhida como genitor 1 nos cruzamentos, foi aquela com maior frequência de alelos para aumentar a média do caráter PG. Sinal negativo das estimativas de “a”, como observado para o cruzamento Cateto x 53 por exemplo (único cruzamento entre duas linhagens ineficientes ao P), indica que o genitor 2 deste cruzamento (L53) foi aquele que contribuiu com mais alelos para aumentar a média do caráter. O sinal das estimativas de “d” foi sempre positivo, indicando que efeitos de dominância contribuíram para aumentar a média de PG.

A média das estimativas do parâmetro “m” para os cruzamentos eficientes (2428 kg ha^{-1}) foi semelhante à verificada nos cruzamentos ineficientes (2247 kg ha^{-1}) nos ambientes sob alto P no solo, enquanto sob baixo P no solo a média das estimativas de “m” nos cruzamentos eficientes ao P (1515 kg ha^{-1}) foi 1,36 vezes superior à observada nos cruzamentos ineficientes (1111 kg ha^{-1}).

Estes dados confirmam que a classificação dos cruzamentos como eficientes e ineficientes está de acordo com os conceitos propostos por Gourley, Allan e Russelle (1993). Nos ambientes sob baixo P, a relação entre as médias das estimativas do parâmetro “d” entre cruzamentos eficientes (3198 kg ha^{-1}) e ineficientes ao P (2559 kg ha^{-1}) foi de 1,25, enquanto nos ambientes sob alto P esta relação foi de 1,37 (6762 e 4942 kg ha^{-1} respectivamente).

Os dados acima mostraram que, efeitos de dominância para peso de grãos foram em geral mais importantes nos ambientes sob alto P, foram mais importantes em cruzamentos eficientes ao P do que nos cruzamentos ineficientes, e não houve grande variação nesta relação entre ambientes sob baixo e alto P no solo (1,25 e 1,37).

A média das estimativas dos efeitos aditivos (em módulo) nos ambientes sob baixo P para os cruzamentos eficientes ao P (612 kg ha^{-1}) foi 2,46 vezes superior à verificada nos cruzamentos ineficientes (249 kg ha^{-1}), enquanto nos ambientes sob alto P esta relação foi de apenas 1,21 (624 e 518 kg ha^{-1} respectivamente). Estes dados indicam maior importância dos efeitos aditivos nos cruzamentos eficientes comparados aos cruzamentos ineficientes, principalmente nos ambientes sob baixo P no solo.

Com base na informação acima pode-se especular que, à medida que se aumente a frequência de genótipos eficientes num programa de seleção para adaptação a ambientes sob baixo P no solo, não só aumenta-se a magnitude média das estimativas dos efeitos aditivos, mas também efeitos de dominância para PG podem passar a ter maior importância. Esta situação poderia ser diferente em programas ainda no início do processo de seleção e com alta frequência de genótipos ineficientes ao P.

Efeitos epistáticos significativos foram detectados em dois cruzamentos sob baixo P (sendo estes efeitos do tipo aditivo x dominante) e três cruzamentos sob alto P (sendo um destes efeitos do tipo aditivo x dominante e dois do tipo dominante x dominante). A magnitude média das estimativas dos efeitos epistáticos detectados sob baixo P (2.981 kg ha^{-1}) foi muito próxima à média das estimativas de “d” nestes ambientes (2924 kg ha^{-1}). Nos ambientes sob alto P, a magnitude média das estimativas dos efeitos epistáticos (3321 kg ha^{-1}) foi quase metade da média das estimativas de “d” nestes ambientes (5982 kg ha^{-1}). O sinal destas estimativas foram positivos em quatro dos cinco efeitos epistáticos identificados, indicando que combinações gênicas favoráveis para peso de grãos devem existir nos cruzamentos entre as linhagens, e que estas combinações devem ter contribuído para aumentar a média das gerações, conforme os modelos

ajustados. Efeitos epistáticos para PG foram identificados tanto em cruzamentos eficientes quanto ineficientes ao P e em frequências semelhantes entre ambientes sob baixo P (dois cruzamentos) e ambientes sob alto P no solo (três cruzamentos), não sendo então verificada nenhuma tendência nestes aspectos.

Estes dados indicam que efeitos epistáticos foram detectados tanto nos ambientes sob baixo P quanto nos ambientes sob alto P, sendo geralmente positivos e ocorrendo numa frequência próxima de um terço dos cruzamentos estudados (5 cruzamentos mostraram efeito epistático entre os 14 cruzamentos sob baixo e alto P). Não foram verificadas grandes diferenças nem entre ambientes nem entre cruzamentos eficientes e ineficientes quanto à frequência de identificação de efeitos epistáticos. A magnitude média das estimativas dos efeitos epistáticos nos ambientes sob baixo P foi próxima à observada para os efeitos de dominância, enquanto nos ambientes sob alto P no solo a magnitude média dos efeitos de dominância para PG foi duas vezes superior à magnitude média dos efeitos epistáticos. Estes dados indicam que, quando ocorreram, efeitos epistáticos contribuíram de forma semelhante aos efeitos de dominância para a média dos cruzamentos nos ambientes sob baixo P, enquanto esta contribuição foi menor que àquela devida aos efeitos dominantes nos ambientes sob alto P no solo. Maior contribuição de efeitos epistáticos para a média do caráter PG em milho em ambientes sob estresse nutricional (solos ácidos) em relação a ambientes de solo fértil foi reportada por Ceballos et al., (1998).

Quanto às estimativas dos parâmetros genéticos para o caráter peso de grãos, pode-se concluir que: a) efeitos de dominância foram muito superiores aos efeitos aditivos e isto foi mais marcante nos ambientes sob alto P no solo do que nos ambientes sob baixo P no solo; b) o sinal das estimativas de “d” foi sempre positivo e o sinal das estimativas dos efeitos epistáticos foi positivo na maioria dos casos; c) efeitos epistáticos foram detectados em cerca de um terço dos cruzamentos sendo dos tipos aditivo x dominante e dominante x dominante, não mostraram padrão claro de ocorrência nem entre ambientes nem entre cruzamentos eficientes e ineficientes e mostraram magnitude semelhante aos efeitos de dominância nos ambientes sob baixo P e inferior aos efeitos de dominância nos ambientes sob alto P no solo; e) nos genótipos e ambientes estudados, o nível de P no solo afetou a magnitude das estimativas de dominância (que foram superiores sob alto P no solo), mas não afetou a magnitude média das estimativas de efeitos aditivos; f) cruzamentos eficientes ao P mostraram maiores médias de estimativas de efeitos aditivos do que cruzamentos ineficientes e isto foi mais evidente nos ambientes sob baixo P no

solo; g) efeitos de dominância para PG foram mais importantes nos cruzamentos eficientes do que nos ineficientes ao P e isto foi verificado tanto sob baixo quanto sob alto P no solo.

Estes dados indicam que, da mesma forma como tem sido comumente reportado para o caráter PG avaliado em ambientes férteis (alto P), programas de melhoramento voltados para seleção do caráter PG em ambientes sob baixo P no solo em culturas alógamas como o milho, devem utilizar métodos de seleção que capitalizem principalmente sobre efeitos não aditivos (dominância e/ou epistasia). Alguns destes métodos seriam seleção recorrente recíproca ou avaliações de cruzamentos entre grupos heteróticos distintos.

Ceballos et al., (1998) verificaram contribuição de efeitos de dominância para peso de grãos em milho em solos ácidos variando de 35,10% a 62,90%. Esta contribuição em solo fértil foi de 80,80%, indicando, da mesma forma como observado no presente estudo, uma maior contribuição de efeitos de dominância em solos férteis do que em solos de baixa fertilidade. Estes autores reportam ainda que, a contribuição dos efeitos aditivos em solos ácidos, variaram de 20,10 a 21,81%, e em solo fértil este valor foi de 10,38%. Para efeitos epistáticos, as contribuições observadas em solo ácido foram de 14,52 a 27,40 % e em solo fértil este valor foi de apenas 3,19%. Este último dado também concorda com o que foi observado neste estudo onde efeitos epistáticos, em relação aos efeitos de dominância, foram mais importantes sobre a média dos cruzamentos nos ambientes sob baixo P no solo do que nos ambientes sob alto P no solo.

A importância dos efeitos epistáticos para PG em milho tem sido reportada por diversos autores (GAMBLE, 1962a; DARRAH; HALLAUER, 1972; MCCONNELL; GARDNER, 1979; MORENO-GONZALEZ; DUDLEY, 1981). Nestes estudos tem sido verificado contribuição dos efeitos epistáticos proporcionalmente menor que a observada para efeitos dominantes. Wolf e Hallauer (1977) verificaram que, em ambientes sob estresse, efeitos epistáticos tendem a mostrar maior importância sobre a expressão do caráter peso de grãos em milho. Alta importância de efeitos não aditivos para produção de grãos em híbridos cultivados sob baixo P em estudos de dialelos foi reportada por Parentoni et al., 2000 e Gama et al., 2006.

2.3.4.1.2 Efeitos gênicos: intervalo de florescimento masculino e feminino (ASI)

Para o caráter ASI, o modelo aditivo-dominante foi suficiente para explicar a variação observada entre médias de gerações em todos os cruzamentos e ambientes estudados, não sendo

detectados efeitos epistáticos para este caráter. Os coeficientes de determinação (R^2) dos modelos ficaram acima de 0,80 (Tabela 21). As estimativas do parâmetro “a” foram significativas para os diversos cruzamentos, nos três grupos de ambientes (BP, AP e BP+AP), exceto para o cruzamento Catetox53 nos grupos de ambientes BP e BP+AP. Já as estimativas do parâmetro “d” foram significativas em apenas quatro cruzamentos sob baixo P (BP), três cruzamentos sob alto P (AP) e em quatro dos sete cruzamentos para os cinco ambientes avaliados em conjunto (BP+AP). Os sinais das estimativas de “a” foram quase sempre negativos, indicando que o genitor 2 de cada um dos cruzamentos foi aquele que contribuiu com mais alelos para aumentar a média do caráter ASI. Da mesma forma, o sinal das estimativas de dominância foram negativas em 11 dos 14 cruzamentos sob baixo e alto P, indicando que em geral dominância atuou no sentido de reduzir o intervalo de florescimento masculino e feminino (ASI) e que isto ocorreu tanto sob baixo quanto sob alto P no solo.

A média das estimativas de “m” para os sete cruzamentos sob baixo P no solo (4,69 dias) foi quase três vezes superior à observada sob alto P no solo (1,61 dias). Na média das estimativas dos sete cruzamentos, efeitos aditivos foram superiores aos efeitos de dominância (Tabela 29), tanto sob baixo P no solo (1,13 vezes), quanto sob alto P no solo (1,47 vezes). Estes dados indicam que a herança do caráter ASI foi influenciada tanto por efeitos aditivos quanto de dominância (relação d/a sob baixo e alto P foi de 0,88 e 0,68 sugerindo dominância parcial), mas com efeitos aditivos sendo superiores aos de dominância, principalmente sob alto P no solo e com estimativas de “d” sendo significativas em somente metade dos cruzamentos nos diversos ambientes.

Quando as magnitudes médias das estimativas dos efeitos aditivos (“a”) foram comparadas nos dois grupos de ambientes, foi verificado que, sob baixo P no solo, este valor (em módulo) foi de 2,29 dias, sendo 1,22 vezes superior ao verificado nos ambientes sob alto P (1,88 dias). O mesmo ocorreu com as estimativas de “d” que foram 1,58 vezes mais altas sob baixo P (-2,03 dias), do que sob alto P (-1,28 dias). Estes dados indicam que o ambiente influenciou a herança do caráter ASI, sendo que efeitos aditivos e dominantes tenderam a ser maiores nos ambientes sob baixo P no solo (Tabela 29).

A análise das médias das estimativas de “a” e “d” para cruzamentos eficientes e ineficientes ao P mostrou que efeitos aditivos foram cerca de duas vezes mais importantes nos cruzamentos classificados como eficientes a P do que nos cruzamentos ineficientes, enquanto o oposto foi

verificado com relação à média das estimativas dos efeitos de dominância e isto ocorreu nos dois níveis de P no solo.

Do ponto de vista do melhoramento, o caráter ASI poderia então ser avaliado em progênies ou linhagens per se, sendo que estas avaliações poderiam ser conduzidas tanto sob baixo quanto sob alto P no solo. Entretanto, avaliações de ASI sob baixo P teriam a vantagem de que, nestes ambientes, a magnitude dos efeitos aditivos foi superior à verificada sob alto P, e ainda, a média e amplitude de variação observada nas linhagens nos ambientes sob baixo P foi maior que a verificada sob alto P (Tabela 16), o que permitiria melhor discriminação entre genótipos. Por outro lado, a avaliação deste caráter em progênies de baixa endogamia (S_1 - S_2) sob alto P durante a fase de obtenção destes materiais, também seria útil, pela mais alta importância dos efeitos aditivos em relação aos efeitos de dominância nestes ambientes. A correlação entre ASI sob baixo e alto P no solo foi média e positiva ($r=0,59^{**}$), confirmando a possibilidade de se avaliar esta característica nos dois grupos de ambientes. O fato de que efeitos aditivos tenham sido mais importantes nos cruzamentos classificados como eficientes do que nos cruzamentos ineficientes ao P (sendo que o melhorista tem interesse superior em cruzamentos do tipo eficiente ao P), reforça a idéia de se avaliar o caráter ASI em progênies “per se”.

2.3.4.1.3 Efeitos gênicos: teor de P nos grãos (TPG)

Para o caráter teor de P nos grãos (gramas de P nos grãos por kg de massa seca de grãos), as estimativas do parâmetro “d” foram significativas em todos os sete cruzamentos, nos três grupos de ambientes (BP, AP e BP+AP), exceto para o cruzamento Catetox53 nos ambientes sob alto P no solo. As estimativas do parâmetro “a” foram significativas em seis cruzamentos sob BP, quatro sob AP e seis cruzamentos nos ambientes BP+AP. O valor negativo, observado para as estimativas de efeitos aditivos na maioria dos cruzamentos, indica que em geral, o genitor 1 (P_1) foi aquele com menor teor de P nos grãos ou que o P_2 teve geralmente maior frequência de genes aditivos no sentido de aumentar o teor de P nos grãos. Os sinais das estimativas de “d” foram sempre negativos, indicando que efeitos de dominância para TPG parecem ser unidirecionais e no sentido de diminuir o teor de P nos grãos. Os coeficientes de determinação dos modelos (R^2) variaram de 0,66 à 0,99 nos três grupos de ambientes (Tabela 22). O modelo aditivo-dominante foi suficiente para explicar a variação de TPG observada entre médias de gerações em apenas três

dos sete cruzamentos nos ambiente sob baixo P no solo, e em todos os cruzamentos nos ambientes sob alto P no solo.

A média das estimativas de “m” dos sete cruzamentos foram semelhantes nos ambientes sob baixo P (3,02 g de P nos grãos por kg de massa seca de grãos) e nos ambientes sob alto P no solo (2,85 gkg⁻¹). Efeitos de dominância foram muito superiores aos efeitos aditivos nos ambientes sob baixo P no solo (d/a=5,12), mas isto foi menos pronunciado nos ambientes sob alto P no solo (d/a=1,91).

A média das estimativas dos efeitos aditivos para os sete cruzamentos foi semelhante nos ambientes sob baixo e alto P no solo (0,34 e 0,29 gkg⁻¹ respectivamente), enquanto a média das estimativas de dominância sob baixo P no solo foi três vezes superior à observada sob alto P (-1,73 e -0,56 gkg⁻¹). Não foram observadas grandes variações nas estimativas de “a” e “d” entre genótipos classificados como eficientes e ineficientes ao P em nenhum dos níveis de P no solo (Tabela 29).

Quanto aos efeitos epistáticos, os mesmos foram detectados em quatro cruzamentos nos ambientes sob baixo P, sendo todos do tipo dominante x dominante e com sinal positivo, indicando que estes efeitos contribuíram no sentido de aumentar a média do teor de P nos grãos. Estes efeitos foram detectados tanto em cruzamentos eficientes quanto em cruzamentos ineficientes ao P. A média das estimativas dos efeitos epistáticos (1,25 gkg⁻¹) foi cerca de 0,72 da média das estimativas de dominância (-1,73 gkg⁻¹) nos ambientes sob baixo P, indicando que nestes ambientes, dominância, seguida de epistasia do tipo dominante x dominante foram os principais efeitos gênicos atuando sobre a média do caráter TPG. Não foram detectados efeitos epistáticos nos ambientes sob alto P no solo.

Os seguintes fatos parecem ser relevantes, na busca de uma estratégia de melhoramento para esta característica: a) efeitos de dominância, apesar de serem superiores aos efeitos aditivos, foram relativamente menos importante nos ambientes sob alto P do que nos ambientes sob baixo P no solo; b) efeitos epistáticos não foram detectados sob alto P no solo; c) dominância no sentido de diminuir a média do caráter (estimativas negativas de “d”) indica que as médias de TPG tendem a ser menores nos F₁’s, aumentando com o aumento da endogamia nos genótipos; d) foi verificada correlação negativa entre diversas variáveis de eficiência e o teor de P no grão; e) a correlação entre teor de P no grãos nos ambientes sob alto e baixo P no solo foi alta (r=0,73**).

Com base nestes resultados, uma possível estratégia de seleção para esta característica poderia ser, no início do processo de extração de linhagens (S_1 a S_2), que é conduzido em ambientes sob alto P no solo, poderia ser feita uma avaliação do teor de P nos grãos destes genótipos. Com base nestas análises, seriam descartados aqueles genótipos com alta concentração de P nos grãos, já que genótipos eficientes ao P tendem a ter baixos valores de TPG.

Esta idéia de se de se avaliar algumas características relacionadas à programa de tolerância a estresse abiótico (como adaptação à solos ácidos por exemplo), em ambiente sem estresse (solo fértil), foi discutida por Resende et al., (1997). Estes autores avaliaram o progresso genético esperado para produção de grãos, altura de planta e espiga, dias até o florescimento e prolificidade em 200 progênies de meios irmãos obtidas da variedade de milho BR108, avaliada em solo fértil e solo sob cerrado. Os autores reportam que, para os caracteres altura de planta e espiga, dias para florescimento e índice de espigas, seleção massal feita no ambiente fértil, por ocasião da obtenção ou da recombinação das progênies seria o método de melhoramento mais eficiente. Esta mesma linha de raciocínio é sugerida aqui, onde, com base nos dados de herança e correlações para o caráter TPG, sugere-se avaliar “per se” progênies com alguma endogamia (S_1/S_2) em ambientes sob alto P, ao mesmo tempo em que se obtêm estas progênies, ou mesmo na fase de “top cross”, caso este seja obtido em ambiente sob alto P no solo.

Neste sentido, é relevante mencionar as observações feitas por Wardyn e Russel (2004),.que reportam que o efeito da fonte de pólen sobre a concentração de P no grão é baixo, sugerindo que esta característica possa ser avaliada sob polinização livre. Estes mesmos autores encontraram que, avaliação para TPG, conduzida em um ano utilizando duas repetições, deve proporcionar maior ganho por ano do que avaliação por dois anos utilizando uma repetição por ano.

Barber, Thomaz e Baker (1967) estudaram a herança da acumulação de P nas folhas em linhagens de milho contrastantes para este caráter e verificaram a tendência de dominância no sentido de baixa concentração de P na folha. Estes autores verificaram ainda que, a distribuição de frequência observada na geração F_2 dos cruzamentos do tipo alto acumulador x acumulador e acumulador x baixo P na folha foi marcadamente assimétrica na direção do pai com menor concentração de P. Estas observações concordam com os resultados obtidos neste trabalho onde, nos três grupos de ambientes (BP, AP e AP+BP), foi verificado dominância negativa para teor de P nos grãos em todos os cruzamentos estudados.

2.3.4.1.4 Efeitos gênicos: quantidade de P total na planta (FTOT)

Para o caráter quantidade de P total na planta, as estimativas do parâmetro d'' foram significativas em todos os sete cruzamentos, nos três grupos de ambientes (BP, AP e BP+AP), exceto para o cruzamento Catetox53 nos ambientes sob baixo P no solo. As estimativas do parâmetro a'' foram significativas em seis cruzamentos sob BP, em apenas dois cruzamentos sob AP e em cinco cruzamentos nos ambientes BP+AP. O sinal positivo, observado para todas as estimativas de efeitos aditivos indica que o genitor 1 (P_1) foi aquele com maior frequência de genes aditivos no sentido de aumentar a quantidade de P nos grãos.

Os sinais das estimativas de d'' foram positivos em cinco dos sete cruzamentos sob baixo P no solo e em todos os cruzamentos sob alto P no solo, indicando que dominância atua geralmente no sentido de aumentar a média de FTOT. Os coeficientes de determinação dos modelos (R^2) variaram de 0,72 a 0,99 nos três grupos de ambientes (Tabela 23). O modelo aditivo-dominante foi suficiente para explicar a variação de FTOT observada entre médias de gerações em quatro dos sete cruzamentos nos ambiente sob baixo P no solo, e em todos os cruzamentos nos ambientes sob alto P no solo.

A média das estimativas de m'' dos sete cruzamentos para o caráter FTOT foi 1,75 vezes superior nos ambientes sob alto P no solo ($10,99 \text{ kg ha}^{-1}$) do que nos ambientes sob baixo P no solo ($6,28 \text{ kg ha}^{-1}$). A média das estimativas dos efeitos de dominância (d'') para os sete cruzamentos foi superior a media das estimativas dos efeitos aditivos nos ambientes sob baixo P no solo ($d/a=3,97$), sendo isto ainda mais pronunciado nos ambientes sob alto P no solo ($d/a=10,50$).

A média das estimativas dos efeitos aditivos foi semelhante nos ambientes sob baixo e alto P no solo (Tabela 29). Entretanto, a média das estimativas dos efeitos de dominância para os sete cruzamentos nos ambientes sob alto P ($11,96 \text{ kg ha}^{-1}$) foi três vezes superior à observada sob baixo P no solo ($3,81 \text{ kg ha}^{-1}$). Estes dados mostram que o ambiente influenciou a herança do caráter quantidade de P total na parte aérea da planta, aumentando a importância relativa da dominância nos ambientes sob alto P no solo.

Quanto aos efeitos epistáticos detectados em três cruzamentos nos ambientes sob baixo P, os mesmos foram de tipos distintos (aditivo x aditivo, aditivo x dominante e dominante x dominante), sendo que dois deles tiveram sinal positivo (correspondendo aos cruzamentos

eficientes ao P L3xCateto e 228-3x22) e um deles negativo (cruzamento ineficiente ao P Cateto x 53). A média da magnitude dos efeitos epistáticos (em módulo) foi de $6,72 \text{ kg ha}^{-1}$, sendo este valor quase duas vezes superior à média das estimativas de “d” sob baixo P no solo ($3,81 \text{ kg ha}^{-1}$), indicando que efeitos epistáticos (quando detectados), foram os mais importantes sobre a média do caráter FTOT em ambientes sob baixo P no solo e que estes não foram detectados sob alto P no solo.

Cruzamentos eficientes e ineficientes ao P mostraram média das estimativas de efeitos aditivos semelhantes sob baixo ou alto P no solo. Nos ambientes sob baixo P no solo, a média das estimativas dos efeitos de dominância nos cruzamentos eficientes ($4,61 \text{ kg ha}^{-1}$) foi 1,68 vezes superior à observada nos cruzamentos ineficientes ($2,74 \text{ kg ha}^{-1}$). Situação oposta foi observada sob alto P no solo onde a média das estimativas de dominância dos cruzamentos ineficientes ($14,54 \text{ kg ha}^{-1}$) foi 1,45 vezes superior à média dos cruzamentos eficientes ao P ($10,02 \text{ kg ha}^{-1}$), conforme mostrado na Tabela 29.

Os dados acima mostraram que: a) para a herança do caráter quantidade de P total na parte aérea da planta, efeitos de dominância foram muito superiores aos efeitos aditivos e isto ocorreu de forma mais pronunciada nos ambientes sob alto P, indicando que o ambiente afetou a herança deste caráter; b) nos ambientes sob baixo P efeitos epistáticos (quando detectados) foram quase duas vezes mais importantes que efeitos de dominância sobre a média do caráter, sendo positivos nos cruzamentos eficientes e negativo no cruzamento ineficiente ao P; c) as médias das estimativas de dominância sob baixo P no solo foram superiores nos cruzamentos eficientes ao P, enquanto nos ambientes sob alto P foi verificada situação oposta. Com base nestas informações pode-se inferir que o caráter FTOT deve ser avaliado em cruzamentos, sendo que avaliações feitas em progênies endogâmicas ou linhagens “per se” devem ser de pouca utilidade, devido à alta importância dos efeitos não aditivos na expressão deste caráter, que ocorre tanto sob baixo quanto sob alto P no solo.

Gorz et al., (1987) reportam superioridade de efeitos de dominância em relação aos aditivos na expressão do caráter acumulação de P em sorgo. Estes autores estudaram a herança da acumulação de 12 minerais em forragem de sorgo, utilizando um dialelo entre 7 linhagens fêmea e 7 linhagens macho. Os únicos elementos onde os efeitos de capacidade específica de combinação foram superiores aos de capacidade geral foram fósforo, cloro e ferro no grupo de linhagens fêmeas e enxofre e cloro entre as linhagens macho.

2.3.4.1.5 Efeitos gênicos: eficiência de absorção de P (EFABS)

Para EFABS (relação entre quantidade de P total na parte aérea da planta dividida pela quantidade de P disponível no solo), as estimativas de “d” foram significativas em todos os cruzamentos, exceto Catetox53 nos ambientes BP e BP+AP e L228-3x22 nos ambientes BP+AP. Os sinais das estimativas de “d” foram positivos em 20 dos 21 modelos (sete cruzamentos e três grupos de ambientes), indicando que efeitos de dominância contribuíram no sentido de aumentar a média de eficiência de absorção. As estimativas de “a” foram significativas em seis cruzamentos sob baixo P e em apenas dois cruzamentos sob AP. Os coeficientes de determinação dos modelos (R^2) variaram de 0,75 a 0,99 nos três grupos de ambientes (Tabela 24). O modelo aditivo-dominante foi suficiente para explicar a variação observada entre médias de gerações para quatro dos sete cruzamentos nos ambientes sob baixo P e em todos os cruzamentos nos ambientes sob alto P.

A média das estimativas de “m” nos sete cruzamentos foi cerca de duas vezes superior nos ambientes sob baixo P no solo (28,16 kg de P absorvidos para cada cem kg de P disponível no solo), comparada àquela verificada nos ambientes sob alto P no solo (13,39 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$). A média das estimativas dos efeitos de dominância foram superiores à média dos efeitos aditivos sob baixo P no solo ($d/a=3,67$), sendo este efeito ainda mais marcante sob alto P no solo ($d/a=10,40$).

A média das estimativas dos efeitos aditivos para EFABS (Tabela 29) nos ambientes sob baixo P (4,31 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$) foi cerca de três vezes superior à observada nos ambientes sob alto P no solo (1,39 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$), enquanto a média das estimativas dos efeitos de dominância não variou entre ambientes (15,83 e 14,46 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$ sob baixo e alto P respectivamente). Quanto aos efeitos epistáticos nos ambientes sob baixo P, os mesmos foram detectados em dois cruzamentos eficientes ao P (L3xCateto e L228-3x22) sendo do tipo aditivo x dominante no primeiro e dominante x dominante no segundo, os dois de sinal positivo. No cruzamento ineficiente ao P (Catetox53) a epistasia foi do tipo aditiva x aditiva e de sinal negativo. Estes resultados indicam que efeitos epistáticos contribuíram para aumentar a média do caráter EFABS nos cruzamentos eficientes e para reduzir a média deste caráter no cruzamento ineficiente ao P. A média das estimativas destes efeitos epistáticos (em módulo) nos ambientes sob baixo P foi cerca de duas vezes superior à média das estimativas dos efeitos de dominância (29,65 e 15,83 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$ respectivamente), indicando que efeitos epistáticos (quando detectados), foram mais

importantes do que efeitos de dominância nestes ambientes. Efeitos epistáticos não foram detectados nos ambientes sob alto P no solo. Estes resultados indicam que, apesar dos efeitos não aditivos (dominância e epistasia sob baixo P no solo e dominância sob alto P no solo) serem os mais importantes sobre a média deste caráter, a contribuição dos efeitos aditivos para EFABS foi relativamente maior nos ambientes sob baixo P do que nos ambientes sob alto P no solo.

Cruzamentos classificados como eficientes e ineficientes ao P mostraram média das estimativas do parâmetro “m” semelhantes nos ambientes sob baixo e alto P, o mesmo ocorrendo com a média das estimativas dos efeitos aditivos (a). Nos ambientes sob baixo P no solo, a média das estimativas de “d” para os cruzamentos eficientes ($18,72 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$) foi 1,56 vezes superior à verificada para os cruzamentos ineficientes ($11,98 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$), sendo que, situação oposta foi verificada nos ambientes sob alto P onde, a média das estimativas de “d” dos cruzamentos ineficientes ao P ($17,61 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$) foi 1,46 vezes superior à verificada nos cruzamentos eficientes ($12,10 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$).

Analisados em conjunto estes resultados indicam que, avaliação para eficiência de absorção de P deve ser feita em cruzamentos (e não em progênies/linhagens “per se”), e isto é válido tanto para ambientes sob baixo P quanto para ambientes sob alto P no solo.

Coltman et al., (1987) utilizando um cruzamento entre linhagens de tomate diferindo quanto à sua capacidade de absorção de P, encontraram que efeitos de dominância foram os mais importantes no controle desta característica.

2.3.4.1.6 Efeitos gênicos: eficiência de utilização de P (EFUTIL)

Para EFUTIL (unidades de matéria seca de grãos produzida por unidade de P na parte aérea da planta), as estimativas dos parâmetros “a” e “d” foram significativas em todos os cruzamentos, exceto para “a” nos cruzamentos L36xCateto sob baixo P no solo e L3x53 sob alto P no solo. Os sinais das estimativas de “d” foram sempre positivos, indicando que efeitos de dominância contribuíram no sentido de aumentar a média do caráter. Os coeficientes de determinação dos modelos (R^2) variaram de 0,85 a 0,99 nos três grupos de ambientes (Tabela 25). Efeitos epistáticos foram identificados em todos os sete cruzamentos nos ambientes sob baixo P no solo e não foram detectados em nenhum dos cruzamentos nos ambientes sob alto P no solo.

A média das estimativas de “m” para EFUTIL foi 1,25 vezes superior nos ambientes sob alto P (202,75 kg de massa seca de grãos produzidos por kg de P na parte aérea da planta) do que nos ambientes sob baixo P no solo (161,66 kgkg⁻¹). A média das estimativas dos efeitos de dominância foram superiores à media das estimativas dos efeitos aditivos sob alto P no solo (d/a=3,71) e de forma mais marcante nos ambientes sob baixo P no solo (d/a=6,18).

A média das estimativas dos efeitos aditivos e dominantes (Tabela 29) foram respectivamente 1,67 e 2,78 vezes mais altas nos ambientes sob baixo P no solo (a=65,68 e d=405,28 kgkg⁻¹), do que nos ambientes sob alto P no solo (a=39,31 e d=145,90 kgkg⁻¹ respectivamente).

Quanto aos efeitos epistáticos, detectados somente sob baixo P no solo, os mesmos foram observados em todos os sete cruzamentos, sendo sempre do tipo dominante x dominante e apenas o cruzamento L3x36 mostrou além deste efeito, epistasia do tipo aditivo x dominante. O sinal das estimativas destes efeitos epistáticos foram sempre negativos, indicando que os mesmos contribuíram de forma a reduzir a média deste caráter e indicando a presença de combinações gênicas desfavoráveis nos cruzamentos entre estas linhagens para EFUTIL de P, as quais foram expressas em suas gerações. O valor médio (em módulo) das oito estimativas de efeitos epistáticos nos ambientes sob baixo P (166,98 kgkg⁻¹) foi cerca de 2,5 vezes menor que a média das estimativas dos efeitos de dominância nestes ambientes (405,28 kgkg⁻¹).

Estes resultados indicam que: efeitos não aditivos (dominância seguida de epistasia nos ambientes sob baixo P e dominância nos ambientes sob alto P) foram mais importantes sobre a média do caráter EFUTIL; sob baixo P no solo, a média das estimativas de “a” e de “d” aumentaram quase duas e três vezes respectivamente em relação à média verificada nos ambientes sob alto P. Este fato fez com que efeitos de dominância fossem ainda mais importantes que os efeitos aditivos nos ambientes sob baixo P no solo do que nos ambientes sob alto P no solo (Tabela 29).

Cruzamentos eficientes e ineficientes ao P tiveram médias das estimativas de “m” próximas tanto nos ambientes sob baixo P (172,92 e 146,64 kgkg⁻¹), quanto nos ambientes sob alto P no solo (209,17 e 194, 18 kgkg⁻¹). A média das estimativas de “a” para EFUTIL nos cruzamentos eficientes foi cerca de duas vezes superior à verificada nos cruzamentos ineficientes e isto ocorreu tanto nos ambientes sob baixo P (87,11 e 36,87 kgkg⁻¹ respectivamente), quanto nos ambientes sob alto P no solo (48,70 e 26,78 kgkg⁻¹). Da mesma forma, a média das estimativas de

“d” nos cruzamentos eficientes foi superior à verificada nos cruzamentos ineficientes e isto ocorreu tanto sob baixo P no solo (1,14 vezes), quanto sob alto P no solo (1,54 vezes).

Do ponto de vista do melhoramento, os resultados do estudo de herança do caráter eficiência de utilização de P, indicam que este deve preferencialmente ser avaliado em cruzamentos, sendo que, caso avaliações do mesmo venham a ser feitas em progênies no início do processo de extração de linhagens (S_1 ou S_2) estas devem ser realizadas em ambientes sob alto P no solo.

Gabelman e Gerloff (1983) estudaram a genética da eficiência na utilização de P (mg de matéria seca produzida por mg de P na planta) em feijão. Dois genitores com alta e baixa eficiência na utilização de P (467 e 734 mg de matéria seca de parte aérea por mg de P na parte aérea), e dois genitores intermediários na utilização de P (617 e 625 mgmg^{-1}), seus F_1 , F_2 e retrocruzamentos foram utilizados para estudar a genética desta característica. As magnitudes dos efeitos de dominância e de epistasia foram superiores àquelas obtidas para os efeitos aditivos em todos os cruzamentos avaliados, concordando com o verificado no presente estudo.

2.3.4.1.7 Efeitos gênicos: eficiência de uso de P (EFUSO)

Para EFUSO (unidades de matéria seca de grãos produzida por unidade de P disponível no solo), as estimativas do parâmetro “d” foram significativas em todos os cruzamentos e ambientes e as estimativas de “a” foram significativas em cinco dos sete cruzamentos sob baixo P no solo e em seis cruzamentos nos ambientes AP e AP+BP. Os sinais das estimativas de “d” foram sempre positivos, indicando que efeitos de dominância parecem contribuir de forma unidirecional no sentido de aumentar a média deste caráter. Os coeficientes de determinação dos modelos (R^2) ficaram acima de 0,93 (Tabela 26). O modelo aditivo-dominante foi suficiente para explicar a variação observada entre médias de gerações em quatro dos sete cruzamentos tanto nos ambientes sob baixo P quanto nos ambientes sob alto P no solo.

A média das estimativas de “m” para EFUSO foi quase duas vezes superior nos ambientes sob baixo P (54,77 kg de massa seca de grãos produzidos por kg de P disponível no solo), do que sob alto P no solo (24,79 kgkg^{-1}). A média das estimativas dos efeitos de dominância foi muito superior à média das estimativas dos efeitos aditivos sob baixo P no solo ($d/a=5,50$) e principalmente sob alto P no solo ($d/a=10,28$).

A média das estimativas dos efeitos aditivos (Tabela 29) foi cerca de três vezes superior nos ambientes sob baixo P ($19,24 \text{ kgkg}^{-1}$) em relação aos ambientes sob alto P ($6,23 \text{ kgkg}^{-1}$), enquanto a média das estimativas dos efeitos de dominância foram quase duas vezes superiores sob baixo P no solo ($105,86 \text{ kgkg}^{-1}$) do que sob alto P no solo ($64,05 \text{ kgkg}^{-1}$).

A média das estimativas de “m” nos cruzamentos eficientes e ineficientes foi semelhante sob alto P no solo ($25,57$ e $23,74 \text{ kgkg}^{-1}$) e 1,35 vezes superior para os cruzamentos eficientes ($61,91 \text{ kgkg}^{-1}$) em relação aos cruzamentos ineficientes ($45,25 \text{ kgkg}^{-1}$) nos ambientes sob baixo P no solo. Estes dados indicam que a classificação dos genótipos em eficientes e ineficientes está de acordo com os conceitos de eficiência propostos por Gourley, Allan e Russelle, 1993.

A média das estimativas dos efeitos aditivos nos cruzamentos eficientes e ineficientes ao P foi próxima nos ambientes sob alto P ($6,72$ e $5,58 \text{ kgkg}^{-1}$). Já nos ambientes sob baixo P no solo, a média dos cruzamentos eficientes ($26,14 \text{ kgkg}^{-1}$) foi quase três vezes superior à observada nos cruzamentos ineficientes ($10,05 \text{ kgkg}^{-1}$), indicando maior importância relativa de efeitos aditivos para EFUSO nos cruzamentos eficientes do que nos cruzamentos ineficientes (Tabela 29). Os efeitos de dominância não variaram muito entre cruzamentos eficientes e ineficientes, nos dois grupos de ambientes.

Efeitos epistáticos sob baixo P foram detectados em três cruzamentos, sendo dois deles classificados como eficientes (L3x22 e L3xCateto) e um deles classificado como ineficiente ao P (L3x53). Dois destes efeitos foram do tipo aditivo x dominante e um deles do tipo dominante x dominante. Todos mostraram sinal positivo, indicando que os mesmos contribuíram de forma a aumentar a média do caráter e indicam a presença de combinações gênicas favoráveis nos cruzamentos entre estas linhagens as quais foram expressas em suas gerações. A média das estimativas dos efeitos epistáticos sob baixo P no solo ($125,38 \text{ kgkg}^{-1}$) foi próxima à verificada para os efeitos de dominância nestes ambientes ($105,86 \text{ kgkg}^{-1}$). Nos ambientes sob alto P no solo, efeitos epistáticos foram detectados em dois cruzamento eficientes ao P (L3xCateto e L228-3x22) e em um cruzamento ineficiente (L36xCateto), sendo que somente o cruzamento L228-3x22 mostrou sinal negativo para este efeito. A média das estimativas (em módulo) dos efeitos epistáticos sob alto P no solo ($35,66 \text{ kgkg}^{-1}$) foi quase duas vezes menor que a média das estimativas de dominância ($64,05 \text{ kgkg}^{-1}$), indicando que nos ambientes sob alto P o principal efeito gênico afetando a média do caráter EFUSO foi a dominância.

Os resultados acima mostraram então que, as médias de eficiência de uso são predominantemente influenciadas por efeitos não aditivos (sendo que estimativas de dominância e epistasia mostraram magnitude semelhante sob baixo P no solo e dominância foi superior à epistasia nos ambientes sob alto P no solo). Estes dados indicaram ainda que o ambiente e o tipo de cruzamento influenciaram a expressão dos efeitos aditivos, que foram relativamente mais altos nos ambientes sob baixo P do que nos ambientes sob alto P no solo e nos cruzamentos eficientes em relação aos cruzamentos ineficientes. Do ponto de vista do melhoramento, o caráter EFUSO deve então ser avaliado em cruzamentos, não fazendo sentido a avaliação de progênies “per se” em nenhum dos grupos de ambientes.

Efeitos epistáticos tem sido detectados em caracteres ligados à eficiência de uso de P em arroz. Neste sentido, Hu et al., (2001) encontraram que efeitos epistáticos foram de grande importância no controle da produção de enzimas do tipo fosfatases ácidas em ambientes com e sem estresse de P, sendo que o controle genético nestas duas condições foi relacionado à diferentes QTLs.

Fawole et al., (1982) estudaram a herança da eficiência ao P em feijão sob baixo P no meio, utilizando uma linhagem eficiente, três linhagens moderadamente ineficientes e uma linhagem ineficiente ao P e avaliando em solução nutritiva com baixo P as gerações P₁, P₂, F₁, F₂, RC₁-P₁ e RC₁-P₂ para 6 cruzamentos. Os autores concluíram que, as magnitudes dos efeitos de dominância ou epistasia foram superiores àquelas obtidas para os efeitos aditivos em todos os cruzamentos avaliados. Resultados semelhantes tem sido verificados para estudos de eficiência no uso de diferentes nutrientes em tomate, tais como nitrogênio (O’SULLIVAN et al., 1974), fósforo (COLTMAN et al., 1987) e potássio (MAKMUR; GERLOF; GABELMAN, 1978).

Como efeitos de dominância e epistasia foram muito importantes na herança da eficiência a P em feijão, Fawole et al., (1982) concluíram que, avanços mais rápidos na incorporação desta característica em programas de melhoramento, seriam obtidos utilizando métodos como os de pedigree e retrocruzamentos. Schettini et al., (1987), citado por Clark e Duncan (1991) reportam que, o método de retrocruzamentos visando transferência de eficiência ao P de germoplasma exótico para germoplasma melhorado de feijão se mostrou bastante eficiente.

2.3.4.1.8 Efeitos gênicos: índice de colheita de P (ICP)

Para ICP (quantidade de P nos grãos dividida pela quantidade de P na parte aérea), as estimativas do parâmetro “d” foram significativas em todos os cruzamentos e grupos de ambientes e as estimativas de “a” foram significativas em cinco cruzamentos sob BP, quatro sob AP e cinco cruzamentos em BP + AP. Dos cinco cruzamentos com efeitos não significativos de “a” nos ambientes BP e AP, quatro ocorreram em cruzamentos ineficientes. Os sinais das estimativas de “d” foram sempre positivos, indicando que efeitos de dominância contribuíram no sentido de aumentar a média deste caráter. Efeitos epistáticos foram detectados em todos os cruzamentos sob baixo P no solo e em três dos sete cruzamentos sob alto P no solo. Os coeficientes de determinação dos modelos (R^2) ficaram acima de 0,86 (Tabela 27).

A média das estimativas de “m” para ICP nos sete cruzamentos foi semelhante nos ambientes sob baixo P (44,84 kg de P nos grãos por 100 kg de P na parte aérea) e nos ambientes sob alto P (55,72 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$). A média das estimativas dos efeitos de dominância foram superiores à média dos efeitos aditivos sob baixo P no solo ($d/a=5,80$) e sob alto P no solo ($d/a=4,95$).

A média das estimativas dos efeitos aditivos para ICP nos ambientes sob baixo P (12,40 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$) foi cerca de duas vezes superior à observada nos ambientes sob alto P no solo (6,74 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$), o mesmo sendo verificado com a média das estimativas dos efeitos de dominância nestes ambientes (71,97 e 33,37 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$ sob baixo e alto P respectivamente).

Quanto aos efeitos epistáticos para ICP, detectados nos ambientes sob baixo P, os mesmos foram observados em todos os sete cruzamentos, sendo todos do tipo dominante x dominante e os cruzamento L3xCateto e L3x36 mostraram além deste efeito, epistasia do tipo aditivo x dominante. O sinal das estimativas destes efeitos epistáticos sob baixo P foram sempre negativos, indicando que os mesmos contribuíram de forma a reduzir a média deste caráter e indicam a presença de combinações gênicas desfavoráveis nos cruzamentos entre estas linhagens para ICP, as quais foram expressas em suas gerações. O valor médio (em módulo) das nove estimativas de efeitos epistáticos nos ambientes sob baixo P (36,54 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$) foi cerca de duas vezes menor que a média das estimativas dos efeitos de dominância nestes ambientes (71,97 $\text{kgkg}^{-1}\times 10^2$). Nos ambientes sob alto P efeitos epistáticos foram detectados em três cruzamentos, sendo que todos eles foram do tipo dominante x dominante, e dois destes cruzamentos tiveram além deste tipo de

efeito, epistasia do tipo aditivo x dominante. Da mesma forma como observado sob baixo P, o sinal das estimativas de todos os efeitos epistáticos sob alto P foram também negativos. O valor médio (em módulo) das cinco estimativas de efeitos epistáticos nos ambientes sob alto P ($26,09 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$) foi próximo da média das estimativas dos efeitos de dominância nestes ambientes ($33,37 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$).

Cruzamentos classificados como eficientes e ineficientes ao P mostraram média das estimativas do parâmetro “m” semelhantes nos ambientes sob baixo e alto P, o mesmo ocorrendo para a média das estimativas do parâmetro “d” nos ambientes sob baixo P no solo. A média das estimativas de “d” dos cruzamentos eficientes ao P nos ambientes sob alto P no solo (Tabela 29) foi cerca de duas vezes superior à verificada nos cruzamentos ineficientes ($44,44$ e $18,60 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$ respectivamente). A média das estimativas dos efeitos aditivos nos cruzamentos eficientes foi cerca de três vezes superior à verificada para os cruzamentos ineficientes e isto ocorreu tanto sob baixo P no solo ($18,06$ e $4,86 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$ respectivamente), quanto nos ambientes sob alto P no solo ($9,66$ e $2,84 \text{ kgkg}^{-1} \times 10^2$).

Analisados em conjunto estes resultados indicam que: avaliação para índice de colheita de P deve ser feita em cruzamentos (e não em progênies/linhagens “per se”), e isto é válido tanto em ambientes sob baixo P quanto em ambientes sob alto P no solo; o ambiente afetou a herança do caráter com estimativas de “a” e de “d” sendo superiores nos ambientes sob baixo P no solo; cruzamentos eficientes tenderam a mostrar maior magnitude de efeitos aditivos em relação a cruzamentos ineficientes, e isto ocorreu nos dois grupos de ambientes.

2.3.4.1.9 Efeitos gênicos: quociente de utilização de P (QUTIL)

Para QUTIL (unidades de matéria seca de grãos produzida por unidade de P nos grãos), as estimativas do parâmetro “d” foram significativas em todos os cruzamentos e grupos de ambientes (exceto para Catetox53 no ambiente sob alto P) e as estimativas de “a” foram significativas em seis cruzamentos sob BP, quatro sob AP e seis cruzamentos nos ambientes BP+AP. Os sinais das estimativas de “d” foram sempre positivos, indicando que os efeitos de dominância contribuíram no sentido de aumentar a média do caráter. O modelo aditivo-dominante foi suficiente para explicar a variação observada entre as médias das gerações em

cinco dos sete cruzamentos sob baixo P no solo e em todos os cruzamentos sob alto P no solo. Os coeficientes de determinação dos modelos (R^2) variaram de 0,67 a 0,96 (Tabela 28).

A média das estimativas dos efeitos de dominância foram superiores à média das estimativas dos efeitos aditivos tanto sob alto P no solo ($d/a=2,60$) e principalmente sob baixo P no solo ($d/a=5,91$). A média das estimativas de “m” para QUTIL foram próximas nos ambientes sob baixo P (395,28 kg de massa seca de grãos produzidos por kg de P nos grãos) e nos ambientes sob alto P no solo (414,58 kgkg^{-1}). Da mesma forma, as média das estimativas dos efeitos aditivos também foram semelhantes nos ambientes sob baixo e alto P no solo (43,44 e 41,15 kgkg^{-1} respectivamente). Já as estimativas dos efeitos de dominância foram cerca de duas vezes superiores nos ambientes sob baixo P do que nos ambientes sob alto P no solo (256,85 e 107,16 kgkg^{-1} respectivamente). Estes resultados indicam que o ambiente afetou a herança do caráter QUTIL, principalmente via aumento dos efeitos de dominância nos ambientes sob baixo P em relação aos ambientes sob alto P no solo.

Quanto aos efeitos epistáticos, detectados somente em dois cruzamentos sob baixo P no solo, os mesmos foram observados em cruzamentos eficientes ao P, tiveram sinal negativo e mostraram magnitude média (em módulo) de 243,11 kgkg^{-1} , valor este semelhante à média das estimativas dos efeitos de dominância nestes ambientes (256,85 kgkg^{-1}).

Estes resultados indicam que: efeitos não aditivos (dominância seguida de epistasia nos ambientes sob baixo P e dominância nos ambientes sob alto P) foram mais importantes sobre a média do caráter QUTIL; efeitos de dominância foram mais importantes nos ambientes sob baixo P no solo do que nos ambientes sob alto P no solo (Tabela 29).

Cruzamentos eficientes e ineficientes ao P tiveram médias das estimativas de “m” próximas tanto nos ambientes sob baixo P (406,86 e 379,85 kgkg^{-1}), quanto nos ambientes sob alto P no solo (429,93 e 394,12 kgkg^{-1}). A média das estimativas de “a” para QUTIL foram semelhantes entre cruzamentos eficientes e ineficientes e isto ocorreu tanto sob baixo P no solo (44,52 e 42,01 kgkg^{-1} respectivamente), quanto sob alto P no solo (37,73 e 45,72 kgkg^{-1}). Já a média das estimativas de “d” nos cruzamentos eficientes foi superior à verificada nos cruzamentos ineficientes e isto ocorreu tanto sob baixo P no solo (1,59 vezes), quanto sob alto P no solo (1,87 vezes).

Do ponto de vista do melhoramento, os resultados do estudo de herança do caráter quociente de utilização de P, indicam que este deve preferencialmente ser avaliado em

cruzamentos, sendo que, caso avaliações do mesmo venham a ser feitas em progênieis no início do processo de extração de linhagens (S_1 ou S_2) estas devem ser realizadas em ambientes sob alto P no solo.

2.3.4.2 Estimativas de efeitos gênicos de caracteres de resposta ao P

Caracteres de resposta ao P são obtidos como relações entre dados obtidos nos ambientes sob baixo e alto P no solo, não sendo aplicável então comparações entre ambientes para os mesmos. Para cada um destes caracteres são mostrados: a) médias para cada uma das gerações P_1 , P_2 , F_1 , F_2 , RC_1P_1 , RC_1P_2 , RC_2P_1 , RC_2P_2 ; b) estimativas e significância dos parâmetros do modelo ajustado (m , a , d , aa , ad , dd); c) ajuste do modelo, verificado tanto pelo R^2 quanto pelo χ^2 (Tabelas 30 a 34).

2.3.4.2.1 Efeitos gênicos: diferença de peso de grãos entre níveis de P (DIFPG)

Para diferença de peso de grãos entre níveis alto e baixo de P no solo foi verificado que, o modelo aditivo-dominante foi suficiente para explicar a variação observada entre médias de gerações para todos os cruzamentos, com coeficientes de determinação dos modelos (R^2) variando de 0,41 a 0,97 (Tabela 30). Estimativas dos efeitos de dominância (“d”) foram todas significativas e de sinal positivo, indicando que a dominância atuou no sentido de aumentar a média deste caráter. Já as estimativas dos efeitos aditivos para DIFPG foram na sua maioria não significativas, exceto para um cruzamento (L36xCateto).

A média das estimativas dos parâmetros “m”, “a” e “d” foram respectivamente, 1.235 kg ha^{-1} , 239 kg ha^{-1} e 3.195 kg ha^{-1} , indicando que estimativas dos efeitos de dominância foram muito superiores às verificadas para os efeitos aditivos. Estimativas de “m” entre cruzamentos eficientes e ineficientes ao P para DIFPG foram semelhantes (1.303 e 1.146 kg ha^{-1} respectivamente), sendo que cruzamentos ineficientes mostraram média das estimativas de efeitos de dominância 1,21 vezes superior à verificada nos cruzamentos eficientes ao P (3.545 e 2.933 kg ha^{-1}).

Com respeito à estimativas de parâmetros genéticos para o caráter DIFPG pode-se concluir que: a) efeitos aditivos foram de pouca importância sobre a média deste caráter; b) dominância é de grande importância na herança deste caráter e foi positiva em todos os cruzamentos; c) não

foram detectados efeitos epistáticos. Desta forma, o caráter DIFPG deveria ser avaliado em cruzamentos, não sendo indicada sua avaliação em progênies ou linhagens “per se”.

2.3.4.2.2 Efeitos gênicos: relação entre peso de grãos nos níveis baixo e alto de P (RELPG)

Para a relação de peso de grãos entre níveis baixo e alto de P observou-se que, o modelo aditivo-dominante foi suficiente para explicar a variação observada entre médias de gerações em todos os cruzamentos e os coeficientes de determinação dos modelos (R^2) variaram 0,40 a 0,87 (Tabela 31). O único parâmetro onde as estimativas foram significativas em todos os sete cruzamentos foi “m”, sendo que estimativas de efeitos aditivos (a) foram significativas em três cruzamentos (dois eficientes e um ineficiente ao P), enquanto estimativas de “d” foram não significativas em todos os cruzamentos, indicando que efeitos de dominância foram pouco importantes na expressão deste caráter. A média das estimativas dos parâmetros “m” e “a” foram muito semelhantes entre cruzamentos eficientes ao P (52,77 e 8,37 kg de grãos produzidos sob baixo P para cada 100 kg de grãos produzidos sob alto P) e cruzamentos ineficientes ao P (49,45 e 8,88 $\text{kgkg}^{-1} \times 10^2$).

Com respeito à estimativas de parâmetros genéticos para o caráter RELPG pode-se concluir que: a) estimativas dos efeitos de dominância foram não significativas em todos os cruzamentos, e efeitos epistáticos não foram detectados em nenhum dos cruzamentos, indicando que efeitos não aditivos são de pouca importância sobre a média deste caráter; b) cruzamentos eficientes e ineficientes mostraram estimativas de “m” e de “a” semelhantes.

Desta forma, de maneira geral, com base no fato de que efeitos não aditivos foram de pouca importância sobre a média do caráter RELPG, pode-se concluir que o mesmo poderia vir a ser avaliado em linhagens “per se” ou em progênies endogâmicas.

2.3.4.2.3 Efeitos gênicos: eficiência de recuperação aparente de P (EFREC)

Para EFREC (relação entre a diferença da quantidade total de P na planta entre níveis de P, dividida pela diferença entre o P disponível no solo nos ambientes sob alto e baixo P), observa-se que, o modelo aditivo-dominante foi suficiente para explicar a variação observada entre médias de gerações para quatro dos sete cruzamentos, sendo detectados efeitos epistáticos em três

cruzamentos. Os coeficientes de determinação dos modelos (R^2) variaram de 0,48 a 0,99 (Tabela 32). As estimativas do parâmetro “d” foram significativas em cinco dos sete cruzamentos, sendo todas de sinal positivo. As estimativas de “a” foram não significativas em todos os cruzamentos. Estimativas de efeitos epistáticos foram significativas em três cruzamentos (dois eficientes e um ineficiente ao P), sendo todas de sinal negativo, indicando que estes efeitos contribuíram para reduzir a média deste caráter e que combinações gênicas desfavoráveis para EFREC devem estar presentes nos cruzamentos entre estas linhagens.

As médias das estimativas dos parâmetros “m”, “d” e efeitos epistáticos (em módulo) foram 9,10 e 20,89 e 21,78 kgkg^{-1} respectivamente, indicando grande importância dos efeitos de dominância sobre a média deste caráter e que a média das estimativas de efeitos epistáticos foram de magnitude semelhante e de sinal oposto ao observado nas estimativas dos efeitos de dominância. A média das estimativas de “m” e de “d” foram semelhantes entre cruzamentos eficientes (8,72 e 21,48 kgkg^{-1} respectivamente) e cruzamentos ineficientes ao P (9,60 e 20,11 kgkg^{-1} respectivamente). Estes dados indicam que o caráter EFREC deve ser avaliado em cruzamentos, não fazendo sentido avaliar o mesmo em progênies ou linhagens “per se”.

2.3.4.2.4 Efeitos gênicos: eficiência fisiológica de P (EFIS)

Para EFIS (quantidade de grãos produzida por unidade adicional de P na planta entre níveis alto e baixo de P no solo), observa-se que, o modelo aditivo-dominante foi suficiente para explicar a variação observada entre médias de gerações para todos os cruzamentos, e os coeficientes de determinação (R^2) variaram de 0,41 a 0,93 (Tabela 33). As estimativas do parâmetro “a” foram significativas em três dos sete cruzamentos, e as estimativas do parâmetro “d” também foram significativas em três dos sete cruzamentos.

A média das estimativas de “m”, “a” e “d” foram respectivamente 234,46 40,38 e 93,30 kgkg^{-1} , indicando que efeitos de dominância foram em média, cerca de duas vezes superiores aos efeitos aditivos nos cruzamentos estudados.

A média das estimativas de “m” nos cruzamentos eficientes e ineficientes foi semelhante (239,73 e 227,43 kgkg^{-1} respectivamente), enquanto a média das estimativas de “a” foi quase duas vezes superior nos cruzamentos ineficientes ao P (53,35 kgkg^{-1}) em relação aos cruzamentos eficientes (30,66 kgkg^{-1}). Situação oposta foi verificada quanto à média das estimativas de “d”

que foram quase duas vezes mais altas nos cruzamentos eficientes ($115,79 \text{ kgkg}^{-1}$) do que nos cruzamentos ineficientes ao P ($63,33 \text{ kgkg}^{-1}$).

Desta forma, com respeito a uma possível estratégia de melhoramento para a característica EFIS, pode-se concluir que métodos que capitalizem mais sobre efeitos de dominância (seleção recorrente recíproca ou avaliação em cruzamentos) seriam os mais indicados.

2.3.4.2.5 Efeitos gênicos: eficiência agrônômica de P (EFAGR)

Para EFAGR (relação entre a diferença da quantidade total de grãos produzida nos níveis alto e baixo de P, dividida pela diferença na quantidade de P disponível no solo nos níveis alto e baixo de P) observa-se que, o modelo aditivo-dominante foi suficiente para explicar a variação observada entre médias de gerações para todos os cruzamentos. Os coeficientes de determinação (R^2) dos modelos variaram de 0,38 a 0,97 (Tabela 34). As estimativas de “d” foram significativas em todos os cruzamentos e tiveram sempre sinal positivo indicando que a dominância atuou no sentido de aumentar a média deste caráter. Somente um dos sete cruzamentos mostrou estimativa de “a” significativa. Não foram observadas grandes diferenças entre as médias das estimativas de “m” e de “d” entre genótipos eficientes ao P ($24,78$ e $43,56 \text{ kgkg}^{-1}$ respectivamente) e genótipos ineficientes ($19,19$ e $59,65 \text{ kgkg}^{-1}$ respectivamente).

Desta forma, pode-se concluir que a característica EFAGR, deve ser avaliada em cruzamentos, sendo de pouca valia a avaliação de linhagens ou progênies “per se” para esta característica em milho.

2.3.5 Correlações fenotípicas

As correlações entre peso de grãos (PG), teor de P nos grãos (TPG), intervalo de florescimento masculino e feminino (ASI), variáveis de eficiência ao P (EFABS, EFUTIL, EFUSO, ICP, QUTIL) e variáveis de resposta ao P (DIFPG, RELPG, EFREC, EFIS, EFAGR) nos ambientes sob baixo P encontram-se na Tabela 35. Na diagonal desta tabela encontram-se as correlações de cada característica com ela mesma, nos ambientes sob baixo e alto P, exceto para as variáveis de resposta ao P que são obtidas via diferenças entre ambientes sob baixo e alto P.

As correlações entre estas variáveis nos ambientes sob alto P no solo são mostradas na Tabela 36.

2.3.5.1 Correlações com o caráter peso de grãos (PG) sob baixo P no solo

A variável PG sob baixo P mostrou correlações altas, e positivas com: eficiência de uso-*EFUSO* ($r=0,87^{**}$) e eficiência de absorção-*EFABS* ($r=0,83^{**}$). Estes dados indicam que, nos ambientes sob baixo P no solo, a variável *EFUSO* pode vir a ser avaliada de forma indireta via avaliação da produção de grãos nestes ambientes. Fox (1978), encontrou correlação muito alta entre produção de massa seca de parte aérea e quantidade de P absorvido em milho ($r=0,96^{**}$). Ozturk et al., (2005), reportam correlação alta e positiva entre quantidade de P total na parte aérea e massa seca de parte aérea ($r=0,66^{***}$), para 73 cultivares de trigo.

Correlações médias foram observadas para PG sob baixo P com as variáveis: eficiência de utilização-*EFUTIL* ($r=0,47^{**}$); índice de colheita de P-*ICP* ($r=0,58^{**}$); relação PG entre níveis baixo e alto de P-*RELPG* ($0,69^{**}$) e diferença de florescimento masculino e feminino-*ASI*, sob baixo P ($r=-0,60^{**}$).

Não foi observada correlação significativa entre as variáveis PG e teor de P nos grãos-*TPG* sob baixo P ($r=-0,11$), indicando que, seleção sobre uma delas não deve afetar a outra de forma previsível, nos genótipos estudados. Ausência de correlação entre concentração de P nos grãos (*TPG*) e produção de grãos (*PG*) foi reportada em trigo ($r=0,28$) por Schulthess et al., (1997). Ozturk et al., (2005), verificaram para 73 cultivares de trigo, que a correlação entre teor de P e matéria seca de parte aérea foi negativa e de baixa magnitude. Já Fox (1978) verificou correlação negativa entre *TPG* e *PG* em milho ($r=-0,59^{*}$).

Correlações negativas entre massa seca de parte aérea e concentração de P neste tecido, tem sido reportada em experimentos com milho em solução nutritiva. Halim Wasson e Ellis (1968), citados por Terman, Giordano e Christensen (1975), cresceram 34 linhagens e híbridos simples de milho em solução nutritiva com alto e baixo P por vinte e oito dias, encontrando uma correlação alta e negativa entre peso de parte aérea e concentração de P e Zn na parte aérea. Fox (1978) também encontrou correlação negativa entre massa seca de parte aérea e concentração de P neste tecido em milho ($r=-0,65$). Gorz et al., (1986) reportam correlação alta e negativa entre produção de forragem de sorgo e concentração de P na forragem ($r=-0,74^{**}$).

As correlações entre PG sob baixo P e variáveis relacionadas a resposta ao P foram muito baixas e não significativas (DIFPG $r=-0,04$; EFREC $r=-0,06$; EFIS $r=0,15$; EFAGR $r=-0,01$). Estes dados indicam que o peso de grãos sob baixo P não está relacionado com a capacidade destes genótipos de responderem ao P, indicando que, seleção para eficiência e resposta ao P seriam independentes nos genótipos estudados.

A correlação de PG nos ambientes sob baixo e alto P foi alta e positiva ($r=0,79^{**}$), indicando tendência semelhante dos genótipos de produzirem sob baixo e alto P. Fox (1978) encontrou correlação entre produção de grãos sob alto e baixo P no solo em milho de $r=0,60^{**}$.

Desta forma, pode-se concluir com respeito às correlações entre a variável PG sob baixo P e as demais variáveis que: a) as altas correlações observadas entre PG e as variáveis EFUSO e EFABS nestes ambientes indicam que estas poderiam vir a ser avaliadas de forma indireta via avaliação da produção de grãos sob baixo P; b) seleção para baixos valores de ASI conduzida sob baixo P no solo (devido à correlação média e negativa entre ASI e PG observada nestes ambientes) pode ser útil como critério de seleção adicional para eficiência ao P; c) variáveis ligadas a resposta ao P (DIFPG, EFREC, EFIS, EFAGR), as quais são obtidas via relações entre a produção de grãos em ambientes sob alto e baixo P, em geral não mostraram correlação com PG sob baixo P, indicando que a resposta ao P nos ambientes com alto nível do nutriente, parece ser independente do potencial produtivo sob baixo P. Neste sentido, seleção simultânea para estas duas características nos genótipos estudados, deve ser viável.

Estas conclusões concordam com Ozturk et al., (2005), que afirmam que a avaliação de produção de grãos sob baixo P, seria o critério de seleção mais adequado para buscar genótipos mais eficientes no uso de P neste ambiente. Este ponto tem sido também sugerido em trabalhos com trigo (OSBORNE; RENGEL, 2002), tomate (COLTMAN et al., 1996) e arroz (FAGERIA et al., 1998).

2.3.5.2 Correlações com o caráter peso de grãos (PG) sob alto P no solo

Em geral, nos ambientes sob alto P no solo, o padrão relativo às correlações mais importantes do caráter PG com outros caracteres foi bastante semelhante ao observado sob baixo P no solo. Correlações altas e positivas foram observadas com eficiência de uso-EFUSO ($r=0,99^{**}$) e eficiência de absorção-EFABS ($r=0,82^{**}$). Estes dados indicam que, nos ambientes

sob alto P, da mesma forma como observado sob baixo P, a variável EFUSO pode vir a ser avaliada de forma indireta via avaliação da produção de grãos sob alto P. Correlações médias e positivas foram observadas para PG com as variáveis eficiência de utilização-EFUTIL ($r=0,39^{**}$) e índice de colheita de P-ICP ($r=0,63^{**}$). Da mesma forma como observado sob baixo P, nos ambientes sob alto P no solo não foi verificada correlação entre PG e teor de P nos grãos-TPG ($r=0,05$), indicando que estas duas variáveis são independentes tanto sob baixo quanto sob alto P no solo. Resultados semelhantes foram observados por Rasmusson et al., (1971) que não encontraram correlação entre teor de P nos grãos e produção de grãos em trigo e cevada.

Entretanto, nos ambientes sob alto P no solo, foram verificadas algumas alterações em relação ao padrão de correlações com o caráter PG observado sob baixo P no solo. Nos ambientes sob alto P, a correlação entre PG e ASI foi muito menor que a observada sob baixo P ($r=-0,28^*$ e $r=-0,60^{**}$ respectivamente), indicando que ASI pode vir a ser critério adicional útil para seleção para PG de grãos sob baixo P, mas não sob alto P no solo. Outra correlação com PG que se alterou bastante entre ambientes foi aquela com a variável RELPG que, sob baixo e alto e P foi $r=0,69^{**}$ e $r=-0,10$. Estes dados indicam que, sob baixo P observa-se correlação moderada, positiva e altamente significativa entre a relação da produção de grãos (RELPG) com PG, o que não ocorre sob alto P, indicando que RELPG parece depender mais do PG sob baixo P do que do PG sob alto P no solo.

Outra alteração importante observada no padrão de correlações entre PG e outros caracteres nos ambientes sob baixo e alto P no solo é que, foi verificada tendência clara no sentido de que, as correlações entre PG e variáveis relacionadas à resposta ao P, que haviam sido muito baixas e não significativas sob baixo P, tenderam em geral, sob alto P a serem médias, positivas e altamente significativas. Uma exceção a este fato foi o padrão observado para a correlação PGxEFIS que não se alterou entre ambientes. Estes valores das correlações de PG sob baixo e alto P no solo com os caracteres de resposta ao P foram: DIFPG ($r=-0,04$. e $r=0,54^{**}$); EFREC ($r=-0,06$ e $r=0,52^{**}$); EFIS ($r=0,15$ $r=0,12$); EFAGR ($r=-0,01$ e $r=0,58^{**}$). Estes dados indicam que, caracteres de resposta ao P são influenciados de forma positiva pelo peso de grãos sob alto P, sendo pouco influenciados pelo PG sob baixo P no solo. As alterações na diferença de PG entre níveis altos e baixos de P no solo dependem então muito mais do aumento do PG observados nos ambientes sob alto P do que do PG observado sob baixo.

Desta forma, pode-se concluir com respeito às correlações entre a variável PG e as demais variáveis quando se compara correlações observadas nos ambientes sob baixo e alto P que: a) altas correlações observadas entre PG e as variáveis EFUSO e EFABS tanto sob baixo quanto sob alto P no solo sugerem que nos dois grupos de ambientes, o caráter produção de grãos é um bom indicador da eficiência de uso e da eficiência de absorção em cada um destes grupos de ambientes; b) seleção para baixos valores de ASI (devido à correlação negativa deste com PG) pode ser útil como critério de seleção adicional para eficiência ao P nos ambientes sob baixo P, sendo menos importante nos ambientes sob alto P no solo; c) caracteres ligados à resposta ao P (DIPG, EFREC, EFIS, EFAGR), os quais são obtidos via diferenças entre a produção de grãos entre ambientes sob alto e baixo P no solo, em geral não mostraram correlação com PG sob baixo P. Entretanto estes caracteres mostraram correlações médias, positivas e altamente significativas com PG sob alto P, indicando que nos genótipos e ambientes estudados, a resposta ao P parece ser independente do potencial produtivo sob baixo P, sendo entretanto correlacionada de forma positiva com o potencial produtivo sob alto P.

2.3.5.3 Correlações com o caráter teor de P nos grãos (TPG) sob baixo e alto P no solo

O caráter teor de P nos grãos (TPG) sob baixo P mostrou correlações altas, e negativas com: quociente de utilização-QUTIL ($r=-0,97^{**}$) e eficiência de utilização de P-EFUTIL ($r=-0,82^{**}$). Este fato era esperado já que, por definição, a variável QUTIL é o inverso da variável porcentagem de P nos grãos-FGR (e o teor de P nos grãos é equivalente a $FGR \times 10$), e ainda, a variável eficiência de utilização é função do produto entre QUTIL e o índice de colheita de P (ICP).

A correlação observada entre TPG e ICP nos ambientes sob baixo e alto P foi média, positiva e altamente significativa ($r=0,31^{**}$ e $r=0,52^{**}$), indicando situação favorável para seleção simultânea nestes dois caracteres. Ausência de correlação entre índice de colheita e TPG sob baixo e alto P no solo em trigo ($r=-0,19$ e $r=-0,18$) foi reportada por Batten, Khan e Cullis (1984).

Correlação média e negativa foi observada entre EFUSO sob baixo P e TPG ($r=-0,45^{**}$). A correlação entre teor de P nos grãos sob baixo e alto P foi alta e positiva ($r=0,73^{**}$), indicando tendência semelhante dos genótipos com respeito à sua concentração de P nos grãos sob baixo e alto P no solo.

Conforme seria esperado, como por definição, a variável teor de P nos grãos-TPG (multiplicada por 10^{-1}) é o inverso da variável QUTIL, e como esta última é um dos componentes da eficiência de utilização de P-EFUTIL, tanto sob baixo quanto sob alto P no solo, a variável TPG mostrou correlações altas, negativas e significativas com os caracteres QUTIL ($r=-0,97^{**}$ e $r=-0,97^{**}$ sob baixo e alto P) e EFUTIL ($r=-0,82^{**}$ e $r=-0,77^{**}$).

Comportamento distinto foi observado quanto à correlação entre TPG e EFUSO que sob baixo P foi média e negativa e foi não significativa sob alto P no solo ($r=-0,45^{**}$ e $r=0,03$ respectivamente). Ou seja, seleção para baixo teor de P nos grãos deve afetar de forma positiva a eficiência de uso de P nos ambientes sob baixo P, mas não afeta a EFUSO nos ambientes sob alto P no solo.

2.3.5.4 Correlações entre variáveis de eficiência ao P sob baixo P no solo

As variáveis eficiência de absorção (EFABS) e eficiência de utilização de P (EFUTIL) são os dois componentes básicos da eficiência de uso de P (EFUSO). Não foi observada correlação significativa entre EFABS e EFUTIL sob baixo P ($r=0,20$), indicando que, seleção para uma destas variáveis não deve afetar a outra de forma previsível nestes ambientes, dentro do conjunto de genótipos estudados.

Quanto às correlações observadas com a variável EFABS, podem ser ressaltadas as seguintes: a) alta correlação foi observada com os caracteres peso de grãos-PG ($r=0,83^{**}$), eficiência de uso de P-EFUSO ($r=0,81^{**}$) e relação entre PG nos ambientes sob baixo e alto P-RELPG ($r=0,84^{**}$); b) correlação moderada e negativa foi observada com a variável ASI sob baixo P ($r=-0,51^{**}$); c) correlações médias a baixas e negativas foram observadas com as diversas variáveis ligadas à resposta ao P que foram: DIFPG ($r=-0,38^{**}$), EFAGR ($r=-0,37^{**}$), EFREC ($r=-0,41^{**}$); d) da mesma forma como não foi verificada correlação entre EFABS e EFUTIL, não foi também verificada correlação entre EFABS e os componentes de EFUTIL que

são: QUTIL ($r=-0,02$) e ICP ($r=0,30$); e) baixa correlação foi observada entre EFABS e EFIS ($r=0,22$).

A correlação entre EFABS nos ambientes sob baixo e alto P foi não significativa ($r=0,26$), indicando comportamento distinto dos genótipos quanto à esta variável nos ambientes sob baixo e alto P.

Quanto às correlações observadas com a variável EFUTIL sob baixo P no solo podem ser mencionadas as seguintes: a) alta correlação positiva observada com QUTIL ($r=0,80^{**}$); b) alta correlação negativa observada com teor de P nos grãos-TPG ($r=-0,82^{**}$); c) correlações moderadas e altamente significativas com PG ($r=0,47^{**}$) e EFUSO ($r=0,70^{**}$); d) correlação com o componente índice de colheita de P foi significativa ($r=0,24^*$), mas de magnitude muito inferior à observada com o outro componente da eficiência de utilização, que é o QUTIL ($r=0,80^{**}$); e) correlação moderada e negativa foi observada entre EFUTIL e a variável ASI sob baixo P ($r=-0,52^{**}$); EFUTIL não mostrou correlação com nenhuma das variáveis ligadas à resposta ao P.

A variável EFUTIL mostrou comportamento distinto da variável EFABS quanto à correlação entre ambientes sob baixo e alto P. A correlação da EFUTIL obtida nos ambientes sob baixo e alto P foi alta e positiva ($r=0,84^{**}$), indicando comportamento semelhante dos genótipos quanto à esta variável nos ambientes sob baixo e alto P.

Um sumário dos pontos mais relevantes com respeito às correlações entre as variáveis ligadas a eficiência ao P (EFABS, EFUTIL e EFUSO) nos ambientes sob baixo P no solo seria: a) PG sob baixo P mostrou mais alta correlação com EFABS ($r=0,83^{**}$) e EFUSO ($r=0,87^{**}$) do que com EFUTIL ($r=0,47^{**}$); b) alta correlação negativa foi observada entre EFUTIL e TPG ($r=-0,82^{**}$), indicando que redução no teor de P nos grãos pode ser critério de seleção adequado para aumentar a EFUTIL sob baixo P; c) caráter ASI sob baixo P mostrou correlação média e negativa com EFABS ($r=-0,51^{**}$), EFUTIL ($r=-0,52^{**}$) e EFUSO ($r=-0,62^{**}$); d) EFABS e EFUTIL não mostraram correlação sob baixo P ($r=0,20$); e) correlação entre ambientes sob baixo e alto P no solo foi alta para EFUTIL ($r=0,84^{**}$) e não significativa para EFABS ($r=0,26$); f) correlações entre variáveis de eficiência ao P sob baixo P no solo (EFABS, EFUTIL, EFUSO), com variáveis de resposta ao P (DIFPG, EFREC, EFIS, EFAGR) foram em geral baixas e não significativas; g) a variável de resposta RELPG mostrou correlação alta com EFABS ($r=0,84^{**}$) e EFUSO ($r=0,74^*$) e baixa com EFUTIL ($r=0,27^*$), nos ambientes sob baixo P no solo.

2.3.5.5 Correlações entre variáveis de eficiência ao P sob alto P no solo

O padrão de correlações observado nos ambientes sob alto P para os dois componentes básicos da eficiência de uso de fósforo-EFUSO, que são a eficiência de absorção (EFABS) e eficiência de utilização de P (EFUTIL) foi semelhante ao verificado nos ambientes sob baixo P no solo. Nos ambientes sob alto P também não foi observada correlação significativa entre EFABS e EFUTIL ($r=-0,18$), indicando que, seleção sobre um destes caracteres não deve afetar o outro de forma previsível nem sob baixo P nem sob alto P no solo.

Quanto às correlações observadas para o caráter EFABS, nos ambientes sob alto P, em relação ao observado sob baixo P vale ressaltar que o mesmo padrão de correlações altas e positivas foi observado nos dois grupos de ambientes para: EFABS e PG ($r=0,83^{**}$ e $r=0,82^{**}$ sob baixo e alto P respectivamente); EFABS e eficiência de uso de P-EFUSO ($r=0,81^{**}$ e $r=0,81^{**}$).

Padrão bastante distinto de correlações entre EFABS e outros caracteres nos ambientes sob baixo P foi observado nos ambientes sob alto P no solo. Exemplo disto são as correlações entre EFABS e os caracteres ligados à resposta ao P. Estas correlações, que foram média/baixas e negativas nos ambientes sob baixo P, passaram a ser médias e positivas nos ambientes sob alto P. Exemplo disto pode ser visto nas correlações entre EFABS e: DIFPG ($r=-0,38^{**}$ e $r=0,52^{**}$ sob baixo e alto P respectivamente), EFAGR ($r=-0,37^{**}$ e $r=0,59^{**}$) e EFREC ($r=-0,41^{**}$ e $r=0,66^{**}$). Comportamento distinto foi também observado nas correlações entre EFABS e RELPG nos ambientes sob baixo e alto P ($r=0,84^{**}$ e $r=-0,24$) e entre EFABS e ASI ($r=-0,51^{**}$ e $r=-0,04$). Este último ponto deve ser função do comportamento distinto da correlação ASI com PG observado nos ambientes sob baixo e alto P.

Quanto às correlações observadas para o caráter EFUTIL, nos ambientes sob alto P, em relação ao observado sob baixo P vale ressaltar que: a) o mesmo padrão de correlações altas e positivas entre EFUTIL e QUTIL foi observado nos dois grupos de ambientes ($r=0,80^{**}$ e $r=0,77^{**}$ sob baixo e alto P respectivamente); b) alta correlação negativa foi observada com teor de P nos grãos-TPG ($r=-0,82^{**}$ e $r=-0,77^{**}$); c) correlações médias e positivas foram verificadas com PG ($r=0,47^{**}$ e $r=0,39^{**}$); o padrão de correlação entre EFUTIL e ASI não variou entre grupos de ambientes ($r=-0,52^{**}$ e $r=-0,45^{**}$); não foi observada correlação significativa entre

EFUTIL e eficiência fisiológica-EFIS sob baixo P ($r=-0,04$) e esta correlação foi média e positiva sob alto P ($r=0,38^{**}$).

Alterações na magnitude das correlações para EFUTIL observadas entre ambientes sob baixo e alto P no solo foram verificadas em: correlação EFUTIL x EFUSO que, sob alto P continuaram positivas mas de menor magnitude que a verificada sob baixo P ($r=0,70^{**}$ e $r=0,40^{**}$ respectivamente); correlação com o componente da EFUTIL que é o índice de colheita de P (ICP) que havia sido baixa e significativa sob baixo P, passando a não significativa sob alto P ($r=0,24^*$ e $r=0,11$) e de magnitude muito inferior à observada com o outro componente da eficiência de utilização, que é o QUTIL, cuja correlação com EFUTIL não se alterou entre ambientes ($r=0,80^{**}$ e $r=0,77^{**}$).

2.3.5.6 Correlações entre variáveis de resposta ao P sob baixo P no solo

As variáveis eficiência de recuperação aparente (EFREC) e eficiência fisiológica (EFIS) são os dois componentes básicos da resposta ao P (EFAGR). A correlação entre EFREC e EFIS foi não significativa ($r=-0,35$), indicando que, seleção para uma destas variáveis, não deveria afetar a outra de forma previsível, dentro do conjunto de genótipos estudados.

Quanto às correlações observadas entre a variável EFREC e outras variáveis obtidas nos ambientes sob baixo P, podem ser mencionadas as seguintes: a) alta correlação com a diferença de PG entre níveis de P-DIFPG ($r=0,86^{**}$); b) nenhuma correlação observada com as variáveis: PG ($r=-0,06$); teor de P no grãos-TPG ($r=0,11$) e ASI ($r=0,12$); c) correlação baixa e positiva com índice de colheita de P-ICP ($r=0,37^{**}$); correlações médias e negativas com RELPG ($r=-0,63^{**}$) e EFABS ($r=-0,41^{**}$).

Ponto importante a ser mencionado é que, a alta correlação observada entre EFREC e DIFPG ($r=0,86^{**}$), indica que EFREC poderia ser avaliada de forma indireta pela diferença de produção de grãos entre níveis alto e baixo de P (DIFPG), a qual é simples de ser obtida.

Quanto às correlações observadas entre a variável eficiência fisiológica-EFIS e outras variáveis obtidas nos ambientes sob baixo P, vale ressaltar as seguintes: a) esta variável não mostrou correlação moderada ou alta com nenhuma outra variável, indicando ser bastante distinta das demais variáveis estudadas; b) nenhuma correlação observada entre EFIS e: PG ($r=-0,15$); teor de P no grãos -TPG ($r=-0,04$), EFUTIL ($r=-0,04$) e ASI ($r=-0,06$); c) apesar de EFIS ser um

dos componentes da EFAGR, a correlação entre estas variáveis foi muito baixa ($r=0,08$), indicando que nos genótipos e ambientes estudados, a EFAGR deve estar muito mais baseada na eficiência de recuperação aparente de P (EFREC) do que na EFIS.

Dois caracteres chaves na chamada capacidade de resposta ao P, os quais são simples de serem obtidos são a diferença de peso de grãos entre níveis de P (DIFPG) e a relação entre peso de grão sob baixo e alto P (RELPG). O caráter EFAGR é definido como a relação entre a diferença de peso de grãos entre níveis alto e baixo de P (DIFPG), dividida pela diferença do P disponível no solo entre níveis alto e baixo de P. Como a quantidade de P disponível no solo em um dado ambiente é um valor constante para todos os genótipos, a EFAGR na realidade é equivalente à diferença de PG entre níveis alto e baixo de P (variável DIFPG). Este fato é confirmado pelo coeficiente de correlação extremamente alto ($r=0,99^{**}$), observado entre estas duas variáveis. Desta forma, a variável eficiência agrônômica-EFAGR pode ser substituída pela diferença observada nas médias de PG de cada genótipo entre os níveis alto e baixo de P (DIFPG).

Como os caracteres DIFPG e RELPG são facilmente obtidos, é interessante verificar a correlação existente entre os mesmos e os principais caracteres ligados à eficiência (EFABS, EFUTIL, EFUSO) e resposta ao P (EFREC, EFFIS e EFAGR).

Sob baixo P no solo, o caráter RELPG mostrou correlações altas e positivas com caracteres de eficiência ao P, EFABS ($r=0,84^{**}$) e EFUSO ($r=0,74^{**}$) e baixa correlação com EFUTIL ($r=0,27^*$). Correlações entre RELPG e variáveis de resposta ao P foram em geral média à altas, mas de sinal negativo, como as verificadas com EFAGR ($r=-0,69^{**}$), EFREC ($r=-0,63^{**}$) e não foi observada correlação entre RELPG e EFIS ($r=0,04$). Deve-se mencionar que estas observações concordam com o verificado anteriormente com respeito à análise da variável RELPG nas seis linhagens parentais onde, genótipos não responsivos ao P, como a L22, tenderam a mostrar altos valores de RELPG. Da mesma forma, os dois híbridos menos responsivos ao P (L3xCateto e L228-3x22) foram os que mostraram maior valor de RELPG (Figura 8 e Tabela 18).

A variável DIFPG mostrou correlações altas e positivas com as variáveis de resposta ao P EFAGR ($r=0,99^{**}$) e EFREC ($r=0,86^{**}$) e não mostrou correlação com EFIS ($r=0,09$), conforme discutido anteriormente. Quanto às correlações com variáveis de eficiência ao P, DIFPG ou não

mostrou correlação significativa com as mesmas como é o caso de EFUSO ($r=-0,20$) e EFUTIL ($r=0,11$), ou mostrou correlação baixa e negativa, como com EFABS ($r=-0,38^{**}$).

Com respeito às variáveis RELPG e DIFPG sob baixo P no solo pode-se então tirar as seguintes conclusões: a) RELPG está relacionada de forma alta e positiva com variáveis de eficiência mas relacionada de forma negativa e significativa com diversas variáveis de resposta ao P; b) DIFPG está altamente relacionada à variáveis de resposta ao P, mas mostrou baixa correlação com variáveis de eficiência ao P.

Um sumário das observações relacionadas às correlações entre caracteres discutidas acima, referentes aos ambientes sob baixo P no solo, permite tirar as seguintes conclusões: a) quanto aos critérios de seleção para eficiência ao P nos ambientes sob baixo P, pode-se concluir que, seleção para PG associada à seleção para baixa concentração de P nos grãos, seriam as duas variáveis chave na seleção para eficiência ao P em milho nestes ambientes; critério adicional de seleção para eficiência ao P nos ambientes sob baixo P seria seleção para reduzir os valores de ASI nestes ambientes; c) quanto às variáveis de resposta ao P, a variável mais adequada para ser utilizada como critério de seleção seria a diferença de produção de grãos entre níveis alto e baixo de P, já que esta mostrou alta correlação com variáveis de resposta, mas não está correlacionada de forma significativa com variáveis de eficiência; d) a variável RELPG não seria critério de seleção adequado por sua correlação moderada e negativa com variáveis de resposta ao P, tendendo a selecionar genótipos não responsivos; e) genótipos ideais seriam então aqueles eficientes no uso de P (máximo PG e mínimo teor de P nos grãos sob baixo P) e responsivos ao P (alta diferença na produção de grãos entre níveis de P), sendo que índices de seleção poderiam ser utilizados para facilitar a identificação dos mesmos, incluindo aí variáveis auxiliares como ASI.

2.3.5.7 Correlações entre variáveis de resposta ao P sob alto P no solo

Não foi observada correlação significativa entre as variáveis de resposta ao P, EFREC e EFIS, nem nos ambientes sob baixo P, nem sob alto P no solo ($r=-0,35$ e $r=-0,14$), indicando que, seleção para um destes caracteres não deverá afetar o outro de forma previsível, dentro do conjunto de genótipos estudados em nenhum dos dois grupos de ambientes.

Correlações semelhantes para a variável EFREC entre ambientes sob baixo e alto P foram: a) alta correlação EFREC e DIFPG ($r=0,86^{**}$ e $r=0,86^{**}$); b) nenhuma correlação observada

entre EFREC e ASI ($r=0,12$ e $r=0,07$); c) correlação média e positiva com índice de colheita de P-ICP ($r=0,37^{**}$ e $r=0,43^*$); d) correlações médias e negativas entre EFREC e RELPG ($r=0,63^{**}$ e $r=-0,68^{**}$).

Padrão distinto de correlações com a variável EFREC nos ambientes sob baixo e alto P foi observado com respeito às correlações EFREC e PG ($r=-0,06$ e $r=0,52^{**}$); EFREC e teor de P no grãos-TPG ($r=0,11$ e $r=0,42^{**}$) e EFREC e EFABS ($r=-0,41^{**}$ e $r=0,66^{**}$).

Quanto às correlações observadas entre o caráter eficiência fisiológica-EFIS e outros caracteres, nos ambientes sob baixo e alto P, vale ressaltar que este caráter não mostrou correlação moderada ou alta com nenhum outro, em nenhum dos grupos de ambientes, indicando ser bastante distinto dos demais.

Com respeito às correlações entre o caráter RELPG e variáveis de eficiência ao P, elas foram altas, positivas e significativas nos ambientes sob baixo P, mas não significativas sob alto P no solo tais como: RELPG e EFABS ($r=0,84^{**}$ e $r=-0,24$); RELPG e EFUSO ($r=0,74^{**}$ e $r=-0,12$). Já as correlações entre RELPG e EFUTIL foram baixas nos dois grupos de ambientes ($r=0,27^*$ e $r=0,25$). Este fato indica que a variável relação entre produção de grãos sob baixo e alto P (RELPG) está altamente correlacionada com variáveis de eficiência sob baixo P, e não mostra relação com as mesmas nos ambientes sob alto P.

Com respeito às correlações entre RELPG e caracteres de resposta ao P, estas correlações foram moderadamente altas e negativas sob alto e baixo P no solo, com os caracteres EFAGR ($r=-0,69^{**}$ e $r=-0,71^{**}$) e EFREC ($r=-0,63^{**}$ e $r=-0,68^{**}$) e não foi observada correlação entre RELPG e EFIS em nenhum dos dois grupos de ambientes ($r=0,04$ e $r=-0,16$).

Estes últimos pontos, se analisados em conjunto indicam que o caráter RELPG tende a ser positivamente correlacionado com caracteres de eficiência nos ambientes sob baixo P, mas negativamente correlacionado com caracteres de resposta ao P nos dois grupos de ambientes. Estes fatos sugerem que esta variável não seria um critério de seleção adequado em programas de melhoramento voltados para a seleção de genótipos eficientes e responsivos ao P.

Com respeito às correlações entre o caráter DIFPG e variáveis de eficiência, pode-se verificar que as correlações foram não significativas sob baixo P e moderadas e positiva sob alto P como as correlações entre DIFPG e EFUSO ($r=-0,20$ e $r=0,57^{**}$) e DIFPG e EFABS ($r=-0,38^{**}$ e $r=0,52^{**}$). Não foi observada correlação entre DIFPG e EFUTIL em nenhum dos dois grupos de ambientes ($r=0,11$ e $r=0,11$). Correlações altas e positivas foram observadas entre o

caráter DIFPG e o caráter de resposta ao P, EFREC tanto nos ambientes sob baixo P quanto nos ambientes sob alto P ($r=0,86^{**}$ e $r=0,86^{**}$). Não foi observada correlação entre DIFPG e EFIS em nenhum dos dois grupos de ambientes ($r=0,09$ e $r=0,28$).

Com respeito aos caracteres RELPG e DIFPG pode-se então tirar as seguintes conclusões:

a) RELPG tendeu a ser positivamente correlacionado com variáveis de eficiência nos ambientes sob baixo P, mas negativamente correlacionado com variáveis de resposta ao P nos dois grupos de ambientes; b) DIFPG não mostrou correlação com variáveis de eficiência nos ambientes sob baixo P no solo e mostrou correlações médias e positivas com variáveis de eficiência nos ambientes sob alto P; c) DIFPG mostrou correlação alta e positiva com a variável de resposta EFREC nos dois grupos de ambientes.

Analisadas em conjunto estas observações sugerem que, para o grupo de genótipos e ambientes estudados, o caráter DIFPG seria um bom critério de seleção para resposta ao P em programas de melhoramento voltados à obtenção de genótipos responsivos ao P nos ambientes sob alto P, sem mostrar correlação com eficiência nos ambientes pobres neste nutriente. Desta forma, o critério de seleção DIFPG poderia ser utilizado como critério de resposta ao P e associado com critérios de seleção mais voltados para melhor eficiência no uso de P em ambientes deficientes neste nutriente, como por exemplo produção de grãos sob baixo P e um baixo teor de P nos grãos. Já o caráter RELPG não seria adequado como critério de seleção por selecionar genótipos com baixa capacidade de resposta ao P.

Um sumário das diversas correlações entre caracteres verificadas nos ambientes sob baixo e alto P seria: a) critérios chave na seleção para eficiência ao P em ambientes deficientes neste nutriente seriam o peso de grãos sob baixo P e seleção para baixa concentração de P nos grãos; b) o caráter ASI obtido nos ambientes sob baixo P seria útil como critério adicional de seleção para eficiência ao P, o que é muito menos evidente quando o mesmo é obtido sob alto P no solo; c) o caráter DIFPG seria útil na busca por genótipos responsivos ao P em ambientes sob alto P no solo, sem interferir sobre a seleção para eficiência ao P em ambientes sob baixo P; d) o caráter RELP não seria adequada como critério de seleção por selecionar para baixa capacidade de resposta nos genótipos

O estudo da relação entre os diversos caracteres avaliados permite então uma escolha mais adequada de critérios de seleção a serem utilizados não só em programas de melhoramento voltados para o desenvolvimento de genótipos eficientes e responsivos ao P, como também na

determinação de caracteres a serem utilizados em programas de mapeamento de QTLs para eficiência e resposta ao P.

Neste sentido, trabalho de mapeamento de QTLs para comprimento de pelos radiculares sob baixo e alto P (ZHUL; KAEPLER; LYNCH, 2005), utilizou como variável de mapeamento os respectivos valores obtidos em cada ambiente e a relação entre valores obtidos sob alto e baixo P (semelhante à variável RELPG) utilizada neste trabalho. Uma diferença é que neste caso, o comprimento dos pelos radiculares é maior sob baixo P do que sob alto P (ao contrário do verificado para DIFPG), mas da mesma forma, genótipos que tendessem a ter pelos radiculares naturalmente mais longos sob alto P, seriam penalizados por este critério de seleção. Com base nos resultados aqui discutidos, a variável diferença de comprimento de pelos entre alto e baixo P (semelhante à DIFPG neste trabalho), seria mais adequada para mapeamento da resposta ao P na morfologia de pelos radiculares sob baixo P, do que a variável relação entre comprimento dos pelos radiculares sob baixo e alto P na solução. Um outro ponto a ser mencionado sobre o trabalho acima, é que a população utilizada tanto para mapeamento, quanto para fenotipagem, foi um conjunto de linhas recombinantes (RILs). Este é outro tópico que necessita ser mais discutido em trabalhos de mapeamento de QTLs em milho, pois uma população de RILs somente permitirá detectar efeitos aditivos ou epistasia do tipo aditiva x aditiva. Entretanto, conforme verificado no presente estudo, a maior parte dos caracteres ligados à eficiência e resposta ao P em milho, tiveram herança determinada principalmente por efeitos gênicos do tipo não aditivos. Neste caso, como o caráter RELPG mostrou menor efeito de dominância em sua expressão do que o caráter DIFPG, o uso da relação entre comprimento de pelos radiculares sob baixo e alto P (como foi feito no trabalho mencionado), como critério de mapeamento numa população de RILs, seria apropriado. Entretanto o ideal talvez tivesse sido utilizar como caráter de mapeamento a diferença entre pelos radiculares; como população de mapeamento uma geração F_2/F_3 .

2.3.6 Relações propostas por Moll, Kamprath e Jackson (1982) para diferentes caracteres

2.3.6.1 Relações entre caracteres de eficiência ao P (absorção, utilização e uso).

A variável eficiência de uso (EFUSO) é obtida a partir da multiplicação das variáveis eficiência de absorção (EFABS) e eficiência de utilização (EFUTIL). A metodologia proposta por Moll, Kamprath e Jackson (1982) foi utilizada para verificar a importância relativa dos componentes EFABS e EFUTIL sobre a EFUSO de P nos ambientes estudados. A decomposição da soma de quadrados de EFUSO nos componentes relativos à EFABS e EFUTIL mostrou que a eficiência de absorção e a eficiência de utilização contribuíram com respectivamente 64,5 % e 35,5 % da variabilidade observada para a eficiência de uso nos ambientes sob baixo P e 74,0 % e 26,0 % nos ambientes sob alto P no solo (Tabela 37). Foi verificado então que, o componente EFABS foi mais importante que o componente EFUTIL sobre a variabilidade observada na variável EFUSO, sendo esta importância ainda maior nos ambientes sob alto P (2,85 vezes) do que nos ambientes sob baixo P no solo (1,82 vezes). A razão da EFABS corresponder à 64,5 % da variabilidade observada na EFUSO sob baixo P foi função do alto coeficiente de correlação entre estas variáveis ($r=0,862^{**}$) e uma alta relação de desvios padrões entre as mesmas (0,748). O valor 64,5 % foi então obtido do produto destes dois componentes ($0,862 \times 0,748$). Ainda sob baixo P no solo, a variável EFUTIL mostrou uma menor correlação com EFUSO ($r=0,683^{**}$) e uma menor relação entre desvios padrões com a mesma (0,519). Esta situação é ainda mais extrema nos ambientes sob alto P, onde a EFABS mantém ainda alta correlação com EFUSO ($r=0,813^{**}$), e uma mais alta relação de desvios padrão com esta variável (0,910), fazendo com que 74% da soma de quadrados observada para EFUSO fosse devida à contribuição relativa da soma de quadrados de EFABS.

Deve-se mencionar que, conforme descrito anteriormente, para obter estas relações, uma nova variável EFUSO foi obtida à partir do produto das médias de EFABS e EFUTIL para cada local, e por isto são verificadas pequenas discrepâncias nos coeficientes de correlação assim obtidos e aqueles apresentados anteriormente, sendo que, em geral estas correlações foram bastante semelhantes.

Com respeito às estas variáveis pode-se concluir então que os dois componentes (EFABS e EFUTIL) são importantes sobre EFUSO, mas EFABS mostrou contribuição superior à verificada para EFUTIL nos dois ambientes, sendo este efeito mais pronunciado nos ambientes sob alto P.

Furlani, Bataglia e Lima (1985) avaliaram a eficiência ao P de 40 linhagens de milho crescidas por 25 dias em solução nutritiva com 2 ppm de P e verificaram que a EFABS de P foi mais importante que a EFUTIL do P absorvido para produzir matéria seca, e que não foi observada diferença entre genótipos para EFUTIL (unidades de matéria seca produzidas por unidade de P na planta). Rhoades e Stanley Jr. (1984) observaram baixa variação para EFUTIL de nitrogênio entre híbridos de milho (61-67 kg de grão por kg de N na planta), apesar de terem ocorrido grandes variações na produção de grãos entre os híbridos avaliados.

Coltman et al., (1987) reportam que diferenças encontradas para produção de matéria seca de parte aérea em populações segregantes de tomate cultivadas sob estresse de P deveriam-se mais à habilidade dos genótipos de absorver o fósforo do meio do que à diferenças na utilização interna deste fósforo. Da mesma forma, Oliveira et al., (1999) verificaram que genótipos de pimentão tolerantes ao baixo P no solo absorveram 2,38 vezes mais P que genótipos não tolerantes, enquanto que a eficiência no uso interno de P (matéria seca produzida por unidade de P na parte aérea) ou EFUTIL, não variou entre os genótipos.

Israel e Rufty (1988) reportam que a eficiência de absorção de fósforo depende de fatores como arquitetura de raízes, associação com micorrizas e difusividade do nutriente no solo. Já eficiência de utilização mede a eficiência com que o nutriente absorvido de um meio sob limitado suprimento, é utilizado nos processos internos de crescimento da planta. Os autores argumentam que a caracterização de um grande número de genótipos para estes dois critérios de eficiência (absorção e utilização), permitiria combinar os mesmos visando criar genótipos com maior capacidade produtiva em ambientes com limitado suprimento do nutriente.

Moll, Kamprath e Jackson (1982), estudaram a contribuição relativa de EFABS e EFUTIL sobre híbridos de milho avaliados em ambientes com baixo e alto nitrogênio no solo. Os autores encontraram que as causas da variação no uso de N entre níveis alto e baixo foram diferentes. No nível alto de N, o componente EFABS (82,90 %) foi mais importante que EFUTIL (17,10 %), sobre a eficiência de uso de N. Situação inversa foi observada no nível baixo de N, onde o componente EFABS (4,80 %) mostrou pouca importância em relação ao componente EFUTIL (95,20 %) com relação à eficiência de uso de N neste ambiente. Esta situação foi semelhante à

verificada para eficiência de uso de P neste estudo nos ambientes sob alto P no solo, e diferente da verificada nos ambientes sob baixo P no solo. Entretanto, uma diferença que deve ser considerada quando se comparam resultados referentes à eficiência de uso de N e de P em gramíneas como o milho, cultivadas em solo de cerrado, é que em geral gramíneas não possuem mecanismos de fixação de N tão desenvolvidos como os que ocorrem com a soja por exemplo. Devido à este fato, gramíneas não teriam forma alternativa de aumentar a capacidade de absorção de N em meio pobre neste nutriente, o que, no entanto, pode ocorrer em ambientes sob alta disponibilidade de nitrogênio.

No caso do P, dois pontos devem ser considerados: o primeiro é que mesmo em solos pobres quanto à disponibilidade deste nutriente, existe uma grande quantidade de P no solo, só que, ou este P está retido na fração orgânica não mineralizada do solo, ou está fixado em sesquióxidos de ferro e Al não estando disponível para ser absorvido pelo sistema radicular. Neste cenário, associações simbióticas com fungos como micorrizas ou bactérias (associações estas que podem variar com o genótipo da planta) seriam capazes de aumentar a quantidade de P disponível para absorção num meio pobre neste nutriente (BAREA et al., 2005). Outras possibilidades de se aumentar o P passível de ser absorvido pelo sistema radicular seriam o aumento no volume de raízes e ainda, a secreção de ácidos orgânicos na rizosfera (HISINGER et al., 2006).

Oliveira et al., (2006) isolaram microorganismos solubilizadores de fosfato da rizosfera das linhagens L3 e L22 utilizadas neste estudo e de dois outros híbridos simples não relacionados com as mesmas, que eram contrastantes quanto sua eficiência ao P. A mais alta capacidade dos microorganismos isolados de solubilizar fosfato, foi em formas de P ligadas à cálcio. Dos 36 isolados capazes de solubilizar P ligado à cálcio, 39% foram isolados da rizosfera da linhagem eficiente L3. Destes isolados, o microorganismo *Bulkoderia sp* isolado da rizosfera da L3 foi o que mostrou maior eficiência de solubilização de P ligado à Ca, sendo capaz de solubilizar 70% do mesmo quando fornecido em meio de cultura. Estes dados sugerem que, genótipos de milho mais eficientes no uso de P como a linhagem de milho L3 (e talvez alguns dos seus cruzamentos), podem ter maior capacidade de adquirir P (em vez de absorver) do meio, via associação simbiótica com microorganismos rizosféricos.

A linhagem L3, além de processos de aquisição de P relacionados à associação com microorganismos solubilizadores de fosfato, parece ter também em sua capacidade de absorção,

um componente relacionado à morfologia e estrutura de seu sistema radicular. Neste sentido, Brasil (2003), avaliou modificações no sistema radicular de duas linhagens utilizadas no presente estudo que foram L22 (identificada em seu trabalho com o nome de L1) e a linhagem L3 (que manteve esta denominação em seu trabalho). A linhagem L3 mostrou maior capacidade de acumular P na parte aérea, maior relação parte aérea raiz, maior volume de sistema radicular e maior profundidade deste sistema radicular no perfil do solo, quando comparada à L22.

Corrales et al., (2007) estudaram a eficiência na aquisição e utilização de P no híbrido simples eficiente ao P obtido do cruzamento das linhagens L3x228-3, comparado à um híbrido simples ineficiente ao P. Os autores concluíram que, em meio com fosfato de baixa solubilidade, o híbrido simples L3x228-3 mostrou maior eficiência ao P e esta se deveu mais a sua capacidade de aquisição de P do meio, do que à eficiência de utilização interna do P absorvido, o que concorda com o observado neste estudo.

Relação entre eficiência ao P e genes controlando a morfologia do sistema radicular foi verificada em arroz (WISSUWA et al., 2002). Quatro QTLs ligados à absorção de P em arroz foram identificados sendo que um deles mostrou alto efeito, sendo responsável por mais de 70% da variância fenotípica na absorção de P observada na população sob estudo. Este QTL recebeu o nome de Pup_1 (“phosphorus uptake 1”), mostrando alto efeito em solos deficientes em P mas não em solos com alto suprimento deste nutriente. Linhagens de arroz onde foi feita introgressão deste QTL via retrocruzamentos, aumentaram o crescimento do sistema radicular sob baixo P. Uma destas linhagens semi-isogênicas contendo a região do QTL obtida do pai doador (eficiente na absorção de P) e o restante do genoma do pai recorrente (ineficiente na absorção de P), mostrou capacidade de absorção de P quatro vezes superior à observada no pai recorrente (ISMAIL et al., 2006).

Mecanismos relacionados à eficiência de uso de um dado nutriente podem variar entre culturas e entre nutrientes. Exemplo disto pode ser visto em estudo de eficiência de uso de N em cevada (ISFAN, 1993, apud DUNCAN, 1994). Neste estudo, o autor concluiu que, para os genótipos utilizados, a EFUTIL de N foi mais importante do que a quantidade de N absorvida pela planta (EFABS) e que um genótipo ideal seria aquele capaz de absorver quantidade alta de N disponível, produzir um máximo de grãos por unidade de N absorvido e armazenar pequenas quantidades de N na palhada.

Com base nos resultados apresentados pode-se concluir que, programas de melhoramento para eficiência ao P em milho, conduzidos em ambientes semelhantes aos utilizados neste estudo, devem buscar genótipos superiores tanto quanto a sua capacidade de adquirir o P do solo (EFABS) quanto a sua capacidade de utilização interna deste P para produção de grãos (EFUTIL). Entretanto, durante o processo de seleção, maior peso deve ser dado ao componente EFABS do que ao componente EFUTIL de P.

2.3.6.2 Relações entre caracteres relacionados à eficiência de utilização de P

A variável eficiência de utilização (EFUTIL) é obtida a partir da multiplicação das variáveis índice de colheita de P (ICP) e quociente de utilização de P (QUTIL). Na Tabela 38 encontra-se a decomposição da soma de quadrados de EFUTIL nos componentes relativos à ICP e QUTIL. O índice de colheita de P e o quociente de utilização contribuíram com respectivamente 19,2% e 80,8% da variabilidade observada para eficiência de utilização nos ambientes sob baixo P e 7,5% e 92,5% nos ambientes sob alto P. Verifica-se então que o componente QUTIL foi muito mais importante (4,1 vezes) que o ICP para explicar a variabilidade observada no caráter eficiência de utilização sob baixo P, e isto é ainda mais evidente nos ambientes sob alto P, onde QUTIL explicou 92,5% da variabilidade observada em EFUTIL nestes ambientes. As razões para este fato foram: a) o componente QUTIL apresentou correlações mais altas com EFUTIL nos dois grupos de ambientes ($r=0,793^{**}$ e $r=0,788^{**}$), do que aquelas verificadas entre ICP e EFUTIL ($r=0,296$ e $r=0,103$ sob baixo e alto P respectivamente); b) o componente QUTIL apresentou mais alta relação de desvios padrões com EFUTIL (1,019 e 1,175 sob baixo e alto P), do que a relação observada entre EFUTIL e ICP sob baixo e alto P (0,650 e 0,728).

O ICP diz respeito à capacidade do genótipo de remobilizar o P da parte aérea para os grãos, a qual tem sido relacionada com uma maior eficiência de utilização, enquanto o QUTIL indica a capacidade do genótipo de produzir grãos por unidade de P alocada aos mesmos. Pode-se concluir então que nos ambientes sob baixo P, o mecanismo de redistribuir P da parte aérea para os grãos (ICP) ainda tem alguma importância na variabilidade observada para EFUTIL, apesar do mecanismo principal para a EFUTIL observada nos genótipos estudados ser a capacidade destes de produzir grãos por unidade de P alocada aos mesmos (QUTIL). Nos ambientes sob alta

disponibilidade de P no solo, mecanismos de redistribuição de P na planta (ICP) parecem ter pouca importância sobre a variabilidade observada para EFUTIL de P.

2.3.6.3 Relações entre caracteres de resposta ao P

A variável eficiência agrônômica (EFAGR) é obtida a partir da multiplicação das variáveis eficiência de recuperação aparente de P (EFREC) e eficiência de utilização (EFIS). Na Tabela 39 encontra-se a decomposição da soma de quadrados de EFAGR nos componentes relativos à EFREC e EFIS. A eficiência de recuperação aparente de P e a eficiência fisiológica contribuíram com respectivamente 92,5% e 7,5% da variabilidade observada para a eficiência agrônômica nos ambientes sob baixo P e 83,5% e 16,5% nos ambientes sob alto P. Verifica-se então que o componente EFREC é muito mais importante que o componente EFIS sobre a variabilidade observada na variável de resposta ao P (EFAGR), sendo esta importância ainda maior nos ambientes sob baixo P. A razão da EFREC corresponder à 92,5 % da variabilidade observada na EFAGR sob baixo P é função de seu alto coeficiente de correlação com esta variável ($r=0,865^{**}$) e uma alta relação de desvios padrões destas duas variáveis (1,070). O valor 92,5% é então o produto destes dois componentes ($0,865 \times 1,070$). Situação inversa ocorreu entre as variáveis EFIS e EFAGR, que mostraram baixas correlações nos dois ambientes e EFIS mostrou também baixa relação de desvios padrões com EFAGR.

Com respeito à estas variáveis pode-se concluir então que o componente EFREC é mais importante que o componente EFIS para explicar a variabilidade observada na eficiência agrônômica ao P e isto é mais evidente sob baixo P no solo. Deve-se mencionar que, conforme discutido acima, uma alta correlação foi observada entre a variável diferença de peso de grãos entre níveis alto e baixo de P (DIFPG) e a variável EFREC, tanto sob baixo P ($r=0,86^{**}$), quanto sob alto P ($r=0,86^{**}$), indicando que um bom critério de seleção indireta para o caráter EFREC pode ser a variável DIFPG a qual é simples de ser obtida.

2.3.7. Considerações gerais

Os resultados deste estudo concordam com dados da literatura no sentido de que, deficiência de P reduz a produção de grãos em milho e que existe variabilidade genética para características de eficiência e resposta ao P nesta espécie. Redução média de 47,10 % no peso de grãos entre ambientes sob baixo e alto P no solo, foi verificada neste estudo, com diferenças altamente significativas entre as médias de tratamentos nestes ambientes, indicando que os genótipos foram avaliados em condições distintas quanto ao P disponível no solo.

Ensaio conduzidos no campo em estudos relacionados a nutrição mineral de plantas devem verificar se a principal fonte de variação nos mesmos está relacionada aos níveis do nutriente presente no meio e não a outros fatores ambientais (pH, saturação de alumínio, teor de matéria orgânica, etc.). Neste estudo, o coeficiente de correlação entre médias de peso de grãos (PG) com a quantidade de P disponível no solo em cada um dos cinco ambientes foi de $r=0,95^{**}$, indicando que, cerca de 90,25 % da variabilidade observada entre médias de tratamentos para PG (R^2), pôde ser explicada pela quantidade de P disponível no solo.

Quanto à classificação prévia das linhagens parentais com respeito a sua eficiência ao P, baseada na produção de grãos das mesmas nos ambientes sob baixo e alto P no solo, os dados deste estudo confirmaram esta classificação. As linhagens L3 e L228-3 (eficientes ao P), produziram em média cerca de 2,33 vezes mais grãos que a média das três linhagens ineficientes (L22, L53 e Cateto) nos ambientes sob baixo P, e cerca de 1,83 vezes mais nos ambientes sob alto P no solo. A linhagem classificada como medianamente eficiente ao P (L36) mostrou na realidade ser altamente responsiva a este nutriente, sendo aquela que mais aumentou sua produção de grãos entre níveis alto e baixo de P (1.995 kgha^{-1}), enquanto que para as linhagens L3 e L228-3 este valor foi de 1.237 kgha^{-1} .

Com base em sua produção de grãos nos ambientes sob baixo e alto P no solo, os sete híbridos F_1 utilizados neste estudo puderam ser divididos em um grupo classificado como eficiente ao P (L3x22, L3x36, L3xCateto e L228-3x22) e outro classificado como ineficiente ao P (L3x53, L36xCateto e Catetox53). Nos ambientes sob alto P no solo, híbridos classificados como eficientes e ineficientes ao P mostraram média de peso de grãos muito próximas (8.167 e 8.393 kgha^{-1} respectivamente), enquanto nos ambientes sob baixo P no solo os híbridos eficientes produziram em média, 40,86% a mais que os híbridos ineficientes ao P (5.088 e 3.612 kgha^{-1}

respectivamente), conforme mostrado na Figura 1. Estes dados confirmam que a classificação dos híbridos em cruzamentos eficientes e ineficientes ao P utilizada neste estudo seguiu os conceitos propostos por Gourley, Allan e Russelle, 1993.

Os três caracteres que mostraram maior importância para serem utilizados em programas de seleção para eficiência e resposta ao P em milho foram: a) produção de grãos sob baixo P no solo (PG); b) teor de P nos grãos (TPG); c) diferença de produção de grãos entre níveis alto e baixo de P no solo. Um outro caráter que pode ser útil na seleção indireta para eficiência ao P é a busca por genótipos com menores valores de intervalo entre florescimento masculino e feminino (ASI), quando avaliados sob baixo P no solo.

Quanto à herança do caráter PG, os efeitos de dominância foram superiores aos efeitos aditivos, sendo isto mais evidente nos ambientes sob alto P do que nos ambientes sob baixo P no solo e a dominância foi positiva em todos os cruzamentos. A observação de que dominância é ainda mais importante em ambientes sem restrição nutricional do que sob estresse mineral foi também verificada por Pérez-Velázquez, 2000. Efeitos epistáticos do tipo aditivo x dominante e dominante x dominante foram verificados em cerca de um terço dos cruzamentos, não sendo observada tendência clara de ocorrência dos mesmos nem entre níveis de P nem entre cruzamentos eficientes e ineficientes ao P. A magnitude dos efeitos epistáticos foi semelhante à verificada para os efeitos de dominância nos ambientes sob baixo P e inferior à verificada para os efeitos de dominância nos ambientes sob alto P no solo. Dos cinco efeitos epistáticos para PG detectados, quatro mostraram sinal positivo, indicando contribuir no sentido de aumentar a média do caráter e sugerindo combinações gênicas favoráveis nos cruzamentos entre as linhagens. A verificação de que efeitos de dominância e efeitos epistáticos (quando detectados) são de grande importância na expressão do caráter PG nos genótipos estudados, tanto sob baixo P, quanto sob alto P, indica que, avaliações para este caráter nos dois níveis de P, devem ser feitas preferencialmente em cruzamentos, não sendo indicada avaliação de linhagens “per se”.

Quanto às correlações observadas para o caráter PG nos ambientes sob baixo e alto P, foi verificado, nos dois grupos de ambientes, correlação alta e positiva com eficiência de uso de P (EFUSO), indicando que esta última variável poderia ser avaliadas de forma indireta pelo caráter PG nestes ambientes.

As correlações entre PG e variáveis de resposta ao P indicaram que, as alterações de produção entre níveis baixo e alto de P (resposta ao P), dependem muito mais do aumento do PG observado nos ambientes sob alto P, do que da produção de grãos sob baixo P.

Consideradas em conjunto, estas observações concordam com àquelas feitas por Ozturk et al., (2005), que afirmaram que a avaliação de produção de grãos sob baixo P, seria o critério de seleção mais adequado para buscar genótipos mais eficientes no uso de P neste ambiente, conforme já sugerido em trabalhos com trigo (OSBORNE; RENGEL, 2002), tomate (COLTMAN et al., 1996) e arroz (FAGERIA et al., 1988).

Foi verificada correlação moderada e negativa entre PG e ASI sob baixo P ($r=-0,60^{**}$), enquanto sob alto P esta correlação foi baixa ($r=-0,28^*$), sugerindo que, seleção para baixos valores de ASI, feita em ambientes sob baixo P, pode ser critério de seleção adicional útil, para eficiência ao P nestes ambientes. Não se encontrou referências na literatura associando aumentos de ASI com o estresse de P, sendo esta uma informação relevante. Um sumário das observações feitas para o caráter ASI foi : a) deficiência de P aumentou de forma pronunciada o intervalo entre florescimento masculino e feminino nos genótipos estudados; b) correlação ASI nos ambientes sob baixo e alto P foi média ($r=0,59^{**}$); c) interação linhagens x ASI sob baixo P foi não significativa, indicando que em ambientes semelhantes aos utilizados neste estudo, avaliações de ASI em linhagens ou progênies endogâmicas poderiam ser feitas num único ambiente; d) maiores valores de ASI e maior amplitude de variação para esta característica foram observados em linhagens do que nas outras gerações, principalmente quando avaliadas sob baixo P; e) efeitos aditivos foram superiores aos efeitos de dominância tanto sob baixo quanto sob alto P no solo; f) o ambiente influenciou a herança do caráter ASI sendo que efeitos aditivos e dominantes tenderam a ser mais altos nos ambientes sob baixo P do que nos ambientes sob alto P no solo; g) o tipo de cruzamento influenciou a herança do caráter ASI sendo que cruzamentos eficientes mostraram média de efeitos aditivos duas vezes superior à verificada nos cruzamentos ineficientes. Estes dados indicam que, avaliação “per se” de linhagens ou progênies endogâmicas (S_1-S_4) quanto a seu ASI, feita principalmente em ambientes sob baixo P, pode vir a ser critério de seleção auxiliar em programas de melhoramento para eficiência ao P. Esta avaliação poderia ser feita simultaneamente à obtenção dos top-crosses, caso esses fossem obtidos em ambientes sob baixo P.

A linhagem ineficiente ao P L53, mostrou ASI médio de 2,33 dias nos ambientes sob alto P e de 7,33 dias sob baixo P, indicando alta sensibilidade deste caráter à deficiência de P neste genótipo. Os dois híbridos com maior ASI sob baixo P (L3x53 e Catetox53) tiveram esta linhagem como um dos seus genitores. As linhagens Cateto e L53 mostraram maiores valores médios de ASI sob baixo P (7,44 e 7,33 dias), e caso as duas tivessem sido descartadas numa seleção prévia baseada nesta característica, os dois híbridos com maiores valores de ASI teriam também sido descartados, sendo que estes híbridos mostraram também, as menores produções de grão sob baixo P no solo.

Quanto ao teor de P nos grãos, foi verificado que máxima expressão deste caráter em milho ocorreu em linhagens, e dominância negativa foi observada em todos os cruzamentos e em todos os ambientes. Este fato tem sido verificado em milho (BARBER; THOMAZ; BAKER, 1967; SCULTHESS, FEIL; JUTZI, 1997), e tem sido associado ao efeito de diluição que ocorre quando se compara a produção de grãos de híbridos e linhagens (GORSLINE; THOMAS; BAKER, 1964).

Não foi observada correlação entre PG e teor de P nos grãos (TPG) em nenhum dos grupos de ambientes, indicando que, nos genótipos estudados estes caracteres parecem ser independentes.

Quanto à interação TPG x ambientes, não foi verificada interação significativa com o ambiente nem para linhagens genitoras nem para F_1 's, nos três grupos de ambientes (BP, AP e BP+AP). Baixa interação entre TPG e ambiente (neste caso representado por diferentes níveis de estresses hídricos e de N no solo) em variedades e híbridos de milho foi verificada por Feil et al., (2005), concordando com o observado neste estudo.

A eficiência de utilização de P (EFUTIL) é função do produto do ICP pelo QUTIL. As correlações entre TPG e EFUTIL sob baixo e alto P foram altas e negativas ($r=-0,82^{**}$ e $r=-0,77^{**}$), indicando que seleção para reduzir o teor de P nos grãos deve aumentar a eficiência de utilização interna deste nutriente na planta.

Quanto à genética do caráter TPG, sob baixo e alto P, os resultados obtidos neste estudo permitiram concluir que: a) o parâmetro “m” mostrou a mais alta magnitude em relação aos desvios relativos a efeitos aditivos e dominantes para TPG, quando comparado às relações observadas nos outros caracteres; b) efeitos dominantes tenderam a ser superiores aos efeitos aditivos para TPG, mas a relação entre efeitos dominantes e aditivos foi cerca de 5,12 vezes sob

baixo P e apenas 1,91 vezes sob alto P; c) efeitos epistáticos para TPG foram detectados com frequência sob baixo P, mas não sob alto P; d) dominância negativa indica que menores valores de TPG tendem a ser observados nos F_1 's em relação às demais gerações; e) foi verificada correlação negativa entre diversas variáveis de eficiência e o teor de P no grão; f) a correlação entre teor de P no grãos nos ambientes sob alto e baixo P no solo foi alta ($r=0,73^{**}$).

Baseado nestes fatos, uma possível estratégia de melhoramento para o caráter TPG seria avaliar “per se” progênies obtidas no início do processo de extração de linhagens (S_1 - S_2) em ambientes sob alto P. Esta avaliação poderia ser feita ao mesmo tempo em que se obtêm estas progênies. Avaliações de algumas características de um programa de estresse, em ambiente sem estresse, foi sugerido por Resende et al., (1997). Esta ação se torna mais simples, se consideradas as observações de Wardyn e Russel (2004), que reportam que o efeito da fonte de pólen sobre a concentração de P no grão é baixo, sugerindo que esta característica possa ser avaliada sob polinização livre. Desta forma, seleção para baixos valores de TPG em ambientes sob alto P, realizada em progênies de baixa endogamia, deve ser eficiente para aumentar a eficiência de utilização de P (EFUTIL), tanto em ambientes sob baixo P quanto em ambientes sob alto P.

Para as variáveis de eficiência ao P (eficiência de absorção-EFABS, eficiência de utilização-EFUTIL e eficiência de uso de P-EFUSO), podem ser feitas as seguintes considerações: a) baixos níveis de P no solo aumentaram de forma pronunciada as EFABS e EFUSO e em menor grau, a EFUTIL; b) ausência de correlação entre EFABS e EFUTIL sob baixo e alto P no solo indica que seleção em uma delas não deve afetar a outra de forma previsível; c) ausência de correlação entre EFABS obtida sob baixo e alto P no solo indica que diferentes mecanismos de aquisição de P devem estar atuando nestes ambientes; d) alta correlação para EFUTIL entre ambientes sob baixo e alto P no solo indica que mecanismos de utilização interna deste nutriente na planta devem atuar de forma semelhante nos dois grupos de ambientes; e) quanto à herança de EFABS e EFUSO, efeitos dominantes foram superiores aos aditivos e isto foi mais acentuado nos ambientes sob alto P no solo; f) para EFABS efeitos epistáticos foram importantes sob baixo P e não foram detectados sob alto P, sendo que a magnitude dos efeitos epistáticos foi cerca de duas vezes superior à verificada para efeitos de dominância; g) para EFUSO efeitos epistáticos foram detectados tanto sob baixo quanto sob alto P no solo sendo que sob baixo P a magnitude média dos efeitos epistáticos foi semelhante à verificada para os efeitos de dominância, enquanto sob alto P efeitos de dominância mostraram

magnitude média cerca de duas vezes superior à verificada para efeitos epistáticos; g) para EFUTIL, efeitos epistáticos foram detectados em todos os cruzamentos sob baixo P sendo em geral do tipo dominante x dominante e de sinal negativo. Não foram detectados efeitos epistáticos para EFUTIL nos ambientes sob alto P e, efeitos de dominância foram superiores aos aditivos para este caráter, sendo que isto foi mais pronunciado nos ambientes sob baixo P no solo. Logo, com respeito à herança do caráter EFUTIL, foi verificado que, efeitos de dominância, seguidos de efeitos epistáticos foram os mais importantes na EFUTIL sob baixo P no solo enquanto efeitos de dominância foram menos importantes para EFUTIL nos ambientes sob alto P do que nos ambientes sob baixo P no solo.

Importância de efeitos epistáticos em milho, sobre caracteres relacionados à absorção de P (morfologia de raiz) em ambientes sob limitado suprimento deste nutriente foi reportada por Zhul et al., (2006). Estes autores mapearam QTLs para comprimento e número de raízes seminais em milho sob baixo P. Efeitos epistáticos foram identificados tanto para comprimento quanto para número de raízes seminais sob baixo P respectivamente em 2 e 8 pares de locos, correspondendo a 23,2 e 50,6% da variância fenotípica. Os autores concluem que epistasia é de alta importância na herança do comprimento e número de raízes seminais em milho sob baixo P.

Quanto à importância relativa das EFABS e EUTIL sobre a EFUSO, a metodologia proposta por Moll, Kamprath e Jackson, (1982) mostrou que 64,5% da variabilidade observada para EFUSO sob baixo P foi devida à EFABS e 35,5% à EFUTIL. Sob alto P, a EFABS foi ainda mais importante (74,0%) sobre a variabilidade observada para EFUSO. Estes dados indicam que, programas de seleção para aumento da EFUSO de P, devem tentar aumentar tanto a EFABS quanto a EFUTIL de P, mas maior peso deve ser dado à seleção para EFABS. Maior importância relativa da EFABS sobre a EFUTIL em ambientes semelhantes aos utilizados neste estudo, foi observada para um grupo de 90 híbridos simples de milho avaliados sob baixo e alto P no solo, concordando com os resultados obtidos no presente estudo (PARENTONI et al., 2006 b). Como já discutido anteriormente, o caráter PG sob baixo P pode ser utilizado para avaliar de forma indireta a EFABS nestes ambientes. Seleção para EFABS deveria então ser feita utilizando métodos que capitalizem sobre efeitos não aditivos, como seleção recorrente recíproca e avaliações de híbridos, “top-crosses” e dialelos entre genótipos de grupos heteróticos distintos.

A EFUTIL pode ser dividida em seus dois componentes ICP (que corresponde à capacidade da planta de redistribuir P da parte aérea para os grãos) e o QUTIL (que é a

quantidade de grãos produzidos por unidade de P nos grãos). A metodologia proposta por Moll, Kamprath e Jackson, 1982 mostrou que a maior parte da variabilidade observada para EFUTIL (80,2 % sob baixo P e 92,5% sob alto P) foi devida ao quociente de utilização de P (QUTIL). Como QUTIL é igual ao inverso da concentração de P nos grãos ($TPG \times 10^{-1}$), estes dados indicam que, seleção para reduzir o teor de P nos grãos (TPG) deve alterar positivamente a EFUTIL e, neste sentido, esta seleção deve ser mais efetiva para aumentar a eficiência de utilização interna do P (EFUTIL) do que aquela feita sobre o ICP. Estes resultados sugerem que o caráter ICP somente deveria ser considerado em programas de seleção que já tivessem capitalizado bastante sobre o caráter QUTIL (ou teor de P nos grãos-TPG) para aumentar a eficiência de utilização interna de P. Neste caso, o caráter ICP não deveria ser considerado durante as etapas iniciais de seleção para maior EFUTIL.

Deve-se mencionar que, seleção para melhor eficiência de utilização de P, feita via redução do teor de P nos grãos, deve também contribuir para aumentar o valor nutricional do grão de milho. Isto se deve ao fato de que, o fator anti-nutricional fitato, é a principal forma de armazenamento do P nos grãos de milho (RABOY, 2001). Nesta linha de raciocínio, pode-se verificar que, programas chamados de “biofortificação”, que tenham como objetivo aumentar a concentração de nutrientes como ferro e zinco por exemplo, nos grãos, estão na realidade criando genótipos ineficientes no uso destes nutrientes, ou seja genótipos que exigem grande concentração de nutrientes por unidade de grão produzido. Esta estratégia pode, no longo prazo, se mostrar não sustentável por duas razões: a) criar genótipos com grande demanda por nutrientes que podem não estar facilmente disponíveis no solo; b) maior exportação destes nutrientes via grãos pode acelerar o empobrecimento dos solos cultivados com estes genótipos para os referidos nutrientes. Esta preocupação foi demonstrada por Gourley, Allan e Russele (1994) que reportam que, seleção para aumentar a concentração de nutrientes em um dado tecido, com vistas a combater deficiência nutricional em bovinos (como feito para teor de P em alfafa), resultará na realidade em genótipos ineficientes no uso deste nutriente (baseado na quantidade de matéria seca produzida por unidade do nutriente).

Apesar do fato de que, pelo resultado dos estudos de herança, não ser adequado se discutir EFABS obtida em linhagens “per se”, deve-se mencionar que, a maior eficiência de uso de P da linhagem L3 está ligada a sua maior eficiência de absorção de P. Esta EFABS parece ser devido tanto à aspectos relacionados à morfologia e distribuição de seu sistema radicular (BRASIL,

2003), quanto à sua maior capacidade de associação com microorganismos solubilizadores de fosfato na rizosfera (OLIVEIRA et al., 2006).

Corrales et al., (2007) estudaram a eficiência na aquisição e utilização de P no híbrido simples eficiente ao P obtido do cruzamento das linhagens L3x228-3, comparado à um híbrido simples ineficiente ao P. Os autores concluíram que, em meio com fosfato de baixa solubilidade, o híbrido simples L3x228-3 mostrou maior eficiência ao P e esta se deveu mais à sua capacidade de aquisição de P do meio, do que à eficiência interna de utilização do P absorvido, o que concorda com o que foi verificado neste estudo.

Sob baixo P no solo, as correlações observadas entre caracteres de eficiência ao P (EFABS, EFUTIL, EFUSO) e caracteres de resposta ao P (DIFPG, FREC, EFIS e EFAGR) foram em geral baixas e não significativas. Estes resultados indicam que, para o grupo de genótipos e ambientes estudados, seleção para PG sob baixo P no solo e seleção para resposta ao P nos ambientes sob alto P no solo utilizando como critério de seleção o caráter DIFPG, podem ser feitas simultaneamente, sem que uma afete a outra de forma previsível.

Quanto à importância relativa dos caracteres de resposta ao P, EFREC e EFIS sobre a EFAGR, a metodologia proposta por Moll, Kamprath e Jackson (1982) mostrou que quase 92,5% da variabilidade observada para EFAGR sob baixo P e 83,5% sob alto P foi devida à EFREC, indicando que este componente é o mais importante sobre a eficiência agrônômica de P.

A chamada eficiência agrônômica (EFAGR), mostrou ser idêntica a diferença de peso de grãos entre níveis altos e baixos de P (DIFPG). Pela facilidade de mensuração, o principal caráter relacionado à resposta ao P seria então DIFPG e as seguintes observações podem ser feitas para o mesmo: a) DIFPG mostrou alta correlação com a variável de resposta ao P, eficiência de recuperação aparente (EFREC), tanto sob baixo P ($r=0,86^{**}$), quanto sob alto P ($r=0,86^{**}$); b) este caráter, em geral, não mostrou correlação com as variáveis de eficiência ao P; c) dominância foi o principal efeito sobre a expressão fenotípica do mesmo, indicando que este deveria ser avaliado em cruzamentos. Analisados em conjunto estes dados indicam que seleção para DIFPG, feita em cruzamentos, deve ser eficiente para alterar a resposta ao P, sem interferir na eficiência ao P. Genótipos avaliados em top-cross sob baixo e alto P, permitiriam então estimar a eficiência ao P, com base na produção de grãos dos mesmos sob baixo P e estimar sua capacidade de resposta ao P, através da diferença de produção entre níveis alto e baixo de P no solo.

O caráter relação entre produção de grãos nos níveis alto e baixo de P (RELPG) tendeu a ser positivamente correlacionado com caracteres de eficiência nos ambientes sob baixo P, mas negativamente correlacionado com caracteres de resposta, nos dois grupos de ambientes. Estes dados indicam que RELPG não seria um critério de seleção adequado por selecionar genótipos com baixa capacidade de resposta ao P, como observado para a linhagem L22 por exemplo.

Resultados obtidos neste estudo comprovam que, a metodologia proposta por Moll, Kamprath e Jackson (1982) é útil para indicar quais seriam os mecanismos principais (absorção ou utilização interna), relacionados à eficiência de uso de um dado nutriente em uma cultura específica. A partir daí pode-se priorizar critérios de seleção em programas de melhoramento, decidir quais caracteres seriam mais importantes de serem utilizados em trabalhos como por exemplo, mapeamento de QTLs, e auxiliar na seleção de genes candidatos ligados à eficiência, a partir de QTLs mapeados. Desta forma, para os genótipos e ambientes utilizados neste estudo, os mecanismos ligados à EFABS foram mais importantes que àqueles ligados à EFUTIL deste nutriente, para aumentar EFUSO do P. Os autores acima sugerem que seria altamente desejável o desenvolvimento de índices de seleção baseado em dados de diferentes níveis de fertilidade, de forma a garantir pressão de seleção semelhante nos componentes de absorção e utilização interna do nutriente. Neste sentido, com respeito aos dados obtidos neste estudo, uma alternativa seria utilizar como pesos para EFABS e EFUTIL em um índice de seleção a ser desenvolvido, os valores de importância relativa sobre EFUSO de cada um destes caracteres, observadas nos ambientes sob baixo e alto P. Estes pesos para EFABS e EFUTIL em um índice de seleção a ser utilizado em ambientes semelhantes aos deste estudo poderiam ser 0,70 e 0,30 para EFABS e EFUTIL respectivamente. Esta idéia poderia ser estendida às demais relações aqui estudadas, seguindo a metodologia dos autores citados acima.

Os resultados deste trabalho indicam que, para os genótipos de milho estudados, é possível buscar-se aumentos na eficiência no uso de P tanto via aumentos na EFABS quanto via aumentos na EFUTIL deste nutriente, sendo o componente EFABS mais importante que EFUTIL. Foi verificado ainda que, eficiência de absorção deve preferencialmente ser avaliada em ambientes sob baixo P no solo, enquanto EFUTIL pode ser avaliada em ambientes sob alto P no solo, de tal forma que o uso destes dois conceitos permitiu discriminar claramente os cruzamentos eficientes e ineficientes ao P utilizados neste estudo (Figura 9).

Da mesma forma, quando se pensa em resposta ao P esta é possível de ser obtida tanto via aumento da EFREC, quanto via aumento da EFIS, sendo que neste caso o componente EFREC é bem mais importante que EFIS.

Uma estratégia de seleção para eficiência e resposta ao P em genótipos de milho cultivados em ambientes semelhantes aos utilizados neste estudo, poderia então ser baseada nos seguintes pontos: a) fazer seleção em larga escala (grande número de genótipos) para menores teores de P no grão (TPG), utilizando progênies S_1/S_2 cultivadas em solo fértil, durante a fase de obtenção destas progênies e descartando-se cerca de 30% dos genótipos com mais alto teor de P nos grãos; b) obtenção dos top-crosses em ambiente sob baixo P, e seleção (também de baixa intensidade), para menores valores de ASI neste ambiente; c) avaliação destes “top-crosses” deve ser feita sob baixo e alto P no solo, sendo o critério de seleção principal para eficiência ao P a produção de grãos sob baixo P e o critério de seleção para resposta ao P seria a diferença na produção de grãos entre níveis alto e baixo de P no solo.

Estas idéias poderiam ser ampliadas no sentido de incorporar à programas de eficiência ao P, material de banco de germoplasma que venha a mostrar alta eficiência no uso deste nutriente. Neste sentido, Bliss (1981) propõe como estratégia de seleção para transferir características de eficiência de material não melhorado para material melhorado, o desenvolvimento de progênies S_1 ou S_2 a partir de RC_2 utilizando como pai recorrente o material melhorado e avaliando estas progênies em top-cross. Terry et al., (1987) reportam que, o uso do método de seleção entre progênies de feijão BC_2-S_2 e BC_2-S_3 obtidas usando como parental recorrente uma variedade melhorada (Sanilac), com menor conteúdo de P na parte aérea do que a variedade PI206002 (progenitor doador), permitiu obter linhagens superiores ao progenitor recorrente. Estas linhagens associavam maior quantidade de P na parte aérea (proveniente do pai doador), com o maior tamanho de sementes do pai recorrente, sob condições de baixa disponibilidade de P no solo. Os autores concluíram que o uso de progênies obtidas de retrocruzamentos, uma seleção inicial das mesmas em solução nutritiva sob baixo P e posterior avaliação das progênies selecionadas em solo sob baixo P, foi um método eficiente de seleção para eficiência no uso de P em feijão. Neste sentido, estudos futuros verificando a correlação entre caracteres de eficiência obtidos em plântulas de milho (cultivadas em solução nutritiva ou em canteiros sob baixo P no solo) e caracteres de eficiência obtidos em plantas cultivadas até a maturação fisiológica, podem ser de grande utilidade para acelerar os programas de melhoramento para eficiência no uso deste

nutriente. Resultados dos estudos de herança aqui obtidos podem indicar para quais caracteres estes trabalhos deveriam ser conduzidos em cruzamentos e quais caracteres poderiam vir a ser avaliados em progênes ou linhagens “per se”.

Os resultados aqui apresentados são um primeiro passo no entendimento da herança dos caracteres de eficiência e resposta ao P em milho em ensaios conduzidos até a maturação fisiológica para os genótipos e ambientes estudados, sendo que devem ser consideradas as limitações inerentes ao método de análise de médias de gerações. Trabalhos utilizando metodologias como os delineamentos II ou III da Carolina do Norte que permitem o estudo de componentes de variância poderão ser conduzidos em alguns dos genótipos utilizados, permitindo uma informação mais detalhada sobre a herança destes caracteres.

Cultivares de milho eficientes ao P, desenvolvidos pelo programa de melhoramento da EMBRAPA-Milho e Sorgo, tem sido utilizados por pequenos agricultores na chamada “low input agriculture” tanto no Brasil, quanto na África (região oeste do Kenya), e vem se firmando como componente importante, em sistemas de integração lavoura-pecuária no Brasil Central. Estes genótipos tem mostrado ainda alta estabilidade de produção, como é o caso do híbrido simples BRS 1010, formado à partir do cruzamento entre as duas linhagens eficientes ao P utilizadas neste estudo.

Os resultados aqui obtidos tem aplicação em várias áreas do conhecimento tais como: a) para se determinar critérios de seleção a serem utilizados nos programas de melhoramento de milho voltados para este tema; b) na identificação de características a serem utilizadas em programas de mapeamento genético com marcadores moleculares voltados para identificação de regiões genômicas ligadas à eficiência e resposta ao P; c) dados de herança de caracteres relacionados à eficiência e resposta ao P podem indicar o tipo de população de mapeamento mais adequada para estudo destes caracteres em milho (ex. linhas recombinantes aparentemente seriam mais adequadas para caracteres de herança predominantemente aditiva ou com epistasia do tipo aditiva x aditiva, enquanto características com alto grau de dominância poderiam ser mapeadas em populações do tipo F_2/F_3 ou em “top-crosses”); d) a identificação da importância relativa dos diversos caracteres sobre a eficiência de uso de P, pode indicar quais processos metabólicos relacionados à eficiência e resposta ao P, devem ser mais importantes nas condições estudadas. Esta informação pode vir a ser utilizada na busca por genes candidatos que possam ter papel relevante no controle destas características.

3 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho indicaram que:

1. Efeitos de dominância, seguidos de efeitos epistáticos dos tipos dominante x dominante e aditivo x dominante foram mais importantes na expressão dos diversos caracteres; efeitos aditivos foram mais importantes apenas para intervalo entre florescimento masculino e feminino e relação peso de grãos sob baixo e alto P no solo.
2. O ambiente (alto e baixo P no solo) afetou de forma distinta a herança de caracteres relacionados à eficiência de absorção de P (peso de grãos e P total na parte aérea) e caracteres relacionados à eficiência de utilização de P (teor de P nos grãos, quociente de utilização e índice de colheita de P). Para caracteres de absorção, dominância foi mais importante sob alto P do que sob baixo P no solo e situação oposta foi verificada para caracteres relacionados à utilização de P
3. Efeitos epistáticos foram geralmente verificados com maior frequência nos ambientes sob baixo P, do que nos ambientes sob alto P no solo.
4. Eficiência de absorção de P foi respectivamente, duas e três vezes mais importante que eficiência de utilização de P sob baixo e alto P no solo, indicando maior importância de mecanismos ligados à aquisição de P, do que de mecanismos relacionados ao uso interno deste nutriente, nos genótipos e ambientes estudados; não foi verificada correlação entre eficiência de absorção e eficiência de utilização de P, indicando que estes são caracteres independentes.

5. Eficiência de absorção de P mostrou baixa correlação entre ambientes sob baixo e alto P, sugerindo que diferentes mecanismos de aquisição de P podem estar atuando nestes ambientes; eficiência de utilização de P mostrou alta correlação entre ambientes, sugerindo que os mesmos mecanismos de utilização interna de P podem estar agindo sob alto e baixo P no solo.

6. Os caracteres peso de grãos, P total na parte aérea, eficiência de absorção, eficiência de uso e índice de colheita de P em milho, deveriam ser avaliados somente em cruzamentos; os caracteres teor de P nos grãos, eficiência de utilização de P e quociente de utilização de P poderiam ser avaliados em progênies de baixa endogamia (S_1 - S_2) ou em cruzamentos, mas em ambientes sob alto P no solo; o caráter ASI poderia ser avaliado em linhagens “per se”, preferencialmente sob baixo P no solo.

7. Critérios de seleção mais adequados para os diversos componentes de eficiência e resposta ao P seriam: peso de grãos sob baixo P no solo para determinar a eficiência de absorção nestes ambientes; baixo teor de P nos grãos, obtido sob alto P no solo, para determinar a eficiência de utilização interna de P; diferença de peso de grãos entre níveis alto e baixo de P para determinar a resposta ao P; menores valores de ASI sob baixo P no solo como critério auxiliar de seleção.

8. O caráter produção relativa de grãos sob baixo e alto P no solo não seria indicado como critério de seleção, por selecionar genótipos não responsivos ao P.

9. Correlações entre variáveis de eficiência e variáveis de resposta ao P tenderam a ser médias e positivas sob baixo P e baixas sob alto P, indicando ser viável obter genótipos eficientes e responsivos ao P nas condições deste estudo.

REFERÊNCIAS

AGRIANUAL 2000. **Anuário da Agricultura Brasileira**. São Paulo: FNP, 2000. 546 p.

AHSAN, M.; WRIGHT, D.; VIRK, D. S. Genetic analysis of salt tolerance in spring wheat (*Triticum aestivum L.*). **Cereal Research Communication**, Budapest, v. 24, p. 353-360, 1996.

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

ALVES, V. M. C.; PARENTONI, S. N.; VASCONCELOS, C. A.; PITTA, G. V. E.; FRANÇA, C. C. M. Cinética de absorção de fósforo e caracterização morfológica do sistema radicular de genótipos de milho contrastantes para eficiência à fósforo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 24., 2000, Santa Maria. **Guia do congressista...** Santa Maria: SBCS, 2000. p. 166.

ANDERSON, V. L.; KEMPTHORNE, O. A model for the study of quantitative inheritance. **Genetics**, Pittsburgh v. 39, p. 883-898, Nov. 1954.

ANGHINONI, I. Phosphorus forms and availability in Brazilian tropical and subtropical soils under management systems. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 3., 2006, Uberlândia. **Proceedings...** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. p. 13-14.

ARNOLD, J. M.; JOSEPHSON, L. M. Inheritance of stalk quality characteristics in maize. **Crop Science**, Madison, v. 15, p. 338-340, May/June 1975.

BAHIA FILHO, A. F. C.; MAGNAVACA, R.; SCHAFFERT, R. E.; ALVES, V. M. C. Identification, utilization and economic impact of maize germplasm tolerant to low level of phosphorus and toxic level of exchangeable aluminum in Brazilian Soil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLANT-SOIL INTERACTIONS AT LOW pH, 4., 1996, Belo Horizonte. **Abstracts...** Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 1996. p. 59-70.

BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N. K. Nutrient use efficiency in acid soils: nutrient management and plant use efficiency. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLANT-SOIL INTERACTIONS AT LOW pH, 4., 1996, Belo Horizonte. **Plant-soil interactions at low pH: sustainable agriculture and forestry production**. Campinas: SBCS, 1997. p. 75-97.

BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N .K.; HE, Z. L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, n. 1-8, p. 921-950, 2001.

BAKER, D. E.; THOMAS, W. I.; GORSLINE, G. W. Differential accumulation of strontium, calcium and other elements by corn (*Zea mays* L.) under greenhouse and field conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 56, p. 352-355, 1964.

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

BARBER, W. D.; THOMAS, W. I.; BAKER, D. E. Inheritance of relative phosphorus accumulation in corn (*Zea mays* L.). **Crop Science**, Madison, v. 7, n.2, p.104-107, 1967.

BAREA, J. M.; POZO, M. J.; AZCO, N. R.; AZCO N. A. G Microbial co-operation in the rhizosphere. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 56, p. 1761-1778, 2005.

BARRIGA, B. P.; PROSCHLE, A. A. Herencia del contenido y de la eficiencia de la utilizacion del fosforo en trigo. **Agro sur**, Valdivia, v. 12, n. 1, p. 43-49, 1996.

BARRY, D. A. J.; MILLER, M. H. Phosphorus nutritional requirement of maize seedlings for maximum yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 95-99, 1989.

BATTEN, G. D.; KHAN, M. A.; CULLIS, B. R. Yield responses by modern wheat genotypes to phosphate fertilizer and their implications for breeding. **Euphytica**, Wageningen, v. 33, p. 81-89, 1984.

BATTEN, G. D. Phosphorus fractions in the grain of diploid, tetraploid and hexaploid wheat grown with contrasting phosphorus supplies. **Cereal Chemistry**, St. Paul, v. 63, n. 5, p. 384-387, 1986.

BATTEN, G. D. A review of phosphorus efficiency in wheat. **Plant and Soil**, The Hague, v. 146, p. 163-168, 1992.

BHADORIA, P. B. S.; SINGH, S.; CLAASSEN, N. Phosphorus efficiency of wheat, maize and groundnut grown in low phosphorus-supplying soil. **Developments in Plant and Soil Science**, New York, v. 92. p. 530-531, 2002.

BERNARDO, R.; BOURRIER, M.; OLIVER, J. L. Generation means analysis of resistance to head smut in maize. **Agronomie**, Paris, v. 12, n.4, p. 303-336, 1992.

BLAIR, G. L. Nutrient efficiency: what do we really mean? In: RANDALL, J. P.; DELHAIZE, E.; ROBERT, E.; RICHARDS, A. C.; MUNNS, R. (Ed.). **Genetic aspects of plant mineral nutrition**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1983. p. 463-470.

BLISS, F.A. Utilization of vegetable germplasm. **HortScience**, Alexandria, v. 16, n. 2 , p.129-132, April 1981

BOCHEV, B. Genetic basis of mineral nutrition in *Triticum aestivum* L. II. Effect of the cytoplasm on the absorption of nutrient elements. **Developments in Plant and Soil Science**, New York, v. 8, p. 429-433, 1983..

BOLAN, N. S.; ROBSON, A. D.; BARROW, N. J. Plant and soil factors including mycorrhizal infection causing sigmoidal response of plants to applied phosphorus. **Plant and Soil**, The Hague, v. 73, 187-201, 1983.

BOLANOS, J.; EDMEADES, G. O. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. II. Responses in reproductive behavior. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 31, p.253-268, 1993.

BORLAUG, N. E.; DOWSWELL, C. R. Fertilizer: to nourish infertile soil that feeds a fertile population that crowds a fragile world. **Fertilizer News**, New Delhi, v. 38, n. 7, p. 11-20, 1993.

BRASIL, E. C. **Mecanismos envolvidos na eficiência de aquisição de fósforo em genótipos de milho**. 2003. 161 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

BROWN, J. C. Interactions involving nutrient elements. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 14 p. 93-106, 1963.

BULL, L. T. Nutrição mineral do milho. In: BULL, L. T; CANTARELLA, H. (Ed.). **Cultura do milho**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: POTAFOS, 1993. p. 63-145.

BUSO, G. S. C.; BLISS, F. A. Variability among lettuce cultivars grown at two levels of available phosphorus. **Plant and Soil**, The Hague, v. 111, n. 1, p. 67-73, 1988.

CAMPBELL, K. W.; WHITE, D. G. Inheritance of resistance to *Aspergillus* ear rot and aflatoxin in corn genotypes. **Phytopatology**, St. Paul, v. 85, n. 8, p. 886-896, 1995.

CEBALLOS, H.; PANDEY, S.; NARRO, L.; PEREZ, 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, p. 662-668, 1998.

CHAUBEY, C. N; SENADHIRA, D.; GREGORIO, G. B.. Genetic analysis of tolerance for phosphorous deficiency in rice (*Oryza sativa L.*). **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 89, n. 2-3, p. 313-317, 1994.

CHUNG, C.; MATHER, D.; REID, M. L.; HAMILTON, R.I. Inheritance of kernel resistance to *Fusarium graminearum* in maize. **Journal of Heredity**, Washington, v. 87, n.5. p. 382-385, 1996.

CLARK, R. B.; BROWN, J. C. Differential phosphorus uptake by phosphorus-stressed corn inbreds. **Crop Science**, Madison, v. 14, p.505-508, 1974.

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

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

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

COCHRAN, W.G.; COX, G. M. **Experimental design**. 2 ed. New York: John Wiley, 1966. 611 p.

COLTMAN, R. R.; GERLOFF, G. C.; GABELMAN, W. H. Differential tolerance of tomato strains to maintained and deficient levels of phosphorus. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Mount Vernon, v. 110, n. 2, p. 140-144, 1985.

COLTMAN, R. R.; GABELMAN, W. H.; GERLOFF, G. C.; BARTA, S. Genetics and physiology of low-phosphorus tolerance in a family derived from two differentially adapted strains of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GENETIC ASPECTS OF PLANT MINERAL NUTRITION, 2., 1985, Madison. **Genetic aspects of plant mineral nutrition**. Dordrecht: Martinus Nijhoff, 1987. p. 309-315. (Developments in Plant and Soil Sciences).

CORRALES, I.; AMENOS, M.; POSCHENRIEDER, C.; BARCELÓ J. Phosphorous efficiency and root exudates in two contrasting maize varieties. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 30, n. 6, p. 887-900, June 2007.

CRASWELL, E. T.; GODWIN, D. C. The efficiency of nitrogen fertilizers applied to cereals growing in different climates. In: TINKER, P. B.; LAUCHLI, A. (Ed.). **Advances in plant nutrition**. New York: Praeger, 1984. p 1-55.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 2.ed. Viçosa: UFV, 1997. 390 p.

DARRAH, L. L.; HALLAUER, A. R. Genetic effects estimated from generation means in four diallel sets of maize inbreds. **Crop Science**, Madison, v.12, p. 615-621, 1972.

DAVALOS, A. **Selection for efficiency in phosphorus utilization in rice (*Oryza sativa* L.)**. Munoz, Nueva Ecija: [s.n.], Oct. 1985. 125 p.

DUNCAN, R. R. Genetic manipulation. In: WILKINSON, R. E. (Ed). **Plant-environment interactions**. New York: Marcel Dekker, 1994. p.1-38.

EBHART, S. A.; GARDNER, C. O. A general model for genetic effects. **Biometrics**, Washington, v. 22, p. 864-881, 1966.

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

FAGERIA, N.K., WRIGHT, R.J.; BALIGAR, V.C. Rice cultivar evaluation for phosphorus use efficiency. **Plant and Soil**, The Hague, v. 111, p. 105-109, 1988.

FAGERIA, N. K; BALIGAR, V. C. Screening crop genotypes for mineral stresses. In: WORKSHOP ON ADAPTION OF PLANTS TO SOIL STRESSES, 1993, Lincoln. **Proceedings...** . Lincoln: University of Nebraska, 1993. p.142-162. (INTSORMIL. Publications, 94-2).

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Phosphorus-use efficiency by corn genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 20, n.10, p. 1267-1277, 1997.

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

FAGERIA, N. K; BALIGAR, V. C. Yield and yield components of lowland rice as influenced by timing of nitrogen fertilization. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 22, n.1, p. 23-32, 1999.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; LI, Y. Enhancing phosphorus use efficiency in crop plants grown on Brazilian oxisols. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 3., 2006. Uberlândia. **Proceedings...** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. p. 79-80.

FALCONER, D. S. **Introduction to quantitative genetics**. 3. ed. New York: J. Wiley 1989. 438 p.

FAWOLE, I.; GABELMAN, W. H.; GERLOFF, G. C.; NORDHEIM, E. V. Heritability of efficiency in phosphorus utilization in beans (*Phaseolus vulgaris L.*) grown under phosphorus stress. **Journal of American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 107, n.1, p. 94-97, 1982.

FEIL, B.; MOSER, S. B.; JAMPATONG, S.; STAMP, P. Mineral composition of the grains of tropical maize varieties as affected by pre-anthesis drought and rate of nitrogen fertilization. **Crop Science**, Madison, v. 45, p. 516-523, 2005.

FERREIRA, R. M. G.; TEIXEIRA, A. R. N. Sulfur starvation in *Lemna* leads to degradation of ribulose biphosphate carboxylase without plant death. **Journal of Biological Chemistry**, Baltimore, v. 267, p. 7253-7257, 1992.

FOX, R. H. Selection for phosphorus efficiency in corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 9, n.1, p.13-37, 1978.

FURLANI, A. M. C.; CLARK, R. B.; MARANVILLE, J. W.; ROSS, W. M. Sorghum genotype differences in phosphorus uptake rate and distribution in plant parts. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 7, n. 7. p. 1113-1126, 1984.

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.; 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.; 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.

GABELMAN, W. H.; GERLOFF, G. C. The search and interpretation of genetic controls that enhance plant growth under deficiency levels of a macronutrient. **Plant and Soil**, The Hague, v. 72, p. 335-350, 1983.

GAMA, E. E. G.; PARENTONI, S. N.; ALVES, V. M. C.; GUIMARÃES, P. E. O.; PACHECO, C. A. P.; LEITE, C. E. P.; TEIXEIRA, F. F.; MAGALHÃES, J. V. Combining ability among maize inbred lines for tolerance to low phosphorus content in the soil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 3., 2006. Uberlândia. **Proceedings...** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. p. 124.

GAMBLE, E. E. Gene effects in corn (*Zea mays*, L.).I Separation and relative importance of gene effects for yield. **Canadian Journal Plant Science**, Ottawa, v. 42, p. 339-348, Apr. 1962a.

GAMBLE, E. E. Gene effects in corn (*Zea mays*, L.).II Relative importance of gene effects for plant height and certain component attributes of yield. **Canadian Journal Plant Science**, Ottawa, v. 42, p. 349-358, Apr. 1962b.

GERLOFF, G. C. Intact-plant screening for tolerance of nutrient-deficiency stress. **Plant and Soil**, The Hague, v. 99, p. 3-16, 1987.

GOLDSTEIN, A. H.; BAERTLEIM, D. A.; McDANIEL, R. G. Phosphate starvation inducible metabolism in *Lycopersicon esculentum* I. Excretion of acid Phosphatase by tomato plants and suspension culture. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 87, p. 711-715, 1988.

GOLDSTEIN, A. H. Plant cells selected for resistance to phosphate starvation show enhanced P use efficiency. **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 82, p. 191-194, 1991.

GOOD, A. G.; SHRAWAT, A. K.; MUENCH, D. G. Can less yield more ? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production ? **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 9, p. 597-605, 2004.

GORNY, A. G.; SODIKIEWICZ, T. Genetic analyses of the phosphorus and nitrogen utilization efficiencies in mature spring barley plants. **Plant Breeding**, Berlin, v. 120, p. 129-132, 2001.

GORSLINE, G. W.; THOMAS, W. I.; BAKER, D. E. Inheritance of P, K, Mg, Cu, B, Zn, Mn, Al and Fe concentrations by corn (*Zea mays L.*) leaves and grain. **Crop Science**, Madison, v. 4, p. 207-210, 1964.

GORZ, H. J.; HASKINS, F. A.; PEDERSEN, J. F.; ROSS, W. M. Combining ability effects for mineral elements in forage sorghum hybrids. **Crop Science**, Madison, v. 27, p. 216-219, 1987.

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

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

HALLAUER, A. R.; MIRANDA FILHO, J. B. **Quantitative genetics in maize breeding**. Iowa: State University Press, 1988. 468 p.

HANWAY, J. J. Corn growth and composition in relation to soil fertility: I. Growth of different plant parts and relation between leaf weight and grain yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 54, p. 145-148, 1962.

HARVEY, P. H. Hereditary variation in plant nutrition. **Genetics**, Baltimore, v. 24, p. 437-461, 1939.

HAYMAN, B. I. The separation of epistatic from additive and dominance variation in generation means. **Heredity**, Edinburgh, v.12, p. 371-290, 1958.

HAYMAN, B. I. The separation of epistatic from additive and dominance variation in generation means II. **Genetica**, The Hague, v. 31, p. 133-146, 1960.

HISINGER, P.; JAILARD, B.; Le CADRE-BARTGÉLÉMY, E.; PLASSARD, C. ; DREVON, J.J.. The roots of phosphorus acquisition efficiency in crops In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 3., 2006. Uberlândia. **Proceedings...** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. p. 75-76.

HORST, W. J.; ABDOU, M.; WIESLER, F. Genotypic differences in phosphorus efficiency in wheat. In: BARROW, N. J. (Ed.). **Plant nutrition: from genetic engineering to field practice**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 367-370.

HU, B.; WU, P.; LIAO, C. Y.; ZHANG, W. P.; NI, J. J. QTLs and epistasis underlying activity of acid phosphatase under phosphorus sufficient and deficient condition in rice (*Oryza sativa L.*). **Plant and Soil**, The Hague, v. 230, p. 99-105, 2001.

ISFAN, D. Genotypic variability for physiological efficiency index of nitrogen in oats. **Plant and Soil**, The Hague, v. 154, p. 53-59, 1993.

ISMAIL, A. M.; GATDULA, K. A.; HEUER, S.; LU X.; WISSUWA, M. Phosphorus deficiency tolerance in rice: genetic and molecular bases and implications for breeding. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 3., 2006. Uberlândia. **Proceedings...** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. p. 121-122.

ISRAEL, D. W.; RUFTY; J. W. Influence of phosphorus nutrition on phosphorus and nitrogen utilization efficiencies and associated physiological responses in soybean. **Crop Science**, Madison, v.28, p. 954-960, 1988.

IVANOVIC, M.; QUARRIE, S. A.; DJORDJEVIC, J.; PEKIC, S. Inheritance of abscisic acid production in maize (*Zea mays*, L.) leaves in response to rapid drought stress in the field. **Maydica**, Bergamo, v. 37, n. 4, p. 313-318, 1992.

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

JINKS, J. L.; JONES, R. M. Estimation of the components of heterosis. **Genetics**, Baltimore, v. 43, p. 223-234, 1958.

KEARSEY, M. J.; POONI, H. **Genetic analysis of quantitative traits**. London: Chapman & Hall, 1996. 381 p.

LAFITTE, H. R.; EDMEADES, G. O. Improvement for tolerance to low soil nitrogen in tropical maize. I. Selection criteria. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 39, p.1-14, 1994.

LAFITTE, H. R.; EDMEADES, G. O. Stress tolerance in tropical maize is linked to constitutive changes in ear growth characteristics. **Crop Science**, Madison, v. 35, p. 820-826, 1995.

LIAO, H.; XIAOLONG, Y. Seed size is closely related to phosphorus use efficiency and photosynthetic phosphorus use efficiency in common bean. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 22, n. 6, p. 877-888, 1999.

LIU, G.; DUNLOP, J.; PHUNG, T.; LI, Y. Comparisons of two quick methods for evaluating phosphorus efficiency genotypes. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 3., 2006. Uberlândia. **Proceedings...** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. p. 100-101.

LORENS, A. J.; SCOTT, M. P.; LAMKEY, K. R. Quantitative determination of phytate and inorganic phosphorus for maize breeding. **Crop Science**, Madison, v. 47, p. 600-604, 2007.

LOUGHMAN, B. C.; ROBERTS, S. C.; GOODWIN-BAILEY, C. I. Varietal differences in physiological and biochemical responses to changes in the ionic environment. **Plant and Soil**, The Hague, v. 72, p. 245-259, 1983.

LYNCH, J. P.; HO, M. D. Rhizoeconomics: carbon costs of phosphorus acquisition. **Plant and Soil**, The Hague, v. 269, n. 1-2, p. 45-56, 2005.

MACHADO, C. T. **Avaliação da eficiência de utilização de fósforo de variedades locais de milho (*Zea mays L.*)**. 1995. 128 f. Tese (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Agronomia, Itaguaí .

MACHADO, C. T. T.; GUERRA, J. G. M.; ALMEIDA, D. L.; MACHADO, A. T. Variabilidade entre genótipos de milho para eficiência no uso de fósforo. **Bragantia**, Campinas, v. 58, n.1, p. 109-124, 1999

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

MAGNAVACA, R.; GAMA, E. E. G.; BAHIA FILHO, A. F. C.; FERNANDES, F. T. Obtenção de híbridos duplos de milho para tolerância a toxidez de alumínio. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v. 23, p. 971-977, 1988.

MAKMUR, A.; GERLOFF, G. C.; GABELMAN, W. H. Physiology and inheritance of efficiency in potassium utilization in tomatoes grown under potassium stress. **Journal of the America Society for Horticultural Science**, Mount Vernon, v.103, p. 545-549, 1978.

MALAVOLTA, E; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Piracicaba: Potafos, 1989. 201 p.

MATHER, K.; JINKS, L. **Biometrical genetics**. Ithaca: Cornell Univ.,1971 382 p.

McCONNELL, R. L.; GARDNER, C. O . Inheritance of several cold tolerance traits in corn. **Crop Science**, Madison, v. 19, p. 847-852, 1979.

MOLL, R. H.; KAMPRATH, E. J.; JACKSON, W. A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, p. 562-564, 1982.

MOLLIER, A.; PELLERIN, S. Area leaf and root expansion rates under P deficiency, controlled by P or C content in meristematic zones? In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 3., 2006. Uberlândia. **Proceedings...** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. p. 83-85.

MORENO-GONZALES, J.; DUDLEY, J.W. Epistasis in related and unrelated maize hybrids determined by three methods. **Crop Science**, Madison, v. 121, p. 644-651, Sep/Oct. 1981.

MURREL, T. S.; FIXEN, P. E. Improving fertilizer P effectiveness: challenges for the future. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 3., 2006. Uberlândia. **Proceedings...** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. p. 150-151.

NANKAN, C.; PATAKY, J. K. Resistance to kernel infection by *Fusarium moniliforme* in the sweet corn inbred IL 25b. **Plant Disease**, St. Paul, v. 80, n.5, p. 393-398, 1996.

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

O'DELL, B. L.; BOLAND, A. R.; KOIRHTYOHANN, S.R. Distribution of phytate and nutritionally important elements among the morphological components of cereal grains. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 20, p. 718-721, 1972.

OLIVEIRA, C. A.; SÁ, N. M. H.; MARRIEL, I. E.; GOMES, E. A.; MUZZI, M. R. S.; CARNEIRO, N. P.; LANA, U. G. P.; RAPOSEIRAS, R.; MONTEIRO, G. G.; SCHAFFERT, R. E; ALVES, V. M. C. Phosphate solubilizing microorganisms closely associated with maize rhizosphere. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 3., 2006. Uberlândia. **Proceedings...** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. p. 234-235.

OLIVEIRA, V. R.; CASALI, V. W.; 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

OSBORNE, L.D.; RENGEL, Z. Screening cereals for genotypic variation in efficiency of phosphorus uptake and utilization. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 53, p. 295-303, 2002.

O'SULLIVAN, J.; GABELMAN, W. H.; GERLOFF, G. C. Variations in efficiency of nitrogen utilization in tomatoes (*Lycopersicon esculentum* Mill.) grown under nitrogen stress. **Journal of the American Society of Horticultural Science**, Mount Vernon, v. 99, p. 543-547, 1974.

OZTURK, L; EKER, S.; TORUM, B.; CAKMAK, I. Variation in phosphorus efficiency among 73 bread and durum wheat genotypes grown in a phosphorus-deficient calcareous soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 269, p. 69-80, 2005.

PARENTONI, S. N.; ALVES, V. M. C.; SANTOS, M. X.; GAMA, E. E. G.; LOPES, M. A.; GUIMARÃES, P. E. O.; PACHECO, C. A. P.; BAHIA FILHO, A. F. C.; MEIRELES, W. F.; SOUZA, I. R. P.; CORREA, L. A. Identificação de genótipos padrões para eficiência na utilização de P em milho. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 22., 1998. **Globalização e segurança alimentar**. Recife: ABMS, 1998. CD ROM..

PARENTONI, S. N.; VASCONCELOS, C. A.; ALVES, V. M. C.; PACHECO, C. A. P.; SANTOS, M. X.; GAMA, E. E. G.; MEIRELES, W. F.; CORREA, L. A.; PITTA, G. V. E.; BAHIA FILHO, A. F. C. Eficiência na utilização de fósforo em genótipos de milho. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 23., 2000, Uberlândia. **A inovação tecnológica e a competitividade no contexto dos mercados globalizados: resumos**. Sete Lagoas: ABMS/Embrapa Milho e Sorgo/Universidade Federal de Uberlândia, 2000. p. 92.

PARENTONI, S. N.; ALVES, V. M. C.; GAMA, E. E. G.; COELHO, A. M.; GUIMARÃES, C. T.; GUIMARÃES, P. E. O.; PACHECO, C. A. P.; MAGALHÃES, J. V.; GODOY, C. L.; OLIVEIRA, D. A.; MEIRELES, W. F.; VASCONCELOS, M. J. V.; SOUZA, I. R. P.; SCHAFFERT, R. E. Breeding maize for Al tolerance, P use efficiency and acid soil adaptation for the cerrado areas of Brasil : the EMBRAPA's experience. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 3., 2006. Uberlândia. **Proceedings...** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006 (a) 129-131.

PARENTONI, S. N.; SOUSA JÚNIOR, C. L.; ALVES, V. M. C.; GAMA, E. E. G.; COELHO, A. M.; PACHECO, C. A. P.; GUIMARÃES, P. E. O.; OLIVEIRA, D. A.; MEIRELES, W. F.; OLIVEIRA, A. C. Relative importance of uptake and utilization efficiency in phosphorus use efficiency in a red oxisol: following Moll's insights. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 26.; SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE A LAGARTA-DO-CARTUCHO, SPODOPTERA FRUGIPERDA, 2.; SIMPÓSIO SOBRE COLLETOTRICHUM GRAMINICOLA, 2006, Belo Horizonte. **Inovação para sistemas integrados de produção: resumos**. Sete Lagoas: ABMS: Embrapa Milho e Sorgo, 2006 (b). p. 527.

PELLERIN, S.; MOLLIER, A.; PLÉNET, D. Phosphorus deficiency affects the rate of emergence and number of maize adventitious nodal roots. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, p. 690-697, July/Aug. 2000.

PEREIRA, A. P.; BALMER, E.; MIRANDA FILHO, J. B. Inheritance of resistance to stalk rot caused by *Colletotrichum graminicola* (CES) Wils, in maize (*Zea mays* L.). **Revista Brasileira de Genética**, Ribeirão Preto, v.12, n.1, p. 53-65, 1989.

PERÉZ-VELÁSQUEZ, J. C. **Estimativas de efeitos gênicos de diversos caracteres em milho (*Zea mays*, L.) em solos ácidos e não ácidos.** 2000. 127 f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

PIMENTEL-GOMEZ, F. **Curso de Estatística Experimental.** 14. ed. Piracicaba: Nobel, 2000. 477 p.

PINTO, K.; BERTOLDI, C.; DELATORRE, C. A. *p37* an *Arabidopsis thaliana* conditional mutant deficient in phosphorus signaling. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 3., 2006. Uberlândia. **Proceedings...** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. p. 132-133.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; ROQUE, C. G. Resposta da cultura do milho a modos de aplicação e doses de fósforo em adubação de manutenção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, p. 83-90, 2001

RABOY, V.; DICKINSON, D. B; NEUFFER, M. G. A survey of maize kernel mutants for variation in phytic acid. **Maydica**, Bergamo, v. 35. p. 383-390, 1990

RABOY, V. Seeds for a better future: `low phytate`grains help to overcome malnutrition and reduce pollution. **Trends in Plant Science**, Oxford v. 6, n. 10, p. 458-462, Oct. 2001.

RAGHOTHAMA, K.G.; KARTHIKEYAN, A.S.; JAIN,A.S.; RAMAIAH, M.; VASCONCELOS, M.J.V.; WARD, J.; CAO, A.; BALLACHANDA, D. Molecular regulation of phosphate starvation responses in plants. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 3., 2006. Uberlândia. **Proceedings...** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. p. 86.

RAO, N. N.; WANG, E.; YASHPHE, J.; TORRIANI, A. Nucleotide pool in Pho regulon mutants and alkaline Phosphatase synthesis in *Escherichia coli*. **Journal of Bacteriology**, Washington, v.165, p. 205-211, 1986.

RASMUSSEN, D. C., HESTER, A. J., FICK, G. N., BYRNE, I. Breeding for mineral content in wheat and barley. **Crop Science**., Madison, v. 11, p. 623-626, 1971.

RENGEL, Z. (Ed.) **Mineral nutrition of crops: fundamental mechanisms and implications.** New York: Food Products Press, 1999. 399 p.

RESENDE, M. D. V.; SOUZA JÚNIOR, C. L.; GAMA, E. E. G.; MAGNAVACA, R. Análise quantitativa da seleção envolvendo progênies de milho (*Zea mays L.*) em solos sob cerrado e fértil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, n. 5, p. 495-507, maio 1997.

RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E.; ARAÚJO, I. B.; ALVES, V. M. C.; SANTOS, J. Z. L.; VILELA, L. C. S. Eficiência nutricional do milho em resposta a fontes e modos de aplicação de fósforo. In: REUNIAO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRICAÇÃO DE PLANTAS, 25., REUNIAO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 9., SIMPOSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 7, REUNIAO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 4, 2002. Rio de Janeiro. **FertBIO 2002**. Rio de Janeiro: SBM/SBCS, 2002. CD-ROM. Resumo 459

RIBAULT, J. M.; HOISINGTON, D. A.; DEUTSCH, J. A.; JIANG, C.; GONZALEZ-de-LEON, D. Identification of quantitative trait loci under drought conditions in tropical maize. 1. Flowering parameters and the anthesis-silking interval. **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 92, p. 905-914, 1996.

ROÈMER, W.; SCHENK, H. Influence of genotype on phosphate uptake and utilization efficiencies in spring barley. **European Journal of Agronomy**, Oxford, v. 8, p. 214-224, 1998.

ROSEN, C. J.; KORCAK, R. F. Introduction to the colloquium. **HortScience**, Alexandria, v. 24, n. 4, p. 558-559, 1989.

ROWE, K. E.; ALEXANDER, W. L. Computations for estimating the genetic parameters in joint-scaling tests. **Crop Science**, Madison, v. 20, p. 109-110, 1980.

SALINAS, J. G.; SANCHEZ, P. A. Soil-plant relationships affecting varietal and species differences in tolerance to low available phosphorus. **Ciência e Cultura**, São Paulo, v.28, n.2, 1976, p.156-168.

SAHRAWAT, K. L.; SIKKA, M. Direct and residual phosphorus effects on soil test values and their relationships with grain yield and phosphorus uptake of upland rice on an Ultisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 33, p. 321-332, 2002.

SANCHEZ, P. A.; SALINAS, J. G. Low-input technology for managing oxisols and ultisols in tropical America. **Advances in Agronomy**, New York, v. 34, p. 279-406, 1981.

SANGUINETI, M. C.; CONTI, S.; LANDI, P.; TUBEROSA, R. Abscisic acid concentration in maize leaves: genetic control and response to divergent selection in two populations. **Maydica**, Bergamo, v. 41, n. 3, p. 193-203, 1996.

SAS INSTITUTE (Cary, NC). **SAS User's Guide Statistics**, Release 8.2 (TS2 MO), Windows. Cary, 2000.

SAUERBECK, D. R.; HELAL, H. M. Factors affecting the nutrient efficiency in plantas. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GENETIC ASPECTS OF PLANT MINERAL NUTRITION, 4., 1991, Canberra. **Genetic aspects of plant mineral nutrition** - proceedings. Dordrecht: Kluwer, 1993. p. 11-17. (Developments in Plant and Soil Science, 50).

SCHENK, M. K.; BARBER, S. A. Potassium and phosphorus uptake by corn genotypes grown in the field as influenced by root characteristics. **Plant and Soil**, The Hague, v. 54, p. 65-76, 1980.

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

SCHULTHESS, U.; FEIL, B.; JUTZI, S. C. Yield-independent variation in grain nitrogen and phosphorus concentration among Ethiopian wheats. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, p. 497-506, 1997.

SHARPLEY, A. N; McDOWELL, R. W.; KLEIMMAN, P. J. A. Phosphorus loss from land to water: integrating agriculture and environmental management. **Plant and Soil**, The Hague, v. 237 p. 287-307, 2001.

SHINANO, T.; SAITO, A.; TOKUTAKE, S.; WASAKI, J.; OSAKI, M. Proteomic analysis of rice response on P deficiency. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PHOSPHORUS DYNAMICS IN THE SOIL-PLANT CONTINUUM, 3., 2006. Uberlândia. **Proceedings...** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. p. 134-135.

SIDDIQI, M. Y; GLASS, 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, p. 289-302, 1981.

SILVA, A. E. da; GABELMAN, W. H. Screening maize inbred lines for tolerance to low-P stress condition. **Plant and Soil**, The Hague, v. 146, p. 181-187, 1992.

SILVA, A. E. da; 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**, The Hague, v. 146, p. 189-197, 1992.

SILVA, F. C. da (Org.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, DF : Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia; Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 1999. 370 p.

SOUSA-ROSA, O. de. Wheat breeding in Rio Grande do Sul, Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM WHEATS FOR MORE TROPICAL ENVIRONMENTS, 1984, Mexico. **Wheats for more tropical environments: proceedings**. Mexico: CIMMYT, 1985. p. 116-121.

STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H. **Principles and procedures of statistics**. New York: Mc Grow-Hill, 1960. 481 p.

STEENBJERG, F.; JAKOBSEN, S.T. Plant nutrition and yield curves. **Soil Science**, v. 95, p. 69-90, 1963.

TERMAN, G. L.; GIORDANO, P. M.; CHRISTENSEN, N. W. Corn hybrid yield effects on phosphorus, manganese and zinc absorption. **Agronomy Journal**, Madison, v. 67, p.182-184, 1975.

TERRY, M.; SCHETTINI M.; GABELMAN, W. H.; GERLOFF, G. C. Incorporation of phosphorus efficiency from exotic germplasm into agriculturally adapted germplasm of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Plant and Soil**, The Hague, v. 99, p. 175-184, 1987.

VENCOVSKY, R.; BARRIGA, P. **Genética biométrica no fitomelhoramento**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1992. 496 p.

WARDYN, B. M.; RUSSEL, W. K. Resource allocation in a breeding program for phosphorus concentration in maize grain. **Crop Science**, Madison, v. 44, p. 753-757, 2004.

WEERATHAWORN, P.; THIRAPORN, R.; SOLDATI, A.; STAMP, P. Yield and agronomic characters of tropical maize (*Zea mays* L.) cultivars under different irrigation regimes. **Journal of Agronomy and Crop Science-Zeitschrift fur Acker un Pflanzenbau**, Berlin, v. 168, n.5, p. 326-336, 1992.

WHITEAKER, G.; GERLOFF, G. C.; GABELMAN, W. H.; LINDGREN, D. Intraspecific differences in growth of beans at stress levels of phosphorus. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Mount Vernon, v. 101, n. 4, p. 472-275, 1976.

WISSUWA, M.; WEGNER, J.; AE, N.; YANO, M. Substitution mapping of Pup1: a major QTL increasing phosphorus uptake of rice from a phosphorus-deficient soil. **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 105 p. 890-897, 2002.

WOLF, D. P.; HALLAUER, A. R. Triple testcross analysis to detect epistasis in maize. **Crop Science**, Madison, v.37, p. 763-770, 1997.

ZHUL, J.; KAEPLER, S. M.; LYNCH, J. P. Mapping of QTL controlling root hair length in maize (*Zea mays L.*) under phosphorus deficiency. **Plant and Soil**, The Hague, v. 270, n. 1, p. 299-310, 2005.

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

ANEXOS

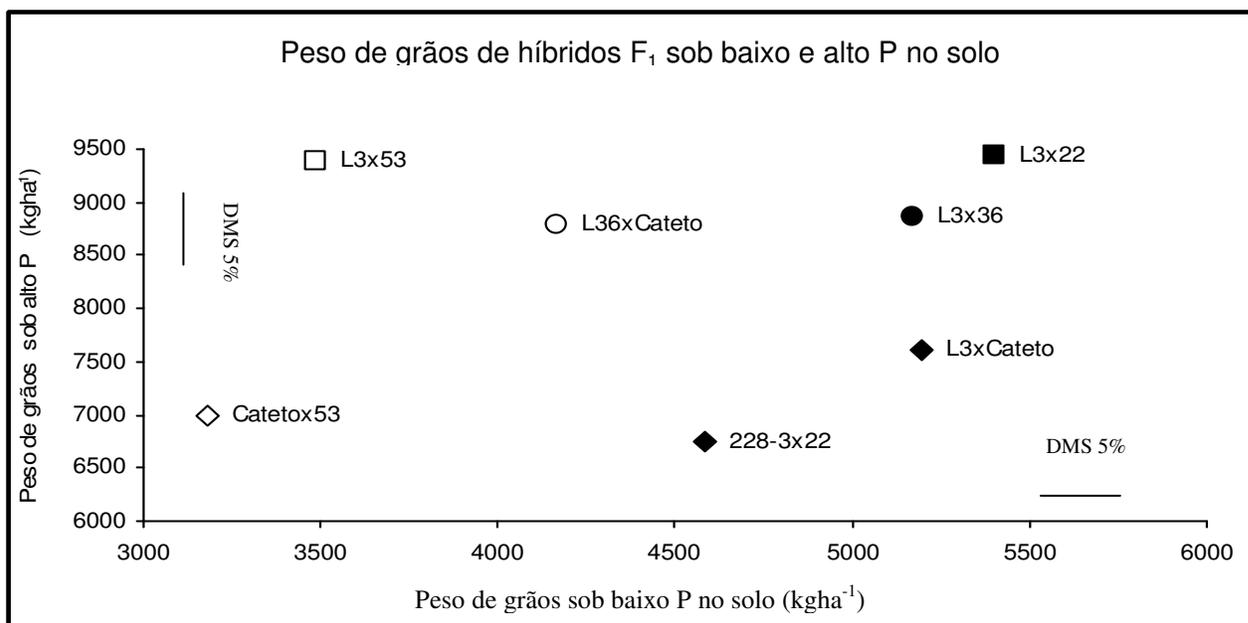


Figura 1- Peso de grãos (kg ha^{-1}) para sete híbridos F_1 's na média de três ambientes sob baixo P no solo (eixo x) e de dois ambientes sob alto P no solo (eixo y). Símbolos sólidos indicam genótipos classificados como eficientes ao P e símbolos abertos indicam genótipos ineficientes. Híbridos de uma mesma figura geométrica correspondem a pares de genótipos eficientes e ineficientes. Diferença mínima significativa (DMS-Duncan 5%) é mostrada nos eixos x e y

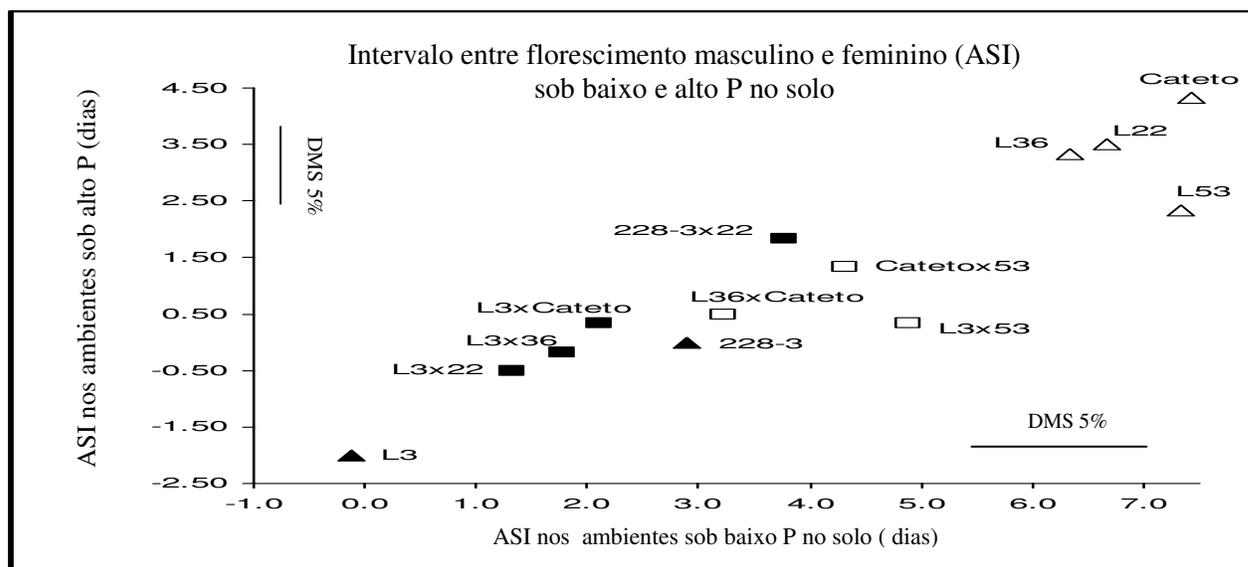


Figura 2- Intervalo entre florescimento masculino e feminino – ASI (dias) para seis linhagens (triângulos) e sete híbridos F_1 's (retângulos), para ambientes sob baixo (eixo x) e sob alto P no solo (eixo y). Símbolos sólidos indicam genótipos classificados como eficientes ao P e símbolos abertos indicam genótipos classificados como ineficientes. Diferença mínima significativa entre tratamento (DMS-Duncan 5%) é mostrada nos eixos x e y

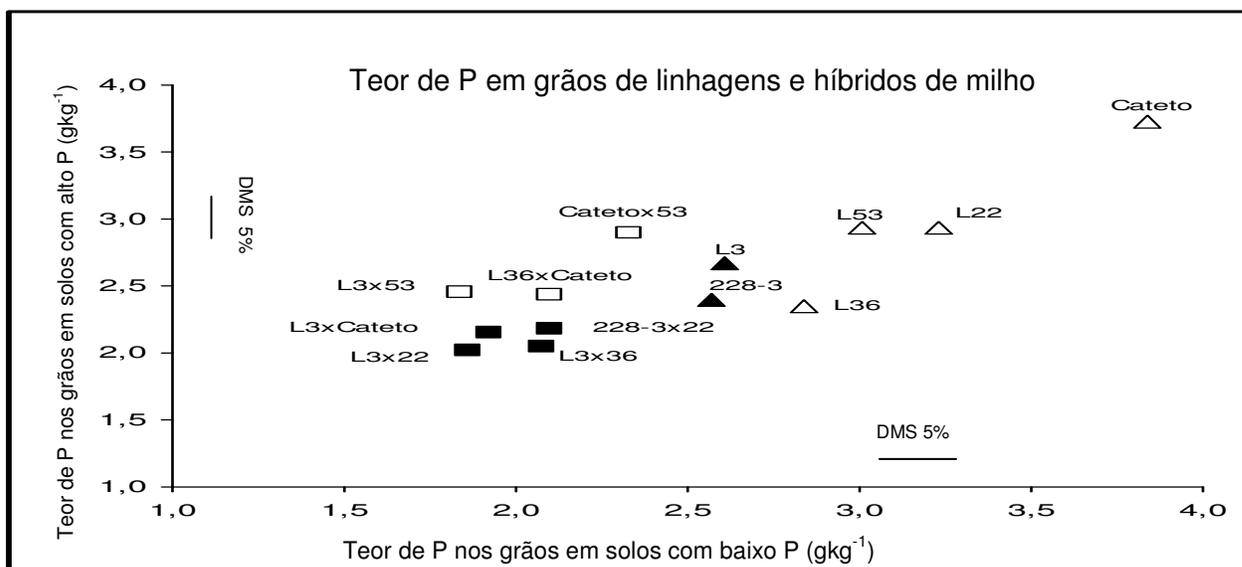


Figura 3– Teor de P nos grãos – TPG (gkg^{-1}) para seis linhagens (triângulos) e sete híbridos F_1 's (retângulos), para ambientes sob baixo (eixo x) e sob alto P no solo (eixo y). Símbolos sólidos indicam genótipos classificados como eficientes ao P e símbolos abertos indicam genótipos classificados como ineficientes. Diferença mínima significativa entre tratamentos (DMS-Duncan 5%) é mostrada nos eixos x e y

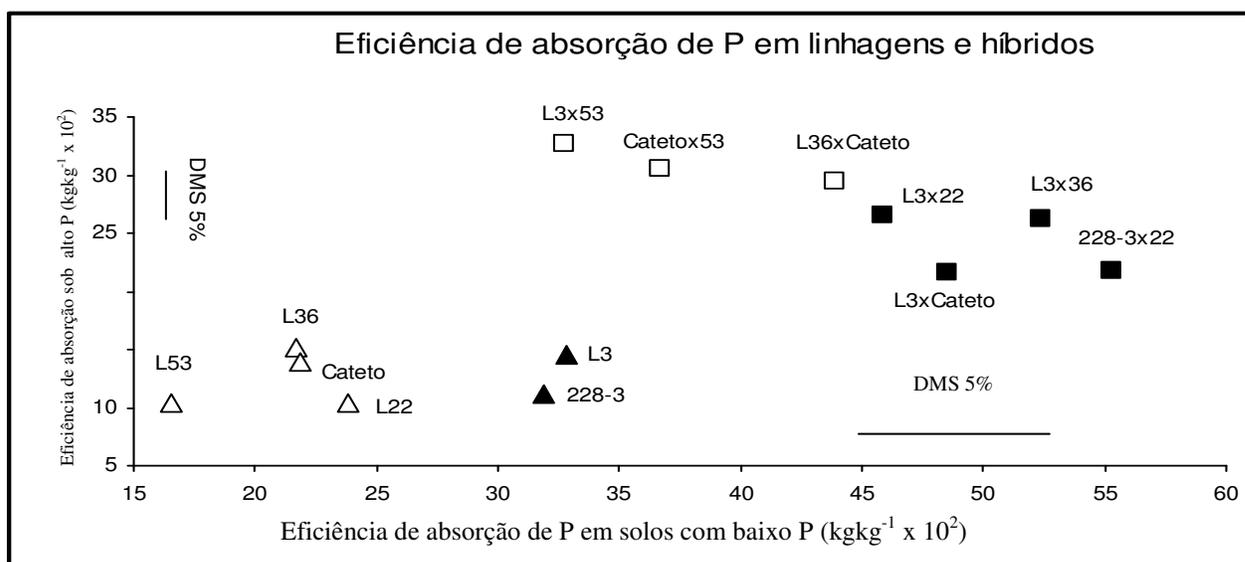


Figura 4– Eficiência de absorção de P – EFABS ($\text{kgkg}^{-1} \times 10^2$) para seis linhagens (triângulos) e sete híbridos F_1 's (quadrados), para ambientes sob baixo (eixo x) e sob alto P no solo (eixo y). Símbolos sólidos indicam genótipos classificados como eficientes ao P e símbolos abertos indicam genótipos classificados como ineficientes. Diferença mínima significativa entre tratamentos (DMS-Duncan 5%) é mostrada nos eixos x e y

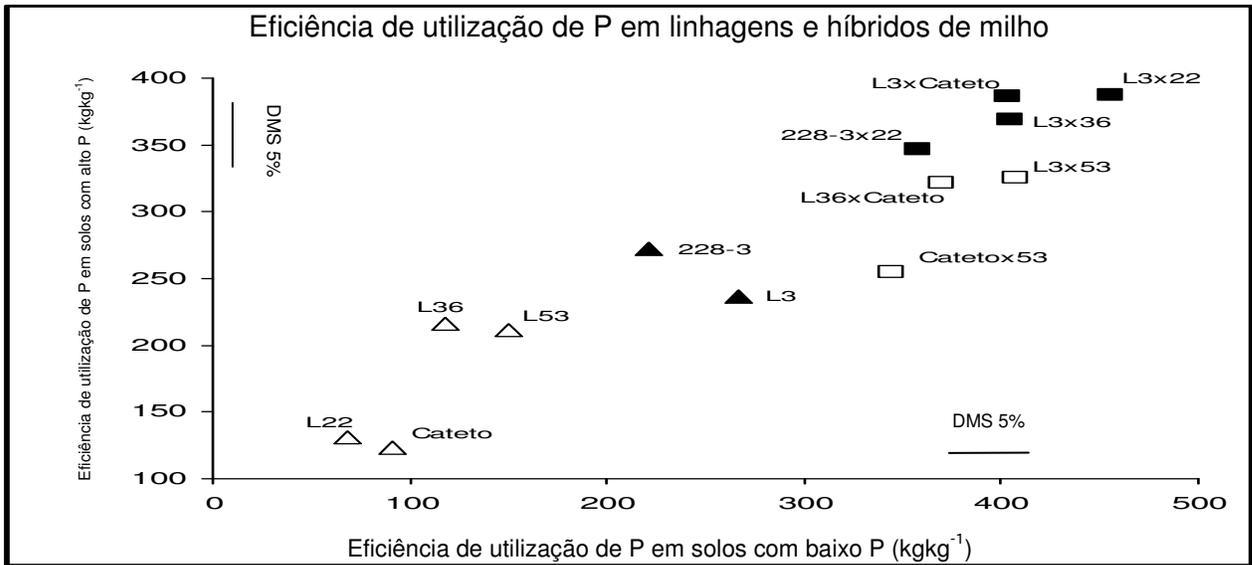


Figura 5– Eficiência de utilização de P – EFUTIL (kgkg^{-1}) para seis linhagens (triângulos) e sete híbridos F_1 's (retângulos), para ambientes sob baixo (eixo x) e sob alto P no solo (eixo y). Símbolos sólidos indicam genótipos classificados como eficientes ao P e símbolos abertos indicam genótipos classificados como ineficientes. Diferença mínima significativa entre tratamentos (DMS-Duncan 5%) é mostrada nos eixos x e y

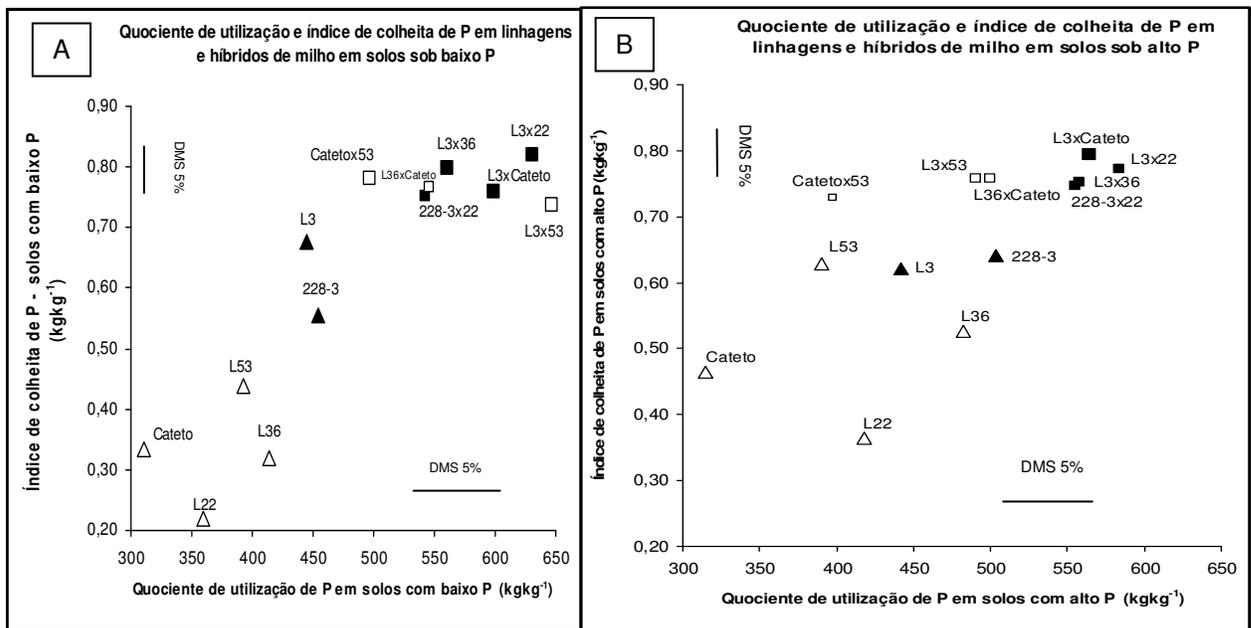


Figura 6– Quociente de utilização (eixo x) e índice de colheita de P (eixo y), nos ambientes sob baixo P no solo (A) e nos ambientes sob alto P no solo (B) para seis linhagens (triângulos) e sete híbridos F_1 's (quadrados). Símbolos sólidos indicam genótipos classificados como eficientes ao P e símbolos abertos indicam genótipos classificados como ineficientes. Diferença mínima significativa entre tratamentos (DMS-Duncan 5%) é mostrada nos eixos x e y. Híbridos não diferiram significativamente para Índice de colheita de P.

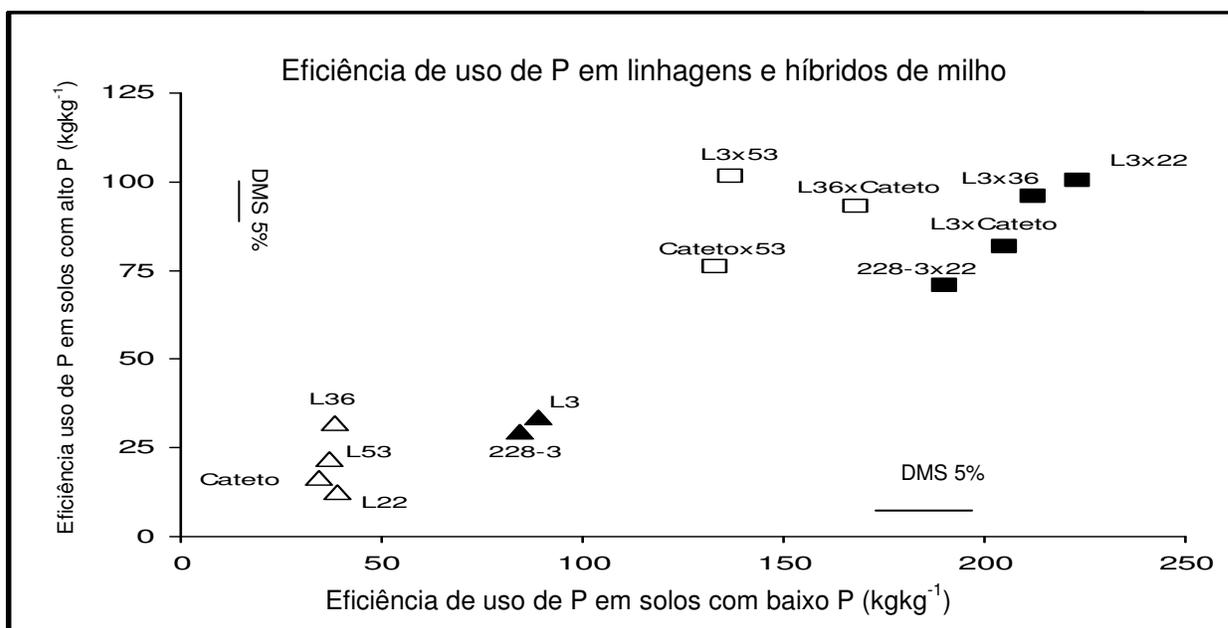


Figura 7– Eficiência de uso de P – EFUSO (kgkg^{-1}) para seis linhagens (triângulos) e sete híbridos F_1 ’s (retângulos), para ambientes sob baixo (eixo x) e sob alto P no solo (eixo y). Símbolos sólidos indicam genótipos classificados como eficientes ao P e símbolos abertos indicam genótipos classificados como ineficientes. Diferença mínima significativa entre tratamentos (DMS-Duncan 5%) é mostrada

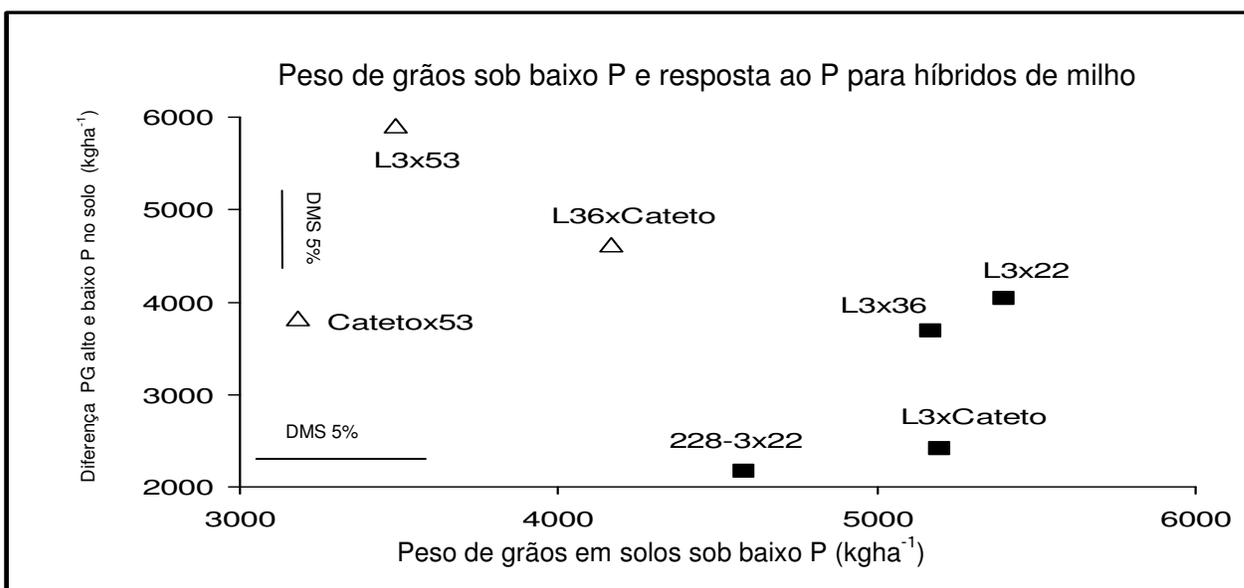


Figura 8– Peso de grãos (kgha^{-1}) sob baixo P no solo (medida de eficiência ao P) e diferença de peso de grãos entre níveis alto e baixo de P (medida de resposta ao P), para híbridos F_1 ’s classificados como eficientes ao P (símbolos sólidos) e ineficientes (símbolos abertos). Diferença mínima significativa entre tratamentos (DMS-Duncan 5%) é mostrada nos eixos x e y

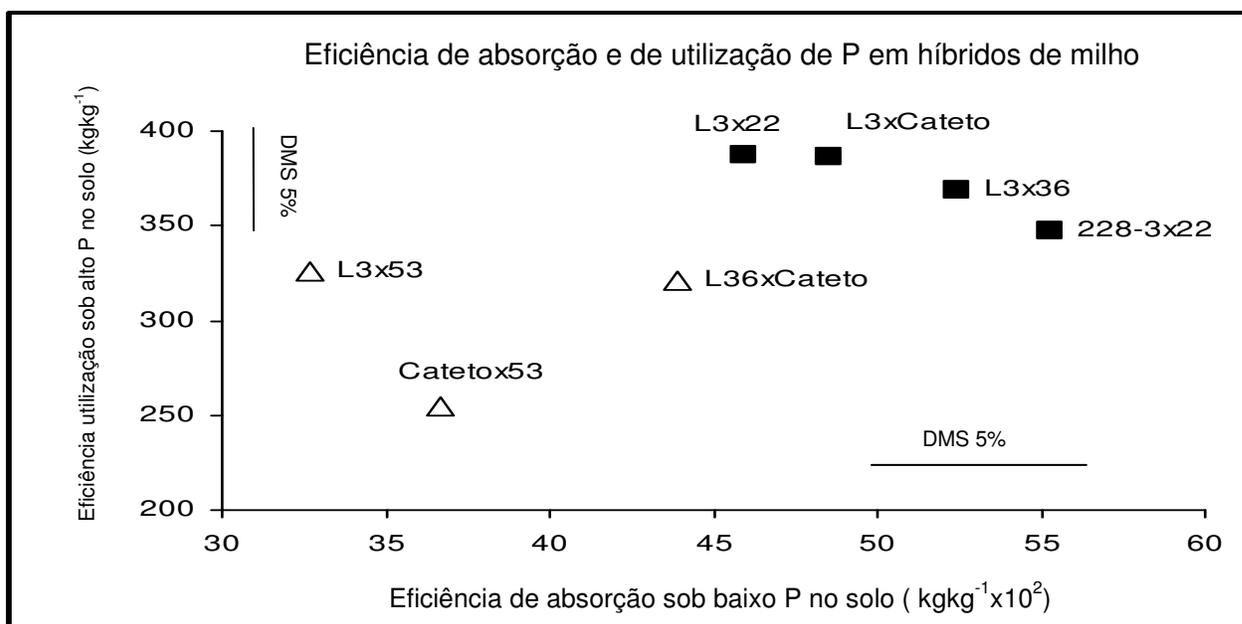


Figura 9– Eficiência de absorção sob baixo P no solo (eixo x) e eficiência de utilização sob alto P no solo (eixo y) para híbridos F_1 's classificados como eficientes ao P (símbolos sólidos) e ineficientes (símbolos abertos). Diferença mínima significativa entre tratamentos (DMS-Duncan 5%) é mostrada nos eixos x e y

Tabela 3 – Ambientes e níveis de P no solo (alto e baixo), ano de avaliação, caracterização química dos ambientes (0-20 e 20-60 cm), fósforo (P) suprido pelo solo, P suprido via fertilizante e P total disponível no perfil do solo

AMBIENTE	ANO	PERFIL (cm)	pH H ₂ O	H + Al cmol _c kg ⁻¹	Al cmol _c kg ⁻¹	Ca cmol _c kg ⁻¹	Mg cmol _c kg ⁻¹	K mgkg ⁻¹	P mgkg ⁻¹	MO %	Sat. Al. %	P suprido pelo solo (kgP ha ⁻¹)	P via adubo ¹ (kgP ha ⁻¹)	P Total Disponível (kgP ha ⁻¹)
AMBIENTE 2 (ALTO P)	2004/05	0-20	5,83	3,16	0,10	3,49	0,58	94,82	15,31	2,85	2,39	30,62		
		20-60	5,41	4,62	0,40	2,05	0,35	50,91	2,81	2,36	15,24	11,24		
												41,86	39,30	81,16
AMBIENTE 5 (ALTO P)	2005/06	0-20	5,50	5,82	0,45	3,32	0,62	127,00	16,00	2,74	15,82	32,00		
		20-60	5,20	6,08	0,75	0,91	0,29	48,00	3,00	2,72	36,22	12,00		
												44,00	39,30	83,30
AMBIENTE 3 (BAIXO P)	2004/05	0-20	5,47	5,65	0,32	2,24	0,57	44,10	4,40	3,79	10,00	8,80		
		20-60	5,16	6,60	0,56	1,06	0,28	40,00	2,00	2,74	26,00	8,00		
												16,80	-	16,80
AMBIENTE 7 (BAIXO P)	2005/06	0-20	4,66	7,05	1,17	1,11	0,13	121,14	7,37	2,79	43,60	14,84		
		20-60	4,63	8,34	1,44	0,62	0,07	70,57	2,73	2,84	62,32	10,92		
												25,76	-	25,76
AMBIENTE 8 (BAIXO P)	2005/06	0-20	5,40	4,65	0,20	3,14	0,77	84,00	6,33	3,26	4,89	12,66		
		20-60	4,80	6,13	0,53	0,88	0,24	30,00	3,04	2,20	26,00	12,16		
												24,82	-	24,82

¹ 200 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo no sulco de plantio = 39,30 kg P ha⁻¹

Tabela 4 – Esquema da análise de variância conjunta para os cinco ambientes, para delineamento em blocos completos casualizados com as respectivas esperanças dos quadrados médios [E(QM)] e testes de F apropriados

FV	GL	QM	E(QM)	F
Ambientes (A)	4	QM1	$\sigma_e^2 + t \sigma^2_{r/a} + tr V_A^\dagger$	QM1/QM5
Nível P alto	1	QM2	$\sigma_e^2 + t \sigma^2_{r/a} + tr V_{PA}$	QM2/QM5
Nível P baixo	2	QM3	$\sigma_e^2 + t \sigma^2_{r/a} + tr V_{PB}$	QM3/QM5
Entre níveis de P	1	QM4	$\sigma_e^2 + t \sigma^2_{r/a} + tr V_{PE}$	QM4/QM5
Rep/Ambientes	10	QM5	$\sigma_e^2 + t \sigma^2_{r/a}$	QM5/QM20
Tratamentos (T)	46	QM6	$\sigma_e^2 + ra V_T^{\dagger\dagger}$	QM6/QM20
Genitores	5	QM7	$\sigma_e^2 + ra V_{\text{Genitores}}$	QM7/QM20
F ₁ 's	6	QM8	$\sigma_e^2 + ra V_{F1}$	QM8/QM20
F ₂ 's	6	QM9	$\sigma_e^2 + ra V_{F2}$	QM9/QM20
RC ₁ 's	13	QM10	$\sigma_e^2 + ra V_{RC1}$	QM10/QM20
RC ₂ 's	12 ^a	QM11	$\sigma_e^2 + ra V_{RC2}$	QM11/QM20
Entre Gerações (EG)	4	QM12	$\sigma_e^2 + ra V_{EG}$	QM12/QM20
A x T	184	QM13	$\sigma_e^2 + rV_{A \times T}$	QM13/QM20
A x Genitores	20	QM14	$\sigma_e^2 + rV_{A \times \text{Genitores}}$	QM14/QM20
A x F ₁ 's	24	QM15	$\sigma_e^2 + rV_{A \times F1}$	QM15/QM20
A x F ₂ 's	24	QM16	$\sigma_e^2 + rV_{A \times F2}$	QM16/QM20
A x RC ₁ 's	52	QM17	$\sigma_e^2 + rV_{A \times RC1}$	QM17/QM20
A x RC ₂ 's	48	QM18	$\sigma_e^2 + rV_{A \times RC2}$	QM18/QM20
A x EG	16	QM19	$\sigma_e^2 + rV_{A \times EG}$	QM19/QM20
Erro Médio	460	QM20	σ_e^2	

[†] a, r, t referem-se ao número de ambientes, repetições e tratamentos respectivamente e $V_A = \sum a_i^2 / (a-1)$.

^{††} $V_T = \sum t_i^2 / (t-1)$; ^a RC₂-P₂ do cruzamento L3x22 não foi obtido.

Tabela 6 – Média geral de tratamentos e diferença mínima significativa (DMS-Tukey 1%) entre ambientes, médias e percentual de redução entre grupos de ambientes (alto e baixo P no solo) para diversos caracteres ¹

AMBIENTES	PG kg ha ⁻¹	ASI dias	TPG g kg ⁻¹	FTOT kg ha ⁻¹	EFABS kg kg ⁻¹ x 10 ²	EFUTIL kg kg ⁻¹	EFUSO kg kg ⁻¹	ICP kg kg ⁻¹ x 10 ²	QUTIL kg kg ⁻¹
AMB ALTO P									
AMB-2	4.391 B ²	0,70 C	2,22 C	13,41 B	16,52 B	284,24 B	47,20 C	60,46 D	537,62 B
AMB-5	5.654 A	1,60 B	2,94 A	18,71 A	22,62 B	261,18 B	59,78 C	74,86 A	395,75 D
AMB BAIXO P									
AMB-3	2.295 C	4,03 A	1,93 D	5,59 D	33,26 A	332,67 A	122,04 A	58,65 D	620,25 A
AMB-7	2.817 C	3,60 A	2,64 B	8,27 C	32,12 A	283,23 B	97,72 B	72,49 B	433,44 CD
AMB-8	2.859 C	4,37 A	2,61 B	8,71 C	35,09 A	277,91 B	103,05 AB	68,49 C	445,78 C
DMS*	651	0,88	0,16	1,73	4,52	34,00	20,07	4,91	46,09
MÉDIAS AMB ALTO P	5.023 a ³	1,15 b	2,58 a	16,06 a	19,57 b	272,71 b	53,49 b	67,66 a	466,69 b
MÉDIAS AMB BAIXO P	2.657 b	4,00 a	2,39 b	7,52 b	33,82 a	297,94 a	107,60 a	66,54 a	499,82 a
% REDUÇÃO	47,10%	-247,83%	7,36%	53,18%	-72,81%	-9,25%	-101,16%	-	-7,10%

¹ PG - produção de grãos; ASI - diferença de florescimento masculino e feminino; TPG - teor de P nos grãos; FTOT - quantidade de fósforo total na parte aérea; EFABS - eficiência de absorção de P; EFUTIL - eficiência de utilização de P; EFUSO - eficiência de uso de P; ICP - índice de colheita de P; QUTIL - quociente de utilização de P.

² Médias de ambientes seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 1% de probabilidade.

³ Médias de grupos de ambientes (alto e baixo P no solo) seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 1% de probabilidade.

Tabela 7- Valores e significâncias dos quadrados médios (QM)^a da análise de variância, média geral, média por geração e coeficiente de variação experimental (cv) para diversos caracteres^b avaliados no ambiente 2 (alto P 2004-2005)

Fonte de variação	GL	PG kg ha^{-1}	ASI dias	TPG gkg $^{-1}$	FTOT kg ha^{-1}	EFABS kgkg $^{-1}$ x10 2	EFUTIL kgkg $^{-1}$	EFUSO kgkg $^{-1}$	ICP kgkg $^{-1}$ x10 2	QUTIL kgkg $^{-1}$
Repetições	2	5.376,08	0,19	3,79	12,04	18,28	101,84	0,58	5,80	332,29
Tratamentos	46	99.922,87**	6,60**	3,54**	43,98**	66,78**	134,43**	12,04**	213,80**	212,84**
Genitores	5	15.282,00**	17,78**	7,11**	12,91	19,60	148,20**	1,78**	300,00**	286,95**
F1's	6	56.014,41**	1,96	1,97*	45,21**	68,65**	82,86**	7,61**	40,40	194,93
F2's	6	10.392,84*	3,87**	3,60**	10,90	16,55	53,78*	1,30*	40,70	167,63*
RC1's	13	29.779,39**	2,55	2,72**	23,57**	35,79**	78,81**	3,69**	117,20**	204,88**
RC2's	12	39.924,81**	9,49**	2,73**	21,93**	33,30**	80,47**	4,71**	126,80**	173,81**
Entre Ger	4	813.842,21**	8,18**	6,47**	263,11**	399,45**	658,21**	96,72**	1200,90**	357,81**
Erro	92	4.260,16	1,49	0,85	9,25	14,05	23,96	0,50	39,20	58,85
Média Geral		4.391	0,70	2,22	13,41	16,52	284,24	47,20	60,46	537,62
Média Genitores		2.315	1,61	2,43	9,85	12,13	205,49	24,60	48,39	496,34
Média F1's		7.346	0,10	1,97	18,14	22,35	365,31	79,54	69,29	600,47
Média F2's		4.537	0,48	2,29	14,38	17,72	283,71	48,59	63,05	518,20
Média RC1's		4.487	0,38	2,15	13,44	16,55	298,08	48,21	61,72	551,13
Média RC2's		3.574	1,05	2,29	11,95	14,73	262,29	38,37	58,51	518,74
cv (%)		14,86	174,38	13,13	22,68	22,69	17,22	14,98	10,35	14,27

^a QM PG , QM EFUTIL, QM EFUSO e QM QUTIL x 10 $^{-2}$; QM TPG x 10 1 .

^b PG - produção de grãos; ASI - diferença de florescimento masculino e feminino; TPG - teor de P nos grãos; FTOT - quantidade de fósforo total na parte aérea; EFABS - eficiência de absorção de P; EFUTIL - eficiência de utilização de P; EFUSO - eficiência de uso de P; ICP - índice de colheita de P; QUTIL - quociente de utilização de P.
* , ** Significativo a 5% e 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste de F.

Tabela 8 – Valores e significâncias dos quadrados médios (QM)^a da análise de variância, média geral, média por geração e coeficiente de variação experimental (cv) para diversos caracteres^b avaliados no ambiente 3 (baixo P 2004-2005)

Fonte de variação	GL	PG kg ha^{-1}	ASI dias	TPG gkg $^{-1}$	FTOT kg ha^{-1}	EFABS kgkg $^{-1}$ x10 2	EFUTIL kgkg $^{-1}$	EFUSO kgkg $^{-1}$	ICP kgkg $^{-1}$ x10 2	QUTIL kgkg $^{-1}$
Repetições	2	9.730,29	11,26	0,04	1,84	65,35	32,66	27,28	13,80	37,80
Tratamentos	46	62.236,96**	22,05**	6,89**	17,98**	637,19**	478,61**	177,33**	730,50**	500,65**
Genitores	5	30.895,10**	36,13**	6,01**	12,79**	453,38**	430,00**	91,00**	1482,00**	162,64
F1's	6	46.296,81**	14,71**	0,82	10,95**	388,16**	72,76**	127,23**	131,40*	223,10*
F2's	6	22.861,51**	14,49**	5,57**	12,70**	450,01**	191,78**	64,39**	129,30*	484,91**
RC1's	13	37.264,39**	22,33**	4,10**	13,07**	463,09**	276,83**	107,35**	320,00**	344,60**
RC2's	12	45.349,60**	24,02**	8,97**	14,05**	498,11**	386,24**	128,23**	280,30**	617,66**
Entre Ger.	4	316.210,61**	20,02**	21,88**	70,68**	2504,29**	2511,33**	904,52**	4276,50**	1519,25**
Erro	92	2.691,16	4,18	0,84	1,85	65,59	24,24	7,76	57,40	88,23
Média Geral		2.295	4,03	1,93	5,59	33,26	332,67	122,04	58,65	620,25
Média Genitores		1.147	5,00	2,49	4,19	24,96	160,91	61,14	34,78	475,75
Média F1's		3.876	2,62	1,58	7,55	44,94	444,43	207,18	69,67	719,59
Média F2's		2.425	3,29	1,86	6,08	36,18	360,09	128,43	63,51	642,58
Média RC1's		2.268	4,31	1,85	5,56	33,07	349,27	120,57	61,60	633,54
Média RC2's		1.934	4,44	2,00	4,95	29,45	319,13	102,44	57,94	607,10
cv (%)		22,60	50,73	15,02	24,33	24,35	14,80	22,82	12,92	15,14

^a QM PG , QM EFUTIL, QM EFUSO e QM QUTIL x 10 $^{-2}$; QM TPG x 10.

^b PG - produção de grãos; ASI - diferença de florescimento masculino e feminino; TPG - teor de P nos grãos; FTOT - quantidade de fósforo total na parte aérea; EFABS - eficiência de absorção de P; EFUTIL - eficiência de utilização de P; EFUSO - eficiência de uso de P; ICP - índice de colheita de P; QUTIL - quociente de utilização de P.

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

Tabela 9 – Valores e significâncias dos quadrados médios (QM)^a da análise de variância, média geral, média por geração e coeficiente de variação experimental (cv) para diversos caracteres^b avaliados no ambiente 5 (alto P 2005-2006)

Fonte de variação	GL	PG kg ha^{-1}	ASI dias	TPG gkg $^{-1}$	FTOT kg ha^{-1}	EFABS kgkg $^{-1}$ x10 2	EFUTIL kgkg $^{-1}$	EFUSO kgkg $^{-1}$	ICP kgkg $^{-1}$ x10 2	QUTIL kgkg $^{-1}$
Repetições	2	28.385,63	0,34	0,10	25,94	37,38	3,29	3,20	9,20	3,45
Tratamentos	46	165.695,95**	9,85**	5,32**	102,03**	147,05**	88,98**	18,76**	230,30**	87,52**
Genitores	5	28.538,31**	19,02**	9,54**	23,15**	33,37*	128,70**	3,17**	592,30**	103,75**
F1's	6	194.161,70**	2,26**	4,32**	198,27**	285,74**	74,55**	22,13**	28,20	107,93**
F2's	6	29.025,10**	4,33**	1,63**	11,26	16,24	16,12*	3,19**	51,90*	27,95**
RC1's	13	40.620,59**	7,56**	4,33**	45,92**	66,18**	47,56**	4,45**	30,90	85,57**
RC2's	12	79.246,62**	16,14**	5,48**	34,50**	49,72**	54,39**	9,06**	106,50**	76,71**
Entre Ger.	4	1165.293,52**	6,63**	9,84**	577,39**	832,12**	408,63**	132,16**	1367,80**	164,76**
Erro	92	4.747,41	0,58	0,50	7,45	10,74	6,95	0,53	22,50	9,29
Média Geral		5.654	1,60	2,94	18,71	22,62	261,18	59,78	74,86	395,75
Média Genitores		2.278	2,22	3,23	10,82	12,99	191,53	23,89	59,72	362,62
Média F1's		9.179	0,95	2,65	26,27	31,53	317,79	97,40	82,34	435,70
Média F2's		6.072	1,00	3,00	20,73	24,89	260,02	64,15	76,58	382,82
Média RC1's		6.128	1,69	2,85	19,66	23,60	277,14	64,75	77,60	406,32
Média RC2's		4.813	1,87	3,02	16,64	19,98	251,16	50,86	73,95	385,11
cv (%)		12,18	47,60	7,60	14,59	14,49	10,09	12,18	6,34	7,70

^a QM PG, QM EFUTIL, QM EFUSO e QM QUTIL x 10 $^{-2}$; QM TPG x 10.

^b PG - produção de grãos; ASI - diferença de florescimento masculino e feminino; TPG - teor de P nos grãos; FTOT - quantidade de fósforo total na parte aérea; EFABS - eficiência de absorção de P; EFUTIL - eficiência de utilização de P; EFUSO - eficiência de uso de P; ICP - índice de colheita de P; QUTIL - quociente de utilização de P.

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

Tabela 10 – Valores e significâncias dos quadrados médios (QM)^a da análise de variância, média geral, média por geração e coeficiente de variação experimental (cv) para diversos caracteres^b avaliados no ambiente 7 (baixo P 2005-2006)

Fonte de variação	GL	PG kg ha^{-1}	ASI dias	TPG gkg $^{-1}$	FTOT kg ha^{-1}	EFABS kgkg $^{-1} \times 10^2$	EFUTIL kgkg $^{-1}$	EFUSO kgkg $^{-1}$	ICP kgkg $^{-1} \times 10^2$	QUTIL kgkg $^{-1}$
Repetições	2	2.413,91	1,04	0,35	4,66	70,25	2,00	2,90	54,70	9,66
Tratamentos	46	81.132,48**	13,05**	3,62**	44,23**	666,55**	145,61**	98,75**	504,90**	79,87**
Genitores	5	16.895,28**	21,82**	6,83**	16,18**	243,95**	106,80**	19,91**	548,60**	81,94**
F1's	6	38.438,53**	4,20**	0,90	13,07**	197,05**	55,38**	48,01**	114,20*	38,98
F2's	6	20.190,40**	3,55*	0,39	22,12**	333,43**	12,22	24,33**	49,50	17,88
RC1's	13	58.954,65**	8,55**	2,32**	31,98**	482,05**	63,27**	72,07**	186,10**	73,11**
RC2's	12	56.663,09**	22,69**	2,96**	38,96**	587,20**	63,68**	68,12**	153,30**	63,73**
Entre Gerações	4	462.369,14**	15,33**	14,80**	214,76**	3236,40**	1042,89**	563,63**	3810,50**	301,94**
Erro	92	4.900,46	1,12	0,77	3,59	54,22	14,57	5,89	48,70	19,28
Média Geral		2.817	3,60	2,64	8,27	32,12	283,23	97,72	72,49	433,44
Média Genitores		1.559	5,11	3,10	6,13	23,78	162,15	53,71	46,31	372,93
Média F1's		4.463	2,81	2,35	10,99	42,68	354,19	155,57	82,61	481,57
Média F2's		2.780	3,33	2,63	8,51	33,03	293,42	96,27	75,84	433,51
Média RC1's		2.959	3,29	2,57	8,54	33,16	299,50	102,63	76,40	442,78
Média RC2's		2.381	3,79	2,69	7,39	28,68	277,90	82,36	73,09	425,34
cv (%)		24,85	29,40	10,51	22,91	22,92	13,48	24,84	9,62	10,13

^a QM PG , QM EFUTIL, QM EFUSO e QM QUTIL x 10⁻²; QM TPG x 10.

^b PG - produção de grãos; ASI - diferença de florescimento masculino e feminino; TPG - teor de P nos grãos; FTOT - quantidade de fósforo total na parte aérea; EFABS - eficiência de absorção de P; EFUTIL - eficiência de utilização de P; EFUSO - eficiência de uso de P; ICP - índice de colheita de P; QUTIL - quociente de utilização de P .

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

Tabela 11 – Valores e significâncias dos quadrados médios (QM)^a da análise de variância, média geral, média por geração e coeficiente de variação experimental (cv) para diversos caracteres^b avaliados no ambiente 8 (baixo P 2005-2006)

Fonte de variação	GL	PG kg ha^{-1}	ASI dias	TPG gkg $^{-1}$	FTOT kg ha^{-1}	EFABS kgkg $^{-1}$ x10 2	EFUTIL kgkg $^{-1}$	EFUSO kgkg $^{-1}$	ICP kgkg $^{-1}$ x10 2	QUTIL kgkg $^{-1}$
Repetições	2	33.368,11	1,73	0,21	11,75	190,79	76,40	41,37	36,67	14,07
Tratamentos	46	99.627,50**	14,84**	7,51**	54,38**	882,78**	218,82**	130,99**	550,40**	173,77**
Genitores	5	25.707,35**	33,70**	8,52**	27,51**	446,65**	139,12**	32,98**	1015,10**	62,31*
F1's	6	143.035,38**	9,96**	2,03**	78,68**	1277,27**	50,66**	188,80**	46,70	113,73**
F2's	6	41.237,65**	7,53**	4,47**	39,97**	648,86**	78,46**	53,84**	106,40*	119,07**
RC1's	13	61.553,61**	14,45**	2,54**	48,43**	786,31**	87,55**	81,55**	159,50**	98,81**
RC2's	12	22.105,66**	15,80**	4,10**	23,15**	375,84**	100,55**	28,82**	189,50**	100,28**
Entre Ger.	4	570.806,24**	7,91**	45,47**	186,13**	3021,47**	1562,69**	749,74**	3744,40**	949,27**
Erro	92	4.400,14	1,78	0,65	5,37	87,17	11,47	5,84**	37,40	21,93
Média Geral		2.859	4,37	2,61	8,71	35,09	277,91	103,05	68,49	445,78
Média Genitores		1.287	5,17	3,47	6,36	25,63	135,38	46,14	46,06	333,51
Média F1's		5.025	3,76	2,17	11,81	47,57	377,71	181,83	79,90	525,07
Média F2's		3.189	4,14	2,60	10,12	40,78	287,96	115,09	73,11	441,24
Média RC1's		2.981	4,05	2,46	8,66	34,89	302,81	107,12	72,40	465,65
Média RC2's		2.111	4,79	2,63	7,41	29,89	257,73	76,03	66,00	435,96
cv (%)		23,20	30,53	9,77	26,60	26,60	12,19	23,45	8,93	10,50

^a QM PG, QM EFUTIL, QM EFUSO e QM QUTIL x 10 $^{-2}$; QM TPG x 10.

^b PG - produção de grãos; ASI - diferença de florescimento masculino e feminino; TPG - teor de P nos grãos; FTOT - quantidade de fósforo total na parte aérea; EFABS - eficiência de absorção de P; EFUTIL - eficiência de utilização de P; EFUSO - eficiência de uso de P; ICP - índice de colheita de P; QUTIL - quociente de utilização de P.

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

Tabela 12 – Valores e significâncias dos quadrados médios (QM)^a da análise de variância conjunta, média geral, média por geração e coeficiente de variação experimental (cv) para diversos caracteres^b avaliados em cinco ambientes (dois sob alto P e três sob baixo P no solo)

Fonte de variação	GL	PG kg ha^{-1}	ASI dias	TPG gkg $^{-1}$	FTOT kg ha^{-1}	EFABS kgkg $^{-1}$ x10 2	EFUTIL kgkg $^{-1}$	EFUSO kgkg $^{-1}$	ICP kgkg $^{-1}$ x10 2	QUTIL kgkg $^{-1}$
Ambientes	4	937.129,06**	369,00**	219,32**	1283,27**	3004,44**	327,13**	456,42**	2428,10**	3902,23**
Nível Alto P	1	414.601,62**	57,20**	365,33**	693,48**	871,99**	110,68	41,37	4877,30**	4729,81**
Nível Baixo P	2	46.464,50	21,17*	228,35**	134,55**	106,27	429,24**	76,82*	2382,20**	5129,91**
Entre Níveis P	1	3240.985,63**	1376,49**	55,27**	4170,48**	10933,20**	339,36*	1630,69**	70,70	619,30*
Rep(Amb)	10	15.854,80	2,91	0,90	11,25	76,41	43,23	15,07	90,00	79,45
Tratamentos	46	102.225,54**	46,52**	20,79**	31,65**	223,29**	260,73**	66,42**	538,70**	233,32**
Genitores	5	19.998,52**	115,48**	34,34**	7,83	83,80	227,71**	15,90**	990,90**	168,34**
F1's	6	28.914,00**	16,86**	6,44**	2,23	60,24	74,67**	26,12**	18,40	129,25**
F2's	6	15.008,57**	22,88**	9,31**	6,95	68,90	66,49**	11,22*	19,80	153,76**
RC1's	13	36.987,01**	27,70**	10,51**	11,82*	120,93**	101,26**	32,09**	97,90**	167,30**
RC2's	12	43.262,57**	64,11**	17,93**	11,48*	96,61*	146,32**	31,94**	163,00**	195,77**
Entre Ger (EG)	4	834.716,19**	48,64**	84,62**	267,55**	1586,54**	1733,94**	487,87**	4091,30**	917,14**
Trat x Amb	184	7.081,77**	4,97**	1,52**	7,59**	54,73*	19,24*	7,66**	36,40	29,64
Gen. x Amb	20	2.169,53	3,25*	0,91	3,08	20,70	14,84	2,68	60,20	12,38
F1's x Amb	24	13.770,51**	4,07**	0,90	14,71**	95,74**	9,68	15,65**	25,90	23,01
F2's x Amb	24	2.402,52	2,73	1,59**	4,36	49,72	10,88	3,45	17,50	30,45
RC1's x Amb	52	5.329,74	6,94**	1,37**	7,09	71,51*	17,64	7,76**	36,10	25,13
RC2's x Amb	48	2.982,19	6,01**	1,57**	3,51	40,15	16,98	4,92	30,00	37,31
EG x Amb	16	28.200,66**	2,37	3,46**	21,21**	32,50	40,67**	16,11**	71,20	51,56
Erro	460	4.199,87	1,84	0,72	5,51	46,36	16,24	4,10	41,00	39,52
Média Geral		3.603	2,86	2,47	10,94	27,93	287,85	85,96	66,99	486,57
Média Genitores		1.717	3,82	2,94	7,47	19,90	171,09	41,90	47,05	407,71
Média F1's		5.978	2,05	2,14	14,95	37,81	371,89	144,30	76,76	553,26
Média F2's		3.801	2,45	2,47	11,96	30,55	297,04	90,51	70,42	483,57
Média RC1's		3.765	2,74	2,38	11,17	28,25	305,36	88,66	69,95	500,47
Média RC2's		2.963	3,19	2,52	9,67	24,54	273,64	70,01	65,89	473,70
cv (%)		17,99	47,43	10,86	21,46	24,38	14,00	23,55	9,56	12,92

^a QM PG, QM EFUTIL, QM EFUSO e QM QUTIL x 10 $^{-2}$; QM TPG x 10; ^b PG - produção de grãos; ASI - diferença de florescimento masculino e feminino; TPG - teor de P nos grãos; FTOT - quantidade de fósforo total na parte aérea; EFABS - eficiência de absorção de P; EFUTIL - eficiência de utilização de P; EFUSO - eficiência de uso de P; ICP - índice de colheita de P; QUTIL - quociente de utilização de P; *, ** Significativo a 5% e 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste de F.

Tabela 13 – Valores e significâncias dos quadrados médios (QM)^a da análise de variância conjunta, média geral, média por geração e coeficiente de variação experimental (cv) para diversos caracteres^b avaliados em três ambientes sob baixo P no solo

Fonte de variação	GL	PG kg ^{ha} ⁻¹	ASI dias	TPG gkg ⁻¹	FTOT kg ^{ha} ⁻¹	EFABS kgkg ⁻¹ x10 ²	EFUTIL kgkg ⁻¹	EFUSO kgkg ⁻¹	ICP kgkg ⁻¹ x10 ²	QUTIL kgkg ⁻¹
Ambientes	2	46.464,50	21,17	228,35**	134,55**	106,28	429,24**	76,82	2382,20**	5129,91**
Rep(Amb)	6	15.170,77	4,68	0,20	6,09	108,80	37,01	23,85	145,10	20,51
Tratamentos	46	41.824,82**	36,82**	15,19**	12,59**	242,45**	218,02**	70,20**	467,10**	178,72**
Genitores	5	11.563,51*	83,71**	20,32**	6,27	161,30*	179,67**	19,72**	855,00**	88,98*
F1's	6	23.092,09**	16,55**	2,71**	10,17**	197,17**	42,78*	39,04**	24,80	85,95*
F2's	6	8.175,79	19,73**	7,43**	5,53	102,64	60,28**	13,49	24,30	135,42**
RC1's	13	25.807,71**	24,23**	6,31**	10,01**	177,33**	86,79**	41,53**	107,80**	109,96*
RC2's	12	19.789,88**	49,73**	12,17**	5,61	114,44	121,41**	35,71**	131,90**	147,93**
EntreGer(EG)	4	276.384,44**	36,48**	77,10**	64,04**	1267,09**	1481,72**	461,78**	3483,20**	810,88**
Trat x Amb	92	5.021,75*	6,57**	1,42**	3,85	69,40	18,21	8,88*	35,20	35,29
Gen x Amb	10	1.333,15	3,97	0,52	0,84	13,70	9,21	2,64	41,30	7,03
F1's x Amb	12	12.667,27**	6,17**	0,52	5,19	93,46	8,44	22,65**	36,00	20,58
F2's x Amb	12	3.220,39	2,93	1,51*	3,98	74,53	14,09	5,20	19,80	36,60
RC1's x Amb	26	5.917,85	10,56**	1,32*	5,49	100,73	21,70	9,62	42,20	31,39
RC2's x Amb	24	2.745,77	6,40**	1,93**	3,18	61,37	23,90	6,22	38,70	52,35
EGr x Amb	8	4.781,88	3,40	2,52**	2,13	17,53	21,84	7,09	16,30	52,15
Erro	276	3.997,25	2,36	0,75	3,61	69,00	16,76	6,50	47,80	43,15
Média Geral		2.657	4,00	2,39	7,52	33,82	297,94	107,60	66,54	499,82
Média Genitores		1.331	5,09	3,02	5,56	24,79	152,81	53,66	42,38	395,98
Média F1's		4.455	3,06	2,03	10,12	45,05	392,11	181,53	77,38	574,55
Média F2's		2.798	3,59	2,36	8,24	36,71	313,82	113,26	70,83	505,03
Média RC1's		2.736	3,88	2,29	7,59	33,71	317,19	110,11	70,13	513,90
Média RC2's		2.142	4,34	2,44	6,58	29,33	284,92	86,94	65,67	489,55
cv (%)		23,79	38,40	11,46	25,26	24,56	13,74	23,69	10,39	13,14

^a QM PG, QM EFUTIL, QM EFUSO e QM QUTIL x 10⁻²; QM TPG x 10; ^b PG - produção de grãos; ASI - diferença de florescimento masculino e feminino; TPG - teor de P nos grãos; FTOT - quantidade de fósforo total na parte aérea; EFABS - eficiência de absorção de P; EFUTIL - eficiência de utilização de P; EFUSO - eficiência de uso de P; ICP - índice de colheita de P; QUTIL - quociente de utilização de P.

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

Tabela 14 – Valores e significâncias dos quadrados médios (QM)^a da análise de variância conjunta, média geral, média por geração e coeficiente de variação experimental (cv) para diversos caracteres^b avaliados em dois ambientes sob alto P no solo

Fonte de variação	GL	PG kg ha^{-1}	ASI dias	TPG gkg $^{-1}$	FTOT kg ha^{-1}	EFABS kgkg $^{-1}$ x10 ²	EFUTIL kgkg $^{-1}$	EFUSO kgkg $^{-1}$	ICP kgkg $^{-1}$ x10 ²	QUTIL kgkg $^{-1}$
Ambientes	1	414.601,62**	57,20**	365,33**	693,48**	872,00**	110,68	41,37**	4877,30**	4729,81**
Rep(Amb)	4	16.880,85	0,27	1,95	18,99	27,83	52,56	1,89	7,50	167,87
Tratamentos	46	73.996,72**	14,28**	7,65**	32,32**	47,40**	64,24**	8,57**	124,70**	83,24**
Genitores	5	12.843,26*	35,45**	15,35**	6,48	9,48	70,40**	1,47*	245,10**	92,46*
F1's	6	25.357,43**	3,97**	5,78**	24,73**	36,14**	43,58*	2,99**	8,30	83,29*
F2's	6	9.024,98	7,55**	4,03**	6,55	9,67	14,82	1,05	8,20	47,29
RC1's	13	17.486,92**	8,24**	5,31**	9,15	13,28	27,22*	2,03**	22,80	69,01*
RC2's	12	27.781,91**	20,84**	6,90**	8,96	13,29	37,22**	3,21**	61,00*	75,37*
Entre Ger(EG)	4	643.156,41**	13,35**	16,08**	260,08**	381,49**	363,08**	74,48**	845,40**	195,39**
Trat x Amb	46	5.687,56*	2,18**	1,21**	11,38*	18,57*	11,04	0,84*	22,30	19,33
Gen x Amb	5	1.603,57	1,36	1,30	5,71	8,40	18,57	0,16	49,20	22,38
F1's x Amb	6	10.211,96*	0,27	0,51	15,78	22,99	10,15	1,40*	16,70	10,89
F2's x Amb	6	977,08	0,66	1,19	4,35	6,40	6,75	0,08	18,00	19,68
RC1's x Amb	13	3.175,61	1,88*	1,74**	10,06	14,88	14,39	0,34	27,30	26,06
RC2's x Amb	12	2.127,99	4,79**	1,30*	4,58	6,76	7,82	0,25	12,70	17,01
EG x Amb	4	18.414,21**	1,48	0,23	24,03*	32,87*	8,14	1,89**	15,20	12,81
Erro	184	4.503,78	1,04	0,67	8,36	12,40	15,45	0,52	30,90	34,07
Média Geral		5.023	1,15	2,58	16,06	19,57	272,71	53,49	67,66	466,69
Média Genitores		2.297	1,92	2,84	10,34	12,56	198,51	24,25	54,06	425,29
Média F1's		8.263	0,53	2,31	22,21	26,93	341,55	88,47	75,81	521,33
Média F2's		5.305	0,74	2,64	17,56	21,32	271,87	56,37	69,80	451,37
Média RC1's		5.308	1,04	2,50	16,55	20,07	287,61	56,48	69,67	480,32
Média RC2's		4.194	1,46	2,65	14,30	17,36	256,73	44,62	66,23	449,93
cv (%)		13,36	88,68	10,03	18,00	17,99	14,41	13,48	8,21	12,51

^a QM PG, QM EFUTIL, QM EFUSO e QM QUTIL x 10²; QM TPG x 10; ^b PG - produção de grãos; ASI - diferença de florescimento masculino e feminino; TPG - teor de P nos grãos; FTOT - quantidade de fósforo total na parte aérea; EFABS - eficiência de absorção de P; EFUTIL - eficiência de utilização de P; EFUSO - eficiência de uso de P; ICP - índice de colheita de P; QUTIL - quociente de utilização de P (QUTIL).

*, ** Significativo a 5% e 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste de F

Tabela 15 – Valores e significâncias dos quadrados médios (QM)^a da análise de variância, média geral, média por geração e coeficiente de variação experimental (cv) para diversos caracteres^b de resposta ao P

Fonte de variação	GL	DIFPG kg ha ⁻¹	RELPG kg kg ⁻¹ x 10 ²	EFREC kg kg ⁻¹ x 10 ²	EFIS kg kg ⁻¹	EFAGR kg kg ⁻¹
Repetições	2	130.266,13	14,89	546,63	105,48	62,03**
Tratamentos	46	34.449,27**	456,65**	115,58**	106,67**	9,38**
Genitores	5	5.537,73	1418,50**	18,59	203,01**	1,55
F1's	6	56.703,76**	435,44 ⁺	294,86**	104,97 ⁺	16,13**
F2's	6	7.286,33	111,97	47,68	20,74	2,03
RC1's	13	14.453,05*	416,69*	75,93**	102,80*	4,14*
RC2's	12	12.348,41	249,86	19,04	74,50	3,51
Entre Gerações	4	209.253,07**	553,43 ⁺	490,27**	229,64**	54,03**
Erro	92	8.107,75	226,94	30,77	53,99	2,21
Média Geral		2.698	51,32	16,07	284,95	45,62
Média Genitores		1.181	60,83	8,76	237,25	20,82
Média F1's		4.113	53,33	22,57	321,34	68,97
Média F2's		2.762	50,57	17,41	272,75	46,43
Média RC1's		2.915	49,10	16,79	305,39	48,97
Média RC2's		2.258	48,64	14,26	269,99	37,98
cv (%)		33,37	29,35	34,52	25,79	32,59

^a QM DIFPG, QM EFIS e QM EFAGR x 10⁻²; ^b DIFPG - diferença de peso de grãos entre ambientes com alto e baixo P; RELPG - produção relativa de grãos entre ambientes com baixo e alto P; EFREC - eficiência de recuperação aparente de fósforo; EFIS - eficiência fisiológica; EFAGR - eficiência agrônômica de P.

⁺, *, ** Significativo a 10%, 5% e 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste de F.

Tabela 16 – Médias das seis linhagens genitoras, diferença mínima significativa entre médias (DMS-Duncan, 5%) e nível de significância do teste de F para diversos caracteres ^a na média dos três ambientes sob baixo P e dos dois ambientes sob alto P no solo

DADOS DE 3 AMBIENTES SOB BAIXO NÍVEL DE P NO SOLO									
Linhagens	PG kg ha^{-1}	ASI dias	TPG gkg $^{-1}$	FTOT kg ha^{-1}	EFABS kgkg $^{-1}$ x10 2	EFUTIL kgkg $^{-1}$	EFUSO kgkg $^{-1}$	ICP kgkg $^{-1}$ x10 2	QUTIL kgkg $^{-1}$
L3	2.140	-0,11	2,61	7,27	32,80	267,40	89,05	67,66	445,00
L 228-3	2.115	2,89	2,57	7,26	31,93	221,60	84,23	55,60	454,37
L 36	1.000	6,33	2,84	4,99	21,73	118,57	38,56	31,80	414,97
L 22	1.013	6,67	3,23	5,31	23,83	68,23	38,90	21,97	359,64
L 53	884	7,33	3,01	3,60	16,50	149,50	36,76	43,83	392,76
L Cateto	834	7,44	3,84	4,93	21,93	91,61	34,48	33,43	310,17
Médias	1.331	5,09	3,02	5,56	24,79	152,82	53,66	42,38	395,98
DMS (5%)	622	1,52	0,27	-	8,17	40,26	25,07	6,80	64,6
F	*	**	**	NS	*	**	**	**	*

DADOS DE 2 AMBIENTES SOB ALTO NÍVEL DE P NO SOLO									
Linhagens	PG kg ha^{-1}	ASI dias	TPG gkg $^{-1}$	FTOT kg ha^{-1}	EFABS kgkg $^{-1}$ x10 2	EFUTIL kgkg $^{-1}$	EFUSO kgkg $^{-1}$	ICP kgkg $^{-1}$ x10 2	QUTIL kgkg $^{-1}$
L3	3.140	-2,00	2,67	12,00	14,55	236,73	33,36	62,05	441,90
L 228-3	2.795	0,00	2,40	9,16	11,15	272,21	29,37	64,10	503,54
L 36	3.004	3,33	2,35	12,35	15,05	216,45	31,82	52,65	482,76
L 22	1.218	3,50	2,93	8,52	10,35	130,76	12,63	36,40	418,13
L 53	2.057	2,33	2,93	8,49	10,35	211,47	21,84	62,75	390,35
L Cateto	1.569	4,33	3,73	11,47	13,90	123,48	16,45	46,40	315,10
Médias	2.297	1,92	2,84	10,33	12,56	198,52	24,24	54,06	425,29
DMS (5%)	808	1,23	0,31	-	-	47,35	8,70	6,69	70,30
F	*	**	**	NS	NS	**	*	**	*

^a PG - produção de grãos; ASI - diferença de florescimento masculino e feminino; TPG - teor de P nos grãos; FTOT - quantidade de fósforo total na parte aérea; EFABS - eficiência de absorção de P; EFUTIL - eficiência de utilização de P; EFUSO - eficiência de uso de P; ICP - índice de colheita de P; QUTIL - quociente de utilização de P. NS, *, ** não significativo, significativo a 5% e significativo a 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste de F.

Tabela 17 – Médias das seis linhagens genitoras, diferença mínima significativa entre médias (DMS-Duncan, 5%) e nível de significância do teste de F para diversos caracteres^a de resposta ao P

Linhasgens	DIFPG kg ha^{-1}	RELPG kgkg $^{-1} \times 10^2$	EFREC kgkg $^{-1} \times 10^2$	EFIS kgkg $^{-1}$	EFAGR kgkg $^{-1}$
L3	1.083	66,67	9,20	195,10	18,25
L 228-3	1.043	86,33	5,40	287,25	39,69
L 36	1.995	33,33	10,77	346,87	32,99
L 22	1.261	83,67	6,30	260,04	23,48
L 53	1.216	42,67	8,30	246,19	20,41
L Cateto	774	52,33	11,97	107,09	12,99
Médias	1.229	60,83	8,65	240,42	24,63
DMS (5%)	-	25,70	-	125,10	25,30
F	NS	**	NS	**	NS

^a DIFPG - diferença de peso de grãos entre ambientes com alto e baixo P; RELPG - produção relativa de grãos entre ambientes com baixo e alto P; EFREC - eficiência de recuperação aparente de fósforo; EFIS - eficiência fisiológica; EFAGR - eficiência agrônômica de P; NS, * não significativo e significativo a 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste de F.

Tabela 18 - Médias dos sete híbridos F₁'s, diferença mínima significativa entre médias (DMS-Duncan, 5%) e nível de significância do teste de F para diversos caracteres^a de resposta ao P

Híbridos F1	DIFPG kg ha^{-1}	RELPG kgkg $^{-1} \times 10^2$	EFREC kgkg $^{-1} \times 10^2$	EFIS kgkg $^{-1}$	EFAGR kgkg $^{-1}$
L3 x L22	4.679	56,00	23,40	321,94	79,73
L3 x Cateto	2.496	67,00	12,30	322,83	40,69
L3 x 36	3.607	59,00	15,00	416,19	59,62
228-3 x 22	2.496	66,33	11,27	353,27	42,44
L3 x L53	6.284	35,00	35,50	301,76	104,81
L36 x Cateto	5.012	45,67	27,73	314,73	84,14
Cateto x 53	4.219	44,33	32,80	218,63	71,34
Médias	4.113	53,33	22,57	321,34	68,97
DMS (5%)	1.534	25,70	9,40	125,10	25,30
F	**	+	**	+	**

^a DIFPG - diferença de peso de grãos entre ambientes com alto e baixo P; RELPG - produção relativa de grãos entre ambientes com baixo e alto P; EFREC - eficiência de recuperação aparente de fósforo; EFIS - eficiência fisiológica; EFAGR - eficiência agrônômica; +, ** Significativo a 10% e 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste de F.

Tabela 19 – Médias dos sete híbridos F₁'s, diferença mínima significativa entre médias (DMS-Duncan, 5%) e nível de significância do teste de F para diversos caracteres^a na média dos três ambientes sob baixo P e dos dois ambientes sob alto P no solo

DADOS DE 3 AMBIENTES SOB BAIXO NÍVEL DE P NO SOLO									
Cruzamentos	PG kg ha^{-1}	ASI dias	TPG gkg $^{-1}$	FTOT kg ha^{-1}	EFABS kgkg $^{-1}$ x10 2	EFUTIL kgkg $^{-1}$	EFUSO kgkg $^{-1}$	ICP kgkg $^{-1}$ x10 2	QUTIL kgkg $^{-1}$
L3 x L22	5.402	1,33	1,86	10,01	45,90	456,41	223,68	82,13	630,79
L3 x Cateto	5.197	2,11	1,92	11,15	48,50	403,86	205,09	75,97	599,07
L3 x 36	5.168	1,78	2,08	11,90	52,43	404,19	212,47	79,87	560,54
228-3 x 22	4.584	3,78	2,10	12,37	55,27	357,58	190,25	75,10	542,43
L3 x L53	3.487	4,89	1,84	7,56	32,73	407,66	137,32	73,83	647,07
L36 x Cateto	4.168	3,22	2,10	9,81	43,87	370,12	168,54	76,67	545,48
Cateto x 53	3.180	4,33	2,33	8,02	36,70	344,97	133,34	78,13	496,47
Médias	4455	3,06	2,03	10,12	45,05	392,11	181,53	77,38	574,55
DMS (5%)	622	1,52	0,27	1,87	8,17	40,26	25,07	-	64,60
F	**	**	**	**	**	*	**	NS	*

DADOS DE 2 AMBIENTES SOB ALTO NÍVEL DE P NO SOLO									
Cruzamentos	PG kg ha^{-1}	ASI dias	TPG gkg $^{-1}$	FTOT kg ha^{-1}	EFABS kgkg $^{-1}$ x10 2	EFUTIL kgkg $^{-1}$	EFUSO kgkg $^{-1}$	ICP kgkg $^{-1}$ x10 2	QUTIL kgkg $^{-1}$
L3 x L22	9.439	-0,50	2,02	21,88	26,25	387,12	100,17	77,15	583,77
L3 x Cateto	7.617	0,33	2,15	17,75	21,55	386,51	81,75	79,35	564,48
L3 x 36	8.859	-0,17	2,05	21,51	26,15	368,85	95,83	75,20	557,76
228-3 x 22	6.747	1,83	2,18	17,94	21,75	346,92	70,94	74,65	555,10
L3 x L53	9.396	0,33	2,45	26,96	32,70	325,55	101,64	75,75	491,09
L36 x Cateto	8.784	0,50	2,43	24,22	29,35	321,15	93,10	75,87	499,84
Cateto x 53	6.999	1,33	2,90	25,18	30,50	254,76	75,85	72,85	397,30
Médias	8.263	0,52	2,31	22,44	26,93	307,6	79,96	75,81	484,08
DMS (5%)	808	1,23	0,31	3,48	4,24	47,35	8,70	-	70,30
F	**	**	**	**	**	*	**	NS	*

^aPG - produção de grãos ; ASI - diferença de florescimento masculino e feminino; TPG - teor de P nos grãos; FTOT - quantidade de fósforo total na parte aérea; EFABS - eficiência de absorção de P; EFUTIL - eficiência de utilização de P; EFUSO - eficiência de uso de P; ICP - índice de colheita de P; QUTIL - quociente de utilização de P. NS, *, ** não significativo, significativo a 5% e significativo a 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste de F.

Tabela 20 – Médias de cada geração^a, estimativas de efeitos gênicos^b, coeficientes de determinação do modelo (R²) e valores de qui-quadrado (χ^2), para peso de grãos-PG (kg ha⁻¹) para 7 cruzamentos F₁ (obtidos de 6 linhagens de milho com diferentes níveis de eficiência ao P) e suas gerações segregantes avaliadas em ambientes com diferentes níveis de P no solo nas safras 2004-2006

DADOS DE 3 AMBIENTES SOB BAIXO NÍVEL DE P NO SOLO																			
Cruzamento	Tipo ^c	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ^2		
L3 x L22	Ef	2.140	1.013	5.402	2.995	3.088	2.171	-	-	1.530	**	582	*	2.983	**	-	-	0,92	11,00*
L3 x Cateto	Ef	2.140	834	5.197	2.975	4.844	2.091	3.583	1.263	1.490	**	644	**	3.585	**	-	3.886**	0,99	4,27
L3 x L36	Ef	2.140	1.000	5.168	3.787	3.943	3.260	2.898	1.500	1.513	**	649	**	3.907	**	-	-	0,96	10,66
228-3 x L 22	Ef.	2.115	1.013	4.584	2.644	2.845	1.902	2.081	2.203	1.525	**	572	**	2.317	**	-	-	0,91	8,19
L3 x L53	Inef.	2.140	884	3.487	2.618	3.740	1.756	2.865	1.382	1.534	**	609	**	2.215	**	-	2.075**	0,98	2,63
L36 x Cateto	Inef.	1.000	834	4.168	2.317	2.481	2.118	1.892	1.621	924	**	115		2.988	**	-	-	0,98	2,43
Cateto x L53	Inef.	834	884	3.180	2.251	2.164	1.900	1.471	1.581	876	**	-23		2.475	**	-	-	0,98	1,76

DADOS DE 2 AMBIENTES SOB ALTO NÍVEL DE P NO SOLO																				
Cruzamentos	Tipo	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ^2			
L3 x L22	Ef	3.140	1.218	9.439	5.528	6.273	5.511	-	-	2.162	**	939	**	7.061	**	-	-	0,99	3,79	
L3 x Cateto	Ef	3.140	1.569	7.617	4.989	6.065	4.049	5.689	2.778	2.358	**	786	**	5.303	**	-	2.461**	1,00	0,12	
L3 x L36	Ef	3.140	3.004	8.859	6.318	6.364	6.315	5.424	4.280	3.115	**	66		6.292	**	-	-	0,99	2,34	
228-3 x L 22	Ef.	2.795	1.218	6.747	5.092	5.568	4.976	4.578	3.768	2.077	**	705	**	8.390	**	-	-	-4.019*	0,98	7,81
L3 x L53	Inef.	3.140	2.057	9.396	5.964	6.381	5.566	4.935	4.163	2.672	**	556	**	6.708	**	-	-	0,99	3,71	
L36 x Cateto	Inef.	3.004	1.569	8.784	4.860	4.691	3.879	3.838	2.724	2.294	**	732	**	2.974	*	-	-	3.485*	0,99	7,87
Cateto x L53	Inef.	1.569	2.057	6.999	4.380	3.892	4.778	2.884	3.077	1.776	**	-265	*	5.145	**	-	-	0,98	4,85	

DADOS DOS 5 AMBIENTES AVALIADOS																				
Cruzamentos	Tipo	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ^2			
L3 x L22	Ef	2.540	1.095	7.017	4.008	4.362	3.507	-	-	1.769	**	735	**	4.634	**	-	-	0,98	6,33	
L3 x Cateto	Ef	2.540	1.128	6.165	3.781	5.332	2.874	4.425	1.869	1.900	**	718	**	4.237	**	-	3.713**	0,99	8,48	
L3 x L36	Ef	2.540	1.801	6.644	4.799	4.911	4.482	3.908	2.612	2.207	**	375	**	4.910	**	-	-	0,98	3,90	
228-3 x L 22	Ef.	2.387	1.095	5.449	3.623	3.934	3.131	3.080	2.829	1.739	**	661	**	3.689	**	-	-	0,99	0,56	
L3 x L53	Inef.	2.540	1.353	5.850	3.956	4.797	3.280	3.693	2.495	1.994	**	569	**	4.022	**	-	1.407*	0,99	3,49	
L36 x Cateto	Inef.	1.801	1.128	6.014	3.334	3.365	2.822	2.670	2.062	1.489	**	369	**	2.729	**	-	-	1.693*	0,99	3,74
Cateto x L53	Inef.	1.128	1.353	4.707	3.103	2.855	3.051	2.036	2.179	1.240	**	-113	*	3.542	**	-	-	0,99	0,93	

^a P₁ – progenitor 1; P₂ – progenitor 2; F₁ – híbrido do cruzamento dos dois progenitores; F₂ – geração obtida da autofecundação do respectivo F₁; RC₁-P₁ – primeiro retrocruzamento para progenitor 1; RC₁-P₂ – primeiro retrocruzamento para progenitor 2; RC₂-P₁ – segundo retrocruzamento para progenitor 1; RC₂-P₂ – segundo retrocruzamento para progenitor 2.
^b m – efeito médio; a – efeitos aditivos; d – efeitos dominantes; aa, ad e dd – efeitos epistáticos digênicos; ^c cruzamentos foram classificados com base em sua produção de grãos sob baixo e alto P no solo em eficientes ao P (Ef.) e ineficientes ao P (Inef.); **, * Significativo a 1% e 5% de probabilidade respectivamente pelo teste de F.

Tabela 21 – Médias de cada geração^a, estimativas de efeitos gênicos^b, coeficientes de determinação do modelo (R²) e valores de qui-quadrado (χ^2), para intervalo entre florescimento masculino e feminino-ASI (dias), para 7 cruzamentos F₁ (obtidos de 6 linhagens de milho com diferentes níveis de eficiência ao P) e suas gerações segregantes avaliadas em ambientes com diferentes níveis de P no solo nas safras 2004-2006

DADOS DE 3 AMBIENTES SOB BAIXO NÍVEL DE P NO SOLO																			
Cruzamentos	Tipo ^c	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ^2		
L3 x L22	Ef	-0,11	6,67	1,33	2,44	1,11	4,22	-	-	3,45	**	-3,22	**	-1,91	**	-	-	0,98	1,01
L3 x Cateto	Ef	-0,11	7,44	2,11	3,00	1,89	4,33	0,89	6,56	3,81	**	-3,69	**	-1,55	*	-	-	0,97	1,11
L3 x L36	Ef	-0,11	6,33	1,78	1,22	1,33	3,33	0,33	5,89	3,08	**	-3,26	**	-1,89	-	-	-	0,93	4,86
228-3 x L 22	Ef.	2,89	6,67	3,78	4,33	3,22	5,11	3,11	4,56	4,59	**	-1,67	**	-0,88	-	-	-	0,88	2,10
L3 x L53	Inef.	-0,11	7,33	4,89	3,89	3,11	6,44	3,33	7,33	3,98	**	-3,44	**	1,00	-	-	-	0,91	6,56
L36 x Cateto	Inef.	6,33	7,44	3,22	5,67	4,22	6,00	4,89	6,33	6,85	**	-0,73	*	-3,35	**	-	-	0,90	2,03
Cateto x L53	Inef.	7,44	7,33	4,33	4,56	5,11	4,89	6,00	6,00	7,05	**	0,05	-	-3,63	**	-	-	0,83	3,29

DADOS DE 2 AMBIENTES SOB ALTO NÍVEL DE P NO SOLO																			
Cruzamentos	Tipo	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ^2		
L3 x L22	Ef	-2,00	3,50	-0,50	0,83	-1,00	1,67	-	-	1,07	*	-2,68	**	-1,46	*	-	-	0,96	3,90
L3 x Cateto	Ef	-2,00	4,33	0,33	0,50	0,00	1,50	-1,17	2,67	1,07	**	-2,87	**	-0,77	-	-	-	0,95	4,37
L3 x L36	Ef	-2,00	3,33	-0,17	-0,67	0,17	1,00	-0,67	3,00	0,57	*	-2,39	**	-0,82	-	-	-	0,86	10,78
228-3 x L 22	Ef.	0,00	3,50	1,83	0,83	0,67	2,17	0,00	3,00	1,37	**	-1,75	**	0,31	-	-	-	0,92	6,43
L3 x L53	Inef.	-2,00	2,33	0,33	-0,50	-0,50	0,17	-0,50	1,00	-0,12	-	-1,82	**	0,32	-	-	-	0,80	8,32
L36 x Cateto	Inef.	3,33	4,33	0,50	1,67	1,33	3,00	1,67	3,50	3,63	**	-0,74	*	-3,20	**	-	-	0,90	4,11
Cateto x L53	Inef.	4,33	2,33	1,33	2,50	2,50	1,83	3,83	3,33	3,44	**	0,88	**	-2,11	**	-	-	0,81	2,27

DADOS DOS 5 AMBIENTES AVALIADOS																			
Cruzamentos	Tipo	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ^2		
L3 x L22	Ef	-0,87	5,40	0,60	1,80	0,27	3,20	-	-	2,46	**	-2,99	**	-1,60	*	-	-	0,97	1,99
L3 x Cateto	Ef	-0,87	6,20	1,40	2,00	1,13	3,20	0,07	5,00	2,72	**	-3,36	**	-1,28	*	-	-	0,97	2,29
L3 x L36	Ef	-0,87	5,13	1,00	0,47	0,87	2,40	-0,07	4,73	2,14	**	-2,92	**	-1,50	-	-	-	0,92	9,35
228-3 x L 22	Ef.	1,73	5,40	3,00	2,93	2,20	3,93	1,87	3,93	3,38	**	-1,73	**	-0,61	-	-	-	0,95	1,62
L3 x L53	Inef.	-0,87	5,33	3,07	2,13	1,67	3,93	1,80	4,80	2,40	**	-2,80	**	0,58	-	-	-	0,91	7,86
L36 x Cateto	Inef.	5,13	6,20	2,13	4,07	3,07	4,80	3,60	5,20	5,59	**	-0,75	*	-3,41	**	-	-	0,92	2,57
Cateto x L53	Inef.	6,20	5,33	3,13	3,73	4,07	3,67	5,13	4,93	5,63	**	0,37	-	-2,94	**	-	-	0,90	2,55

^a P₁ – progenitor 1; P₂ – progenitor 2; F₁ – híbrido do cruzamento dos dois progenitores; F₂ – geração obtida da autofecundação do respectivo F₁; RC₁-P₁ – primeiro retrocruzamento para progenitor 1; RC₁-P₂ – primeiro retrocruzamento para progenitor 2; RC₂-P₁ – segundo retrocruzamento para progenitor 1; RC₂-P₂ – segundo retrocruzamento para progenitor 2.
^b m – efeito médio; a – efeitos aditivos; d – efeitos dominantes; aa, ad e dd – efeitos epistáticos digênicos. ^c cruzamentos foram classificados com base em sua produção de grãos sob baixo e alto P no solo em ambientes com diferentes níveis de P (Ef.) e ineficientes ao P (Inef.); **, * Significativo a 1% e 5% de probabilidade respectivamente pelo teste de F.

Tabela 22 – Médias de cada geração^a, estimativas de efeitos gênicos^b, coeficientes de determinação do modelo (R²) e valores de qui-quadrado (χ²), para teor de P nos grãos-TPG (gkg⁻¹) para 7 cruzamentos F₁ (obtidos de 6 linhagens de milho com diferentes níveis de eficiência a P) e suas gerações segregantes avaliadas em ambientes com diferentes níveis de P no solo nas safras 2004-2006

DADOS DE 3 AMBIENTES SOB BAIXO NÍVEL DE P NO SOLO																					
Cruzamentos	Tipo ^c	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²				
L3 x L22	Ef	2,61	3,23	1,86	2,13	1,98	2,33	-	-	2,87	**	-0,31	*	-1,11	**	-	-	-	0,93	8,15*	
L3 x Cateto	Ef	2,61	3,84	1,92	2,41	2,13	2,58	2,14	2,83	3,20	**	-0,58	**	-2,35	**	-	-	1,08	*	0,95	6,80
L3 x L36	Ef	2,61	2,84	2,08	2,34	2,20	2,13	2,27	2,36	2,66	**	-0,09		-0,66	**	-	-	-		0,73	10,42
228-3 x L 22	Ef.	2,57	3,23	2,10	2,17	2,04	2,28	2,17	2,27	2,88	**	-0,29	**	-2,35	**	-	-	1,58	*	0,88	6,93
L3 x L53	Inef.	2,61	3,01	1,84	2,10	2,01	2,21	2,13	2,32	2,80	**	-0,19	**	-2,00	**	-	-	1,06	*	0,95	2,53
L36 x Cateto	Inef.	2,84	3,84	2,10	2,44	2,16	2,64	2,30	3,17	3,34	**	-0,51	**	-2,53	**	-	-	1,30	**	0,99	0,68
Cateto x L53	Inef.	3,84	3,01	2,33	2,93	2,84	2,57	3,08	2,63	3,36	**	0,39	**	-1,09	**	-	-	-		0,89	10,68

DADOS DE 2 AMBIENTES SOB ALTO NÍVEL DE P NO SOLO																					
Cruzamentos	Tipo	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²				
L3 x L22	Ef	2,67	2,93	2,02	2,58	2,25	2,50	-	-	2,75	**	-0,23		-0,72	**	-	-	-		0,78	6,30
L3 x Cateto	Ef	2,67	3,73	2,15	2,62	2,42	3,00	2,43	3,18	3,15	**	-0,53	**	-1,00	**	-	-	-		0,98	1,44
L3 x L36	Ef	2,67	2,35	2,05	2,28	2,28	2,17	2,50	2,45	2,53	**	0,11	*	-0,49	**	-	-	-		0,89	1,25
228-3 x L 22	Ef.	2,40	2,93	2,18	2,38	2,07	2,40	2,42	2,40	2,58	**	-0,18		-0,44	*	-	-	-		0,73	5,28
L3 x L53	Inef.	2,67	2,93	2,45	2,78	2,58	2,63	2,75	2,77	2,83	**	-0,08		-0,36	**	-	-	-		0,77	1,63
L36 x Cateto	Inef.	2,35	3,73	2,43	2,82	2,22	2,75	2,40	3,22	2,98	**	-0,63	**	-0,59	**	-	-	-		0,93	5,10
Cateto x L53	Inef.	3,73	2,93	2,90	3,03	2,88	2,90	3,08	2,73	3,16	**	0,30	*	-0,33		-	-	-		0,66	9,72

DADOS DOS 5 AMBIENTES AVALIADOS																					
Cruzamentos	Tipo	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²				
L3 x L22	Ef	2,63	3,11	1,92	2,31	2,09	2,40	-	-	2,83	**	-0,25	**	-0,99	**	-	-	-		0,96	3,61
L3 x Cateto	Ef	2,63	3,80	2,01	2,49	2,25	2,75	2,26	2,97	3,18	**	-0,55	**	-1,86	**	-	-	0,71	*	0,96	7,11
L3 x L36	Ef	2,63	2,65	2,07	2,32	2,23	2,15	2,36	2,39	2,58	**	0,00		-0,59	**	-	-	-		0,85	5,35
228-3 x L 22	Ef.	2,50	3,11	2,13	2,25	2,05	2,33	2,27	2,32	2,78	**	-0,24	*	-1,85	**	-	-	1,21	*	0,88	9,12
L3 x L53	Inef.	2,63	2,98	2,09	2,37	2,24	2,38	2,38	2,50	2,73	**	-0,15	*	-0,72	**	-	-	-		0,89	6,72
L36 x Cateto	Inef.	2,65	3,80	2,23	2,59	2,18	2,69	2,34	3,19	3,22	**	-0,57	**	-2,00	**	-	-	1,01	**	0,99	1,87
Cateto x L53	Inef.	3,80	2,98	2,56	2,97	2,86	2,70	3,08	2,67	3,36	**	0,35	**	-1,57	*	-	-	0,79	*	0,89	10,66

^a P₁ – progenitor 1; P₂ – progenitor 2; F₁ – híbrido do cruzamento dos dois progenitores; F₂ – geração obtida da autofecundação do respectivo F₁; RC₁-P₁ – primeiro retrocruzamento para progenitor 1; RC₁-P₂ – primeiro retrocruzamento para progenitor 2; RC₂-P₁ – segundo retrocruzamento para progenitor 1; RC₂-P₂ – segundo retrocruzamento para progenitor 2;

^b m – efeito médio; a – efeitos aditivos; d – efeitos dominantes; aa, ad e dd – efeitos epistáticos digênicos; ^c cruzamentos foram classificados com base em sua produção de grãos sob baixo e alto P no solo em eficientes ao P (Ef.) e ineficientes ao P (Inef.); **, * Significativo a 1% e 5% de probabilidade respectivamente pelo teste de F.

Tabela 23 – Médias de cada geração^a, estimativas de efeitos gênicos^b, coeficientes de determinação do modelo (R²) e valores de qui-quadrado (χ²), para quantidade de P total na planta-FTOT (kg), para 7 cruzamentos F₁ (obtidos de 6 linhagens de milho com diferentes níveis de eficiência ao P) e suas gerações segregantes avaliadas em ambientes com diferentes níveis de P no solo nas safras 2004-2006

DADOS DE 3 AMBIENTES SOB BAIXO NÍVEL DE P NO SOLO																					
Cruzamentos	Tipo ^c	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²				
L3 x L22	Ef	7,27	5,31	10,01	7,67	6,64	6,61	-	-	6,25	**	0,99	*	2,91	*	-	-	0,72	6,61		
L3 x Cateto	Ef	7,27	4,93	11,15	8,90	11,90	7,37	9,33	5,37	6,12	**	1,16	**	5,57	**	-	6,33	**	0,96	2,48	
L3 x L36	Ef	7,27	4,99	11,90	10,90	9,94	8,56	8,11	5,17	6,19	**	1,15	*	6,49	**	-	-	-	0,91	6,14	
228-3 x L22	Ef.	7,26	5,31	12,37	7,04	6,62	6,55	6,14	6,34	6,31	**	0,81	*	-3,47	*	-	-	9,45	**	0,95	4,55
L3 x L53	Inef.	7,27	3,60	7,56	7,21	9,12	4,67	7,79	4,67	5,49	**	1,95	**	2,56	*	-	-	-	0,86	6,49	
L36 x Cateto	Inef.	4,99	4,93	9,81	7,45	7,13	7,59	6,31	6,33	4,98	**	0,01		4,88	**	-	-	-	0,99	0,30	
Cateto x L53	Inef.	4,93	3,60	8,02	8,55	7,75	5,76	5,87	5,95	8,62	**	0,62	*	-0,79		-4,38*	-	-	0,90	3,81	

DADOS DE 2 AMBIENTES SOB ALTO NÍVEL DE P NO SOLO																				
Cruzamentos	Tipo	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²			
L3 x L22	Ef	12,00	8,52	21,88	17,21	17,42	17,01	-	-	10,80	**	1,95	*	12,47	**	-	-	-	0,96	3,29
L3 x Cateto	Ef	12,00	11,47	17,75	15,91	17,10	15,37	17,18	12,80	12,51	**	1,39		6,90	*	-	-	-	0,77	10,02
L3 x L36	Ef	12,00	12,35	21,51	19,03	17,81	17,73	16,57	15,34	12,82	**	0,22		10,60	**	-	-	-	0,92	5,01
228-3 x L 22	Ef.	9,16	8,52	17,93	15,57	13,55	14,49	14,51	11,55	9,68	**	0,85		10,09	**	-	-	-	0,86	9,57
L3 x L53	Inef.	12,00	8,49	26,96	20,78	21,54	18,60	16,81	14,25	10,76	**	1,83	**	18,33	**	-	-	-	0,97	3,80
L36 x Cateto	Inef.	12,35	11,47	24,22	16,97	14,92	14,13	14,89	12,71	11,36	**	0,85		10,31	**	-	-	-	0,86	9,06
Cateto x L53	Inef.	11,47	8,49	25,18	17,42	14,91	17,08	11,97	11,02	8,99	**	0,88		14,99	**	-	-	-	0,93	10,77

DADOS DOS 5 AMBIENTES AVALIADOS																				
Cruzamentos	Tipo	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²			
L3 x L22	Ef	9,17	6,59	14,76	11,49	10,95	10,77	-	-	7,86	**	1,18	**	6,69	**	-	-	-	0,97	2,01
L3 x Cateto	Ef	9,17	7,55	13,79	11,70	13,98	10,57	12,47	8,34	8,58	**	0,88	*	6,44	**	-	6,35	*	0,95	4,28
L3 x L36	Ef	9,17	7,94	15,74	14,15	13,09	12,23	11,49	9,24	8,55	**	0,90	*	8,50	**	-	-	-	0,92	10,44
228-3 x L 22	Ef.	8,02	6,59	14,60	10,45	9,39	9,73	9,49	8,42	7,25	**	0,64	*	6,20	**	-	-	-	0,92	5,35
L3 x L53	Inef.	9,17	5,56	15,32	12,64	14,09	10,24	11,40	8,51	7,56	**	1,98	**	9,08	**	-	-	-	0,94	7,31
L36 x Cateto	Inef.	7,94	7,55	15,58	11,26	10,24	10,20	9,74	8,88	7,62	**	0,30		6,77	**	-	-	-	0,94	4,96
Cateto x L53	Inef.	7,55	5,56	14,88	12,10	10,61	10,29	8,31	7,98	6,39	**	0,71		8,87	**	-	-	-	0,95	10,52

^a P₁ – progenitor 1; P₂ – progenitor 2; F₁ – híbrido do cruzamento dos dois progenitores; F₂ – geração obtida da autofecundação do respectivo F₁; RC₁-P₁ – primeiro retrocruzamento para progenitor 1; RC₁-P₂ – primeiro retrocruzamento para progenitor 2; RC₂-P₁ – segundo retrocruzamento para progenitor 1; RC₂-P₂ – segundo retrocruzamento para progenitor 2;

^b m – efeito médio; a – efeitos aditivos; d – efeitos dominantes; aa, ad e dd – efeitos epistáticos digênicos; ^c cruzamentos foram classificados com base em sua produção de grãos sob baixo e alto P no solo em eficientes ao P (Ef.) e ineficientes ao P (Inef.); **, * Significativo a 1% e 5% de probabilidade respectivamente pelo teste de F.

Tabela 24 – Médias de cada geração^a, estimativas de efeitos gênicos^b, coeficientes de determinação do modelo (R²) e valores de qui-quadrado (χ²), para eficiência de absorção de P-EFABS (kg P na planta por kg P no solo x 10²), para 7 cruzamentos F₁ (obtidos de 6 linhagens de milho com diferentes níveis de eficiência ao P) e suas gerações segregantes avaliadas em ambientes com diferentes níveis de P no solo nas safras 2004-2006

DADOS DE 3 AMBIENTES SOB BAIXO NÍVEL DE P NO SOLO																				
Cruzamentos	Tipo ^c	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²			
L3 x L22	Ef	32,80	23,83	45,90	34,30	30,20	30,30	-	-	27,98	**	4,35	*	13,49	*	-	-	0,75	6,54	
L3 x Cateto	Ef	32,80	21,93	48,50	39,20	52,00	31,30	41,50	23,00	27,39	**	5,43	**	23,09	**	-	29,14**	-	0,97	2,00
L3 x L36	Ef	32,80	21,73	52,43	47,60	43,60	36,40	35,40	23,20	26,87	**	5,87	**	26,71	**	-	-	-	0,91	5,98
228-3 x L22	Ef.	31,93	23,83	55,27	32,00	30,20	30,60	27,40	29,50	27,93	**	3,34	*	-11,58	*	-	-	38,56*	0,93	5,68
L3 x L53	Inef.	32,80	16,50	32,73	31,30	39,70	20,20	33,90	20,10	24,75	**	8,59	**	9,46	*	-	-	-	0,87	6,31
L36 x Cateto	Inef.	21,73	21,93	43,87	33,10	31,40	33,30	27,90	27,80	21,85	**	-0,13		22,06	**	-	-	-	0,99	0,28
Cateto xL53	Inef.	21,93	16,50	36,70	39,60	35,90	26,80	26,00	27,80	40,35	**	2,47	*	-4,41		-21,25*	-	-	0,89	5,02

DADOS DE 2 AMBIENTES SOB ALTO NÍVEL DE P NO SOLO																				
Cruzamentos	Tipo	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²			
L3 x L22	Ef	14,55	10,35	26,55	20,90	21,10	20,60	-	-	13,15	**	2,37	*	15,06	**	-	-	-	0,96	3,27
L3 x Cateto	Ef	14,55	13,90	21,55	19,30	20,80	18,70	20,90	15,60	15,22	**	1,71		8,37	*	-	-	-	0,77	10,16
L3 x L36	Ef	14,55	15,05	26,15	23,20	21,60	21,60	20,20	18,70	15,65	**	0,25		12,83	**	-	-	-	0,92	5,21
228-3 x L22	Ef.	11,21	10,35	21,75	18,90	16,50	17,60	17,70	14,00	11,83	**	1,08		12,13	**	-	-	-	0,86	9,58
L3 x L53	Inef.	14,55	10,35	32,70	25,20	26,10	22,60	20,40	17,30	13,10	**	2,19	**	22,10	**	-	-	-	0,97	3,66
L36 x Cateto	Inef.	15,05	13,90	29,35	20,70	18,20	17,20	18,10	15,40	13,81	**	1,09		12,59	**	-	-	-	0,86	8,94
Cateto xL53	Inef.	13,90	10,35	30,50	21,20	18,10	20,80	14,60	13,40	10,95	**	1,05		18,15	**	-	-	-	0,93	10,69

DADOS DOS 5 AMBIENTES AVALIADOS																				
Cruzamentos	Tipo	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²			
L3 x L22	Ef	25,50	18,40	38,20	28,90	26,50	26,40	-	-	21,66	**	3,32	*	13,91	**	-	-	-	0,89	4,33
L3 x Cateto	Ef	25,50	18,70	37,70	31,20	39,50	26,30	33,20	20,00	22,31	**	3,44	**	17,65	**	-	20,49**	-	0,97	2,22
L3 x L36	Ef	25,50	19,10	41,90	37,80	34,80	30,50	29,30	21,40	21,97	**	3,70	*	21,87	**	-	-	-	0,92	7,11
228-3 x L22	Ef.	23,60	18,40	41,90	26,70	24,70	25,40	23,50	23,30	21,16	**	1,90	*	0,69		-	-	19,55**	0,96	4,09
L3 x L53	Inef.	25,50	14,00	32,70	28,80	34,30	21,10	28,50	19,00	19,99	**	6,27	**	14,70	**	-	-	-	0,91	6,80
L36 x Cateto	Inef.	19,10	18,70	38,10	28,10	26,10	26,90	24,00	22,80	18,79	**	0,27		18,02	**	-	-	-	0,97	1,26
Cateto xL53	Inef.	18,70	14,00	34,20	32,30	28,80	24,40	21,40	22,00	28,25	**	1,87	*	4,97		-12,24*	-	-	0,95	5,29

^a P₁ – progenitor 1; P₂ – progenitor 2; F₁ – híbrido do cruzamento dos dois progenitores; F₂ – geração obtida da autofecundação do respectivo F₁; RC₁-P₁ – primeiro retrocruzamento para progenitor 1; RC₁-P₂ – primeiro retrocruzamento para progenitor 2; RC₂-P₁ – segundo retrocruzamento para progenitor 1; RC₂-P₂ – segundo retrocruzamento para progenitor 2;

^b m – efeito médio; a – efeitos aditivos; d – efeitos dominantes; aa, ad e dd – efeitos epistáticos digênicos; ^c cruzamentos foram classificados com base em sua produção de grãos sob baixo e alto P no solo em eficientes ao P (Ef.) e ineficientes ao P (Inef.); **, * Significativo a 1% e 5% de probabilidade respectivamente pelo teste de F.

Tabela 25 – Médias de cada geração^a, estimativas de efeitos gênicos^b, coeficientes de determinação do modelo (R²) e valores de qui-quadrado (χ^2), para eficiência de utilização de P-EFUTIL (kg de grãos por kg de P na planta), para 7 cruzamentos F₁ (obtidos de 6 linhagens de milho com diferentes níveis de eficiência ao P) e suas gerações segregantes avaliadas em ambientes com diferentes níveis de P no solo nas safras 2004-2006

DADOS DE 3 AMBIENTES SOB BAIXO NÍVEL DE P NO SOLO																	
Cruzamentos	Tipo ^c	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ^2
L3 x L22	Ef	267,40	68,23	456,41	361,55	404,17	283,26	-	-	167,82**	101,63**	446,04**	-	-	-157,45*	1,00	2,00
L3 x Cateto	Ef	267,40	91,61	403,86	305,77	367,98	268,62	358,52	209,52	182,98**	90,69**	337,72**	-	-	-118,96*	0,98	7,09
L3 x L36	Ef	267,40	118,57	404,19	333,70	367,04	340,83	341,13	276,23	195,97**	73,90**	422,05**	-	-215,66*	-104,63*	0,98	5,97
228-3 x L 22	Ef.	221,60	68,23	357,58	335,85	383,67	249,51	314,10	298,00	144,92**	82,20**	507,55**	-	-	-294,89*	0,98	7,53
L3 x L53	Inef.	267,40	149,50	407,66	348,42	366,62	284,19	364,39	254,76	211,74**	63,15**	335,82**	-	-	-141,90*	0,96	8,72
L36 x Cateto	Inef.	118,57	91,61	370,12	274,56	320,61	253,04	266,28	200,59	105,09**	18,67	440,57**	-	-	-175,54*	0,96	13,00
Cateto x L53	Inef.	91,61	149,50	344,97	235,75	255,69	295,47	202,38	236,42	123,08**	-28,79**	347,20**	-	-	-126,85*	0,96	9,24

DADOS DE 2 AMBIENTES SOB ALTO NÍVEL DE P NO SOLO																	
Cruzamentos	Tipo	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ^2
L3 x L22	Ef	236,73	130,76	387,12	289,36	340,47	295,80	-	-	193,68**	50,96*	204,30**	-	-	-	0,97	5,96
L3 x Cateto	Ef	236,73	123,48	386,51	280,69	309,89	239,58	296,71	203,27	190,14**	61,13**	191,95**	-	-	-	0,98	4,58
L3 x L36	Ef	236,73	216,45	368,85	297,52	318,34	312,93	285,68	248,35	231,35**	16,98*	142,72**	-	-	-	0,96	3,06
228-3 x L 22	Ef.	272,21	130,76	346,92	297,44	348,95	298,73	277,20	282,20	221,52**	65,73*	147,30**	-	-	-	0,91	10,99
L3 x L53	Inef.	236,73	211,47	325,55	264,03	285,76	266,57	263,95	256,77	229,74**	9,48	92,13**	-	-	-	0,95	2,85
L36 x Cateto	Inef.	216,45	123,48	321,15	248,41	280,27	238,04	225,92	190,38	171,88**	34,52**	154,38**	-	-	-	0,97	3,17
Cateto x L53	Inef.	123,48	211,47	254,76	225,61	239,31	251,96	208,26	251,98	180,93**	-36,35*	88,54*	-	-	-	0,85	7,47

DADOS DOS 5 AMBIENTES AVALIADOS																	
Cruzamentos	Tipo	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ^2
L3 x L22	Ef	255,13	93,24	428,69	332,67	378,69	288,27	-	-	174,19**	82,59**	381,22**	-	-	-126,72**	0,99	0,32
L3 x Cateto	Ef	255,13	104,36	396,92	295,74	344,74	257,00	333,80	207,02	179,74**	77,53**	258,14**	-	-	-40,97	0,99	0,73
L3 x L36	Ef	255,13	157,72	390,05	319,23	347,56	329,67	318,95	265,08	209,99**	41,20**	320,01**	-	-	-141,50*	0,97	9,64
228-3 x L22	Ef.	241,84	93,24	353,32	320,49	369,78	269,20	299,30	291,70	167,54**	78,87**	423,81**	-	-	-238,03**	0,99	2,43
L3 x L53	Inef.	255,13	174,29	374,82	314,67	334,27	277,14	324,22	255,57	220,07**	44,03**	234,33**	-	-	-81,92*	0,96	8,55
L36 x Cateto	Inef.	157,72	104,36	350,53	264,10	304,48	247,04	250,14	196,50	134,42**	33,10**	347,60**	-	-	-132,96*	0,98	7,20
Cateto x L53	Inef.	104,36	174,29	308,89	231,70	249,13	278,06	204,70	242,60	139,33**	-33,92*	270,42**	-	-	-100,85*	0,97	7,87

^a P₁ – progenitor 1; P₂ – progenitor 2; F₁ – híbrido do cruzamento dos dois progenitores; F₂ – geração obtida da autofecundação do respectivo F₁; RC₁-P₁ – primeiro retrocruzamento para progenitor 1; RC₁-P₂ – primeiro retrocruzamento para progenitor 2; RC₂-P₁ – segundo retrocruzamento para progenitor 1; RC₂-P₂ – segundo retrocruzamento para progenitor 2;
^b m – efeito médio; a – efeitos aditivos; d – efeitos dominantes; aa, ad e dd – efeitos epistáticos digênicos; ^c cruzamentos foram classificados com base em sua produção de grãos sob baixo e alto P no solo em eficientes ao P (Ef.) e ineficientes ao P (Inef.); **, * Significativo a 1% e 5% de probabilidade respectivamente pelo teste de F.

Tabela 26 – Médias de cada geração^a, estimativas de efeitos gênicos^b, coeficientes de determinação do modelo (R²) e valores de qui-quadrado (χ²), para eficiência de uso de P-EFUSO (kg de grãos por kg de P no solo), para 7 cruzamentos F₁ (obtidos de 6 linhagens de milho com diferentes níveis de eficiência ao P) e suas gerações segregantes avaliadas em ambientes com diferentes níveis de P no solo nas safras 2004-2006

DADOS DE 3 AMBIENTES SOB BAIXO NÍVEL DE P NO SOLO																					
Cruzamentos	Tipo ^c	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²				
L3 x L22	Ef	89,05	38,90	223,68	120,44	125,68	88,23	-	-	63,98	**	25,87	**	38,13	*	-	-	121,57	*	0,99	2,30
L3 x Cateto	Ef	89,05	34,48	205,09	119,79	193,90	80,27	147,36	49,12	61,86	**	26,98	**	137,79	**	-	164,36	**	-	0,99	3,26
L3 x L36	Ef	89,05	38,56	212,47	153,84	162,20	125,46	117,74	62,22	61,83	**	28,00	**	159,98	**	-	-	-	-	0,97	9,44
228-3 x L 22	Ef.	84,23	38,90	190,25	110,22	120,32	81,18	84,59	92,05	59,96	**	23,72	**	102,81	**	-	-	-	-	0,93	6,49
L3 x L53	Inef.	89,05	36,76	137,32	103,13	146,98	66,53	115,41	51,91	63,33	**	25,47	**	80,60	**	-	90,20	**	-	0,98	1,39
L36 x Cateto	Inef.	38,56	34,48	168,54	91,90	99,01	83,82	73,77	64,39	36,38	**	3,50	**	118,83	**	-	-	-	-	0,97	2,49
Cateto x L53	Inef.	34,48	36,76	133,34	93,53	88,01	79,90	59,21	65,16	36,04	**	-1,17	**	102,91	**	-	-	-	-	0,98	1,54

DADOS DE 2 AMBIENTES SOB ALTO NÍVEL DE P NO SOLO																					
Cruzamentos	Tipo	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²				
L3 x L22	Ef	33,36	12,63	100,17	58,30	66,05	58,01	-	-	22,80	**	10,12	**	74,03	**	-	-	-	-	0,99	4,25
L3 x Cateto	Ef	33,36	16,45	81,75	53,16	65,02	43,03	61,07	29,51	24,91	**	8,46	*	57,03	**	-	27,07	*	-	0,99	0,18
L3 x L36	Ef	33,36	31,82	95,83	67,58	68,30	67,61	57,98	45,73	32,92	**	0,76	**	68,63	**	-	-	-	-	0,99	1,74
228-3 x L 22	Ef.	29,37	12,63	70,94	53,63	58,63	52,35	48,16	39,60	21,66	**	7,55	**	88,59	**	-	-	-43,11	*	0,98	7,78
L3 x L53	Inef.	33,36	21,84	101,64	63,70	68,63	59,45	52,91	44,50	28,29	**	6,00	**	72,28	**	-	-	-	-	0,99	4,38
L36 x Cateto	Inef.	31,82	16,45	93,10	51,38	49,74	40,81	40,45	28,62	24,15	**	7,83	**	32,03	*	-	-	36,81	*	0,99	8,81
Cateto x L53	Inef.	16,45	21,84	75,85	46,86	41,82	51,27	30,79	32,81	18,78	**	-2,91	*	55,76	**	-	-	-	-	0,98	5,02

DADOS DOS 5 AMBIENTES AVALIADOS																					
Cruzamentos	Tipo	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²				
L3 x L22	Ef	66,77	28,40	174,28	95,59	101,83	76,14	-	-	46,12	**	19,60	**	103,12	**	-	-	-	-	0,94	4,31
L3 x Cateto	Ef	66,77	27,27	155,75	93,14	142,35	65,37	112,84	41,28	47,62	**	19,70	**	104,98	**	-	113,37	**	-	0,99	3,42
L3 x L36	Ef	66,77	35,86	165,81	119,34	124,64	102,32	93,84	55,62	50,26	**	18,09	**	123,91	**	-	-	-	-	0,97	8,46
228-3 x L 22	Ef.	62,29	28,40	142,53	87,58	95,65	69,65	70,02	71,07	45,40	**	13,62	*	86,98	**	-	-	-	-	0,93	10,02
L3 x L53	Inef.	66,77	30,79	123,05	87,36	115,64	63,70	90,41	48,95	49,36	**	17,42	**	77,26	**	-	55,81	**	-	0,99	1,28
L36 x Cateto	Inef.	35,86	27,27	138,36	75,69	79,30	66,62	60,44	50,08	30,69	**	5,39	*	94,36	**	-	-	-	-	0,97	3,71
Cateto x L53	Inef.	27,27	30,79	110,35	74,86	69,53	68,44	47,84	52,22	29,23	**	-1,84	**	84,15	**	-	-	-	-	0,99	0,98

^a P₁ – progenitor 1; P₂ – progenitor 2; F₁ – híbrido do cruzamento dos dois progenitores; F₂ – geração obtida da autofecundação do respectivo F₁; RC₁-P₁ – primeiro retrocruzamento para progenitor 1; RC₁-P₂ – primeiro retrocruzamento para progenitor 2; RC₂-P₁ – segundo retrocruzamento para progenitor 1; RC₂-P₂ – segundo retrocruzamento para progenitor 2.;
^b m – efeito médio; a – efeitos aditivos; d – efeitos dominantes; aa, ad e dd – efeitos epistáticos digênicos; ^c cruzamentos foram classificados com base em sua produção de grãos sob baixo e alto P no solo em eficientes ao P (Ef.) e ineficientes ao P (Inef.); **, * Significativo a 1% e 5% de probabilidade respectivamente pelo teste de F.

Tabela 27 – Médias de cada geração^a, estimativas de efeitos gênicos^b, coeficientes de determinação do modelo (R²) e valores de qui-quadrado (χ²), índice de colheita de P-ICP (kg de P nos grãos por kg de P na planta x 10²), para 7 cruzamentos F₁ (obtidos de 6 linhagens de milho com diferentes níveis de eficiência ao P) e suas gerações segregantes avaliadas em ambientes com diferentes níveis de P no solo nas safras 2004-2006

DADOS DE 3 AMBIENTES SOB BAIXO NÍVEL DE P NO SOLO																			
Cruzamentos	Tipo ^c	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²		
L3 x L22	Ef	67,66	21,97	82,13	73,30	78,20	65,20	-	-	44,85	**	20,91	**	73,45	**	-	-36,20*	0,98	8,87*
L3 x Cateto	Ef	67,66	33,43	75,97	72,40	75,30	68,70	75,00	58,20	51,36	**	17,04	**	62,42	**	-	-21,81*	0,99	2,92
L3 x L36	Ef	67,66	31,80	79,87	74,40	76,40	70,70	72,50	61,60	50,53	**	17,17	**	68,01	**	-	-29,29*	0,98	5,87
228-3 x L22	Ef.	55,60	21,97	75,10	68,90	74,80	56,40	66,60	67,10	38,80	**	17,11	**	77,71	**	-	-	0,99	2,62
L3 x L53	Inef.	67,66	43,83	73,83	71,50	72,20	63,30	72,90	59,90	56,42	**	10,48	**	38,71	**	-	-	0,95	7,06
L36 x Cateto	Inef.	31,80	33,43	76,67	66,50	68,10	66,30	60,90	60,90	32,60	**	-0,29		92,86	**	-	-	0,99	0,69
Cateto xL53	Inef.	33,43	43,83	78,13	68,70	71,00	75,30	59,60	61,50	39,33	**	-3,80		90,64	**	-	-	0,98	9,21

DADOS DE 2 AMBIENTES SOB ALTO NÍVEL DE P NO SOLO																			
Cruzamentos	Tipo	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²		
L3 x L22	Ef	62,05	36,40	77,15	71,30	74,80	71,70	-	-	49,25	**	12,85	**	64,69	**	-	-19,50*	0,99	0,72
L3 x Cateto	Ef	62,05	46,40	79,35	72,50	74,20	69,90	70,60	62,80	55,59	**	5,82	**	46,49	**	-	-	0,98	3,33
L3 x L36	Ef	62,05	52,65	75,20	67,50	72,00	68,10	72,30	61,50	61,78	**	6,10	**	14,39	**	-	-	0,86	10,09
228-3 x L22	Ef.	64,10	36,40	74,65	69,10	70,70	68,60	65,10	64,70	50,25	**	13,85	*	52,20	*	-	-23,50*	0,99	0,06
L3 x L53	Inef.	62,05	62,75	75,75	71,00	68,00	69,30	72,30	70,40	62,81	**	0,64		13,23	*	-	-	0,96	1,21
L36 xCateto	Inef.	52,65	46,40	75,75	70,40	62,10	65,20	54,50	60,40	52,19	**	1,21		25,40	**	-	-	0,89	10,61
Cateto xL53	Inef.	46,40	62,75	72,85	67,00	68,80	72,10	65,70	68,30	58,15	**	-6,68		17,16	*	-	-	0,87	10,09

DADOS DOS 5 AMBIENTES AVALIADOS																			
Cruzamentos	Tipo	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²		
L3 x L22	Ef	65,40	27,70	80,10	72,50	76,80	67,80	-	-	46,55	**	18,85	**	69,86	**	-	-19,70**	1,00	0,02
L3 x Cateto	Ef	65,40	38,60	77,30	72,40	74,80	69,20	73,20	60,10	53,22	**	13,18	**	55,09	**	-	-16,22*	0,99	4,54
L3 x L36	Ef	65,40	40,10	78,00	71,60	74,60	69,70	72,40	61,60	54,15	**	12,20	**	50,75	**	-	-16,77*	0,98	6,56
228-3 x L22	Ef.	59,00	27,70	74,90	69,00	73,20	61,30	66,60	66,10	43,35	**	14,55	**	67,60	**	-	-	0,99	3,35
L3 x L53	Inef.	65,40	51,40	74,60	71,30	70,50	65,70	72,70	64,10	58,40	**	6,40	**	29,10	**	-	-	0,97	5,02
L36 xCateto	Inef.	40,10	38,60	76,30	68,10	65,70	65,80	58,30	60,70	39,35	**	0,50		73,42	**	-	-	0,99	2,43
Cateto xL53	Inef.	38,60	51,40	76,00	68,00	70,10	74,00	62,00	64,20	45,00	**	-5,67		68,98	**	-	-	0,98	7,82

^a P₁ – progenitor 1; P₂ – progenitor 2; F₁ – híbrido do cruzamento dos dois progenitores; F₂ – geração obtida da autofecundação do respectivo F₁; RC₁-P₁ – primeiro retrocruzamento para progenitor 1; RC₁-P₂ – primeiro retrocruzamento para progenitor 2; RC₂-P₁ – segundo retrocruzamento para progenitor 1; RC₂-P₂ – segundo retrocruzamento para progenitor 2.;

^b m – efeito médio; a – efeitos aditivos; d – efeitos dominantes; aa, ad e dd – efeitos epistáticos digênicos; ^c cruzamentos foram classificados com base em sua produção de grãos sob baixo e alto P no solo em eficientes ao P (Ef.) e ineficientes ao P (Inef.); **, * Significativo a 1% e 5% de probabilidade respectivamente pelo teste de F.

Tabela 28 – Médias de cada geração^a, estimativas de efeitos gênicos^b, coeficientes de determinação do modelo (R²) e valores de qui-quadrado (χ²), para quociente de utilização de P-QUTIL (kg de grãos por kg de P nos grãos), para 7 cruzamentos F₁ (obtidos de 6 linhagens de milho com diferentes níveis de eficiência ao P) e suas gerações segregantes avaliadas em ambientes com diferentes níveis de P no solo nas safras 2004-2006

DADOS DE 3 AMBIENTES SOB BAIXO NÍVEL DE P NO SOLO																	
Cruzamentos	Tipo ^c	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²
L3 x L22	Ef	445,00	359,64	630,79	579,53	591,16	510,20	-	-	406,74	**	44,71	**	249,93	**	-	13,10**
L3 x Cateto	Ef	445,00	310,17	599,07	483,88	556,12	452,19	547,57	405,55	381,83	**	71,04	**	227,18	**	-	9,57
L3 x L36	Ef	445,00	413,97	560,54	509,01	534,68	544,84	528,62	501,97	430,54	**	14,39	**	298,26	**	-	4,43
228-3 x L 22	Ef.	454,37	359,64	542,43	550,18	583,76	501,68	548,74	503,76	408,31	**	47,92	**	447,52	**	-	5,30
L3 x L53	Inef.	445,00	392,76	647,07	561,25	586,01	522,27	582,71	496,74	421,29	**	28,12	*	239,88	**	-	4,87
L36 x Cateto	Inef.	413,97	310,17	545,48	466,19	533,07	435,35	496,40	369,56	366,17	**	56,35	**	196,34	**	-	9,54
Cateto x L53	Inef.	310,17	392,76	496,47	385,18	401,38	441,87	375,78	444,76	352,10	**	41,57	**	138,84	**	-	5,32

DADOS DE 2 AMBIENTES SOB ALTO NÍVEL DE P NO SOLO																	
Cruzamentos	Tipo	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²
L3 x L22	Ef	441,90	418,13	583,77	483,68	536,42	478,73	-	-	426,31	**	19,98	**	-	-	0,93	3,38
L3 x Cateto	Ef	441,90	315,10	564,48	445,48	480,12	396,71	481,69	373,46	372,81	**	68,91	**	-	-	0,95	5,69
L3 x L36	Ef	441,90	482,76	557,76	511,80	511,20	527,31	460,24	460,19	451,78	**	-12,21	**	-	-	0,85	4,96
228-3 x L 22	Ef.	503,54	418,13	555,10	499,87	586,43	503,57	504,86	516,25	468,82	**	49,80	*	-	-	0,83	6,89
L3 x L53	Inef.	441,90	390,35	491,09	425,46	500,58	446,37	416,71	419,79	408,64	**	18,36	*	-	-	0,67	8,96
L36 x Cateto	Inef.	482,76	315,10	499,84	411,64	529,20	430,16	491,38	371,65	403,04	**	83,98	**	-	-	0,91	9,03
Cateto x L53	Inef.	315,10	390,35	397,30	381,69	395,65	402,07	365,04	423,89	370,68	**	-34,81	*	-	-	0,74	5,40

DADOS DOS 5 AMBIENTES AVALIADOS																	
Cruzamentos	Tipo	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²
L3 x L22	Ef	443,76	383,04	611,98	541,19	569,27	497,61	-	-	417,80	**	34,89	*	-	-	0,95	9,65*
L3 x Cateto	Ef	443,76	312,14	585,23	468,52	525,72	430,00	521,22	392,71	381,59	**	71,46	**	-	-	0,96	10,00
L3 x L36	Ef	443,76	441,48	559,43	510,13	525,28	537,82	501,27	485,26	442,92	**	1,21	**	-	-	0,95	2,63
228-3 x L22	Ef.	474,03	383,04	547,50	530,05	584,83	502,44	531,19	508,75	430,68	**	44,61	**	-	-	0,90	12,07*
L3 x L53	Inef.	443,76	391,80	584,68	506,93	551,84	491,91	516,31	465,96	420,89	**	29,70	*	-	-	0,96	11,13*
L36 x Cateto	Inef.	441,48	312,14	527,22	444,37	531,52	433,27	494,39	370,39	382,46	**	70,39	**	-	-	0,94	13,22*
Cateto x L53	Inef.	312,14	391,80	456,80	383,78	399,08	425,95	371,48	436,41	356,23	**	-39,10	**	-	-	0,88	7,99

^a P₁ – progenitor 1; P₂ – progenitor 2; F₁ – híbrido do cruzamento dos dois progenitores; F₂ – geração obtida da autofecundação do respectivo F₁; RC₁-P₁ – primeiro retrocruzamento para progenitor 1; RC₁-P₂ – primeiro retrocruzamento para progenitor 2; RC₂-P₁ – segundo retrocruzamento para progenitor 1; RC₂-P₂ – segundo retrocruzamento para progenitor 2;
^b m – efeito médio; a – efeitos aditivos; d – efeitos dominantes; aa, ad e dd – efeitos epistáticos digênicos; ^c cruzamentos foram classificados com base em sua produção de grãos sob baixo e alto P no solo em eficientes ao P (Ef.) e ineficientes ao P (Inef.); **, * Significativo a 1% e 5% de probabilidade respectivamente pelo teste de F.

Tabela 29 – Médias de estimativas de efeitos gênicos^a, (em módulo) para os sete cruzamentos e para os quatro cruzamentos eficientes e os três cruzamentos ineficientes ao P sob baixo e alto P no solo, para os diferentes caracteres^b

	Médias dos sete cruzamentos						Médias dos cruz. eficientes ao P				Médias dos cruz. ineficientes ao P			
	m	a	d	epist.	d/a	d/epist	m	a	d	d/a	m	a	d	d/a
PG (kg ha⁻¹)														
Baixo P (BP)	1.342	456	2.924	2.981	6,41	0,98	1.515	612	3.198	5,23	1.111	249	2.559	10,28
Alto P (AP)	2.351	578	5.982	3.321	10,34	1,80	2.428	624	6.762	10,84	2.247	518	4.942	9,55
BP/AP	0,57	0,79	0,48	0,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ASI (dias)														
Baixo P	4,69	2,29	2,03	-	0,88	-	3,73	2,96	1,56	0,52	5,96	1,41	2,66	1,88
Alto P	1,61	1,88	1,28	-	0,68	-	1,02	2,42	0,84	0,35	2,40	1,15	1,88	1,64
BP/AP	2,91	1,22	1,58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TPG (g kg⁻¹)														
Baixo P	3,02	0,34	1,73	1,25	5,09	1,38	2,90	0,32	1,62	5,06	3,17	0,36	1,87	5,19
Alto P	2,85	0,29	0,56	-	1,93	-	2,75	0,26	0,66	2,54	2,99	0,34	0,43	1,26
BP/AP	1,06	1,17	3,09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FTOT (kg kg⁻¹)														
Baixo P	6,28	0,96	3,81	6,72	3,97	0,57	6,22	1,03	4,61	4,48	6,36	0,86	2,74	3,19
Alto P	10,99	1,14	11,96	-	10,50	-	11,45	1,10	10,02	9,10	10,37	1,19	14,54	12,21
BP/AP	0,57	0,84	0,32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EFABS (kg kg⁻¹ x 10²)														
Baixo P	28,16	4,31	15,83	29,65	3,67	0,53	27,54	4,75	18,72	3,94	28,98	3,73	11,98	3,21
Alto P	13,39	1,39	14,46	-	10,40	-	13,96	1,35	12,10	8,96	12,62	1,44	17,61	12,23
BP/AP	2,10	3,10	1,09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EFUTIL (kg kg⁻¹)														
Baixo P	161,66	65,58	405,28	166,98	6,18	2,43	172,92	87,11	428,34	4,92	146,64	36,87	374,53	10,16
Alto P	202,75	39,31	145,90	-	3,71	-	209,17	48,70	171,57	3,52	194,18	26,78	111,68	4,17
BP/AP	0,80	1,67	2,78	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EFUSO (kg kg⁻¹)														
Baixo P	54,77	19,24	105,86	125,38	5,50	0,84	61,91	26,14	109,68	4,20	45,25	10,05	100,78	10,03
Alto P	24,79	6,23	64,05	35,66	10,28	1,79	25,57	6,72	72,07	10,72	23,74	5,58	53,36	9,56
BP/AP	2,21	3,07	1,65	3,52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ICP (kg kg⁻¹ x 10²)														
Baixo P	44,84	12,40	71,97	36,54	5,80	1,97	46,39	18,06	70,40	3,90	42,78	4,86	74,07	15,25
Alto P	55,72	6,74	33,37	26,09	4,95	1,28	54,22	9,66	44,44	4,60	57,72	2,84	18,60	6,55
BP/AP	0,80	1,84	2,15	1,40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
QUTIL (kg kg⁻¹)														
Baixo P	395,28	43,44	256,85	243,11	5,91	1,05	406,86	44,52	305,72	6,87	379,85	42,01	191,69	4,56
Alto P	414,58	41,15	107,16	-	2,60	-	429,93	37,73	133,82	3,55	394,12	45,72	71,61	1,57
BP/AP	0,95	1,05	2,39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

^a m – efeito médio; a – efeitos aditivos; d – efeitos dominantes; epist – média dos efeitos epistáticos digênicos; ^bPG - produção de grãos ; ASI - diferença de florescimento masculino e feminino; TPG - teor de P nos grãos; FTOT - quantidade de fósforo total na parte aérea; EFABS - eficiência de absorção de P; EFUTIL - eficiência de utilização de P; EFUSO – eficiência de uso de P; ICP - índice de colheita de P; QUTIL - quociente de utilização de P (QUTIL).

Tabela 30 – Médias de cada geração^a, estimativas de efeitos gênicos^b, coeficientes de determinação do modelo (R²) e valores de qui-quadrado (χ²), para diferença de peso de grãos entre níveis alto e baixo de P no solo-DIFPG (kg) para 7 cruzamentos F₁ (obtidos de 6 linhagens de milho com diferentes níveis de eficiência ao P) e suas gerações segregantes

Cruzamentos	Tipo ^c	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²		
L3 x L22	Ef	1.083	1.261	4.679	2.764	3.640	3.568	-	-	1.191	**	-75	3.887	**	-	-	-	0,93	0,53
L3 x Cateto	Ef.	1.083	774	2.496	2.198	2.044	2.164	2.235	1.656	1.043	**	178	2.222	**	-	-	-	0,75	0,42
L3 x L36	Ef	1.083	1.995	3.607	2.792	2.690	3.399	2.954	2.776	1.690	**	-367	2.594	**	-	-	-	0,74	0,95
228-3 x L 22	Ef.	1.043	1.261	2.496	2.724	2.916	3.527	2.774	1.750	1.289	**	4	3.029	*	-	-	-	0,41	1,57
L3 x L53	Inef.	1.083	1.216	6.284	3.751	3.144	4.131	2.350	3.016	1.197	**	-203	5.110	**	-	-	-	0,97	0,42
L36 x Cateto	Inef.	1.995	774	5.012	2.738	2.324	1.995	2.168	1.288	1.284	**	586	* 2.526	**	-	-	-	0,86	0,63
Cateto x L53	Inef.	774	1.216	4.219	2.365	1.967	3.123	1.519	1.671	957	**	-265	2.998	**	-	-	-	0,94	0,36

^aP₁ – progenitor 1; P₂ – progenitor 2; F₁ – híbrido do cruzamento dos dois progenitores; F₂ – geração obtida da autofecundação do respectivo F₁; RC₁-P₁ – primeiro retrocruzamento para progenitor 1; RC₁-P₂ – primeiro retrocruzamento para progenitor 2; RC₂-P₁ – segundo retrocruzamento para progenitor 1; RC₂-P₂ – segundo retrocruzamento para progenitor 2.
^bm – efeito médio; a – efeitos aditivos; d – efeitos dominantes; aa, ad e dd – efeitos epistáticos digênicos; ^ccruzamentos foram classificados com base em sua produção de grãos sob baixo e alto P no solo em eficientes ao P (Ef.) e ineficientes ao P (Inef.); ** , * Significativo a 1% e 5% de probabilidade respectivamente pelo teste de F.

Tabela 31 – Médias de cada geração^a, estimativas de efeitos gênicos^b, coeficientes de determinação do modelo (R²) e valores de qui-quadrado (χ²), para relação de peso de grãos entre níveis baixo e alto de P no solo-RELPG (kgkg⁻¹), para 7 cruzamentos F₁ (obtidos de 6 linhagens de milho com diferentes níveis de eficiência ao P) e suas gerações segregantes

Cruzamentos	Tipo ^c	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ ²	
L3 x L22	Ef	66,67	83,67	56,00	52,33	47,67	39,00	-	-	58,97	**	-0,59	-12,93	-	-	-	0,40	1,19
L3 x Cateto	Ef.	66,67	52,33	67,00	57,33	79,33	47,67	61,67	42,33	50,89	**	14,95	* 15,75	-	-	-	0,61	0,73
L3 x L36	Ef	66,67	33,33	59,00	57,33	59,67	47,33	50,67	35,00	42,75	**	12,03	* 20,59	-	-	-	0,76	0,52
228-3 x L 22	Ef.	86,33	83,67	66,33	51,00	50,33	39,00	43,67	57,33	58,46	**	5,90	8,45	-	-	-	0,40	2,20
L3 x L53	Inef.	66,67	42,67	35,00	40,67	53,67	28,67	55,67	30,00	48,03	**	17,44	** -14,35	-	-	-	0,87	0,19
L36 x Cateto	Inef.	33,33	52,33	45,67	45,00	51,33	51,67	45,67	56,00	49,55	**	-6,30	-3,50	-	-	-	0,50	0,29
Cateto x L53	Inef.	52,33	42,67	44,33	50,33	53,00	39,00	49,33	50,33	50,78	**	2,89	-4,89	-	-	-	0,40	0,29

^aP₁ – progenitor 1; P₂ – progenitor 2; F₁ – híbrido do cruzamento dos dois progenitores; F₂ – geração obtida da autofecundação do respectivo F₁; RC₁-P₁ – primeiro retrocruzamento para progenitor 1; RC₁-P₂ – primeiro retrocruzamento para progenitor 2; RC₂-P₁ – segundo retrocruzamento para progenitor 1; RC₂-P₂ – segundo retrocruzamento para progenitor 2.
^bm – efeito médio; a – efeitos aditivos; d – efeitos dominantes; aa, ad e dd – efeitos epistáticos digênicos; ^ccruzamentos foram classificados com base em sua produção de grãos sob baixo e alto P no solo em eficientes ao P (Ef.) e ineficientes ao P (Inef.); ** , * Significativo a 1% e 5% de probabilidade respectivamente pelo teste de F.

Tabela 32 – Médias de cada geração^a, estimativas de efeitos gênicos^b, coeficientes de determinação do modelo (R²) e valores de qui-quadrado (χ^2), para eficiência de recuperação aparente de P-EFREC (kgkg⁻¹) para 7 cruzamentos F₁ (obtidos de 6 linhagens de milho com diferentes níveis de eficiência ao P) e suas gerações segregantes

Cruzamentos	Tipo ^c	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ^2			
L3 x L22	Ef	9,20	6,30	23,40	18,73	21,23	20,33	-	-	7,95	**	1,42	21,92	**	-	-	0,87	0,23		
L3 x Cateto	Ef.	9,20	11,97	12,30	13,10	8,73	15,63	14,57	14,40	10,65	**	-1,72	3,35	-	-	-	0,48	0,21		
L3 x L36	Ef	9,20	10,77	15,00	14,77	14,70	15,50	16,00	15,93	10,36	**	-0,50	24,24	*	-	-23,45	*	0,57	0,32	
228-3 x L 22	Ef.	5,40	6,30	11,27	17,10	13,13	16,53	15,77	10,70	5,93	**	0,75	36,41	**	-	-	-31,86	*	0,82	0,75
L3 x L53	Inef.	9,20	8,30	35,50	25,50	25,50	25,13	17,10	17,37	8,67	**	0,23	37,72	**	-	-	-10,03	*	0,99	0,03
L36 x Cateto	Inef.	10,77	11,97	27,73	16,70	12,37	11,90	14,90	12,97	11,36	**	0,08	8,71	-	-	-	0,68	0,70		
Cateto x L53	Inef.	11,97	8,30	32,80	16,00	13,87	20,47	10,43	9,83	8,78	**	1,03	13,90	*	-	-	0,80	1,57		

^a P₁ – progenitor 1; P₂ – progenitor 2; F₁ – híbrido do cruzamento dos dois progenitores; F₂ – geração obtida da autofecundação do respectivo F₁; RC₁-P₁ – primeiro retrocruzamento para progenitor 1; RC₁-P₂ – primeiro retrocruzamento para progenitor 2; RC₂-P₁ – segundo retrocruzamento para progenitor 1; RC₂-P₂ – segundo retrocruzamento para progenitor 2.
^b m – efeito médio; a – efeitos aditivos; d – efeitos dominantes; aa, ad e dd – efeitos epistáticos digênicos; ^c cruzamentos foram classificados com base em sua produção de grãos sob baixo e alto P no solo em eficientes ao P (Ef.) e ineficientes ao P (Inef.); **, * Significativo a 1% e 5% de probabilidade respectivamente pelo teste de F.

Tabela 33 – Médias de cada geração^a, estimativas de efeitos gênicos^b, coeficientes de determinação do modelo (R²) e valores de qui-quadrado (χ^2), para eficiência fisiológica de P-EFIS (kgkg⁻¹) para 7 cruzamentos F₁ (obtidos de 6 linhagens de milho com diferentes níveis de eficiência ao P) e suas gerações segregantes

Cruzamentos	Tipo ^c	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ^2		
L3 x L22	Ef	195,10	260,04	321,94	261,55	291,70	323,10	-	-	227,55	**	-32,12	94,37	-	-	-	0,84	0,29	
L3 x Cateto	Ef.	195,10	107,09	322,83	280,10	272,42	234,83	255,72	198,05	181,54	**	40,14	**	168,10	**	-	-	0,93	0,29
L3 x L36	Ef	195,10	346,87	416,19	324,33	314,58	385,80	306,81	301,89	265,67	**	-35,03	139,75	*	-	-	0,80	0,57	
228-3 x L 22	Ef.	287,25	260,04	353,27	276,08	370,80	414,56	294,10	331,72	284,15	**	-15,34	60,92	-	-	-	0,49	2,10	
L3 x L53	Inef.	195,10	246,19	301,76	247,72	228,20	276,79	226,73	291,18	227,87	**	-38,13	* 57,99	*	-	-	0,84	0,17	
L36 x Cateto	Inef.	346,87	107,09	314,73	272,65	360,33	279,94	250,50	172,43	209,06	**	79,09	* 129,30	-	-	-	0,79	1,01	
Cateto x L53	Inef.	107,09	246,19	218,63	246,84	256,47	253,10	245,38	305,78	245,35	**	-42,82	2,70	-	-	-	0,41	0,97	

^a P₁ – progenitor 1; P₂ – progenitor 2; F₁ – híbrido do cruzamento dos dois progenitores; F₂ – geração obtida da autofecundação do respectivo F₁; RC₁-P₁ – primeiro retrocruzamento para progenitor 1; RC₁-P₂ – primeiro retrocruzamento para progenitor 2; RC₂-P₁ – segundo retrocruzamento para progenitor 1; RC₂-P₂ – segundo retrocruzamento para progenitor 2.
^b m – efeito médio; a – efeitos aditivos; d – efeitos dominantes; aa, ad e dd – efeitos epistáticos digênicos; ^c cruzamentos foram classificados com base em sua produção de grãos sob baixo e alto P no solo em eficientes ao P (Ef.) e ineficientes ao P (Inef.); **, * Significativo a 1% e 5% de probabilidade respectivamente pelo teste de F.

Tabela 34 – Médias de cada geração^a, estimativas de efeitos gênicos^b, coeficientes de determinação do modelo (R²) e valores de qui-quadrado (χ^2), para eficiência agrônômica de P-EFAGR (kgkg⁻¹) para 7 cruzamentos F₁ (obtidos de 6 linhagens de milho com diferentes níveis de eficiência ao P) e suas gerações segregantes

Cruzamentos	Tipo ^c	P1	P2	F1	F2	RC1-P1	RC1-P2	RC2-P1	RC2-P2	m	a	d	aa	ad	dd	R ²	χ^2		
L3 x L22	Ef	18,25	23,48	79,73	46,44	61,64	60,10	-	-	21,11	**	-2,26	63,69	**	-	-	-	0,93	0,54
L3 x Cateto	Ef.	18,25	12,99	40,69	36,79	34,22	35,99	37,39	27,65	17,56	**	3,04	36,70	**	-	-	-	0,73	0,42
L3 x L36	Ef	18,25	32,99	59,62	46,89	45,32	56,54	50,01	46,31	28,22	**	-5,81	43,56	**	-	-	-	0,72	0,98
228-3 x L 22	Ef.	39,66	23,48	42,44	46,12	49,33	60,06	46,74	29,72	32,21	**	7,39	30,30	*	-	-	-	0,38	0,98
L3 x L53	Inef.	18,25	20,41	104,81	62,96	52,75	69,07	39,57	50,33	20,14	**	-3,28	85,44	**	-	-	-	0,97	0,41
L36 x Cateto	Inef.	32,99	12,99	84,14	45,78	38,75	33,51	36,31	21,70	21,35	**	9,62	42,65	**	-	-	-	0,87	0,61
Cateto x L53	Inef.	12,99	20,41	71,34	40,05	33,18	52,76	25,42	28,31	16,07	**	-4,49	50,87	**	-	-	-	0,94	0,36

^a P₁ – progenitor 1; P₂ – progenitor 2; F₁ – híbrido do cruzamento dos dois progenitores; F₂ – geração obtida da autofecundação do respectivo F₁; RC₁-P₁ – primeiro retrocruzamento para progenitor 1; RC₁-P₂ – primeiro retrocruzamento para progenitor 2; RC₂-P₁ – segundo retrocruzamento para progenitor 1; RC₂-P₂ – segundo retrocruzamento para progenitor 2.

^b m – efeito médio; a – efeitos aditivos; d – efeitos dominantes; aa, ad e dd – efeitos epistáticos digênicos.

^c cruzamentos foram classificados com base em sua produção de grãos sob baixo e alto P no solo em eficientes ao P (Ef.) e ineficientes ao P (Inef.).

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

Tabela 35- Matriz de correlação entre diversos caracteres^a de eficiência e resposta ao P, avaliados nos ambientes sob baixo P no solo^b. Na diagonal está a correlação da média de cada caráter no grupo de ambientes sob baixo P, com a média do mesmo caráter no grupo de ambientes sob alto P no solo

Variáveis	ASI	TPG	PG	EFABS	EFUTIL	EFUSO	ICP	QUTIL	DIFPG	RELPG	EFREC	EFIS	EFAGR
ASI	0,59**	0,20	-0,60**	-0,51**	-0,52**	-0,62**	-0,53**	-0,16	0,11	-0,52**	0,12	-0,06	0,09
TPG		0,73**	-0,11	0,02	-0,82**	-0,45**	0,31**	-0,97**	-0,01	-0,08	0,11	-0,04	-0,06
PG			0,79**	0,83**	0,47**	0,87**	0,58**	0,07	-0,04	0,69**	-0,06	0,15	-0,01
EFABS				0,26	0,20	0,81**	0,30**	-0,02	-0,38**	0,84**	-0,41**	0,22**	-0,37**
EFUTIL					0,84**	0,70**	0,24*	0,80**	0,11	0,27*	0,05	-0,04	0,07
EFUSO						0,79**	0,32	0,44**	-0,20	0,74**	-0,25*	0,09	-0,21
ICP							0,64**	-0,37**	0,27	0,23*	0,37**	-0,09	0,33**
QUTIL								0,77**	-0,04	0,10	-0,16	0,02	-0,12
DIFPG									- ^c	-0,71**	0,86**	0,09	0,99**
RELPG										-	-0,63**	0,04	-0,69**
EFREC											-	-0,35	0,87**
EFIS												-	0,08
EFAGR													-

^a ASI - diferença de florescimento masculino e feminino; TPG - teor de P nos grãos; PG - peso de grãos; EFABS - eficiência de absorção de P; EFUTIL - eficiência de utilização de P; EFUSO - eficiência de uso de P; ICP - índice de colheita de P; QUTIL - quociente de utilização de P; DIFPG - diferença de peso de grãos sob alto e baixo P; RELPG - relação entre peso de grãos sob baixo e alto P; EFREC - eficiência recuperação aparente de P; EFIS - eficiência fisiológica; EFAGR - eficiência agrônômica de P.

^b Para cada caráter foram utilizadas 28 observações por ambiente (7 F₁'s, 7 F₂'s, 7RC₁P₁, 7RC₁P₂) e três ambientes sob baixo P no solo (total de 84 observações por caráter).

^c Para caracteres de resposta ao P (DIFPG, RELPG, EFREC, EFIS e EFAGR), obtidos por diferença entre ambientes, não pôde ser obtida a correlação entre ambientes sob baixo e alto P.

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

Tabela 36- Matriz de correlação entre diversos caracteres^a de eficiência e resposta ao P, avaliados nos ambientes sob alto P no solo^b.

Variáveis	TPG	PG	EFABS	EFUTIL	EFUSO	ICP	QUTIL	DIFPG	RELPG	EFREC	EFIS	EFAGR
ASI	0,52**	-0,28*	-0,04	-0,45**	-0,30	0,18	-0,51**	-0,05	0,02	0,07	-0,05	0,02
TPG		0,05	0,52**	-0,77**	0,03	0,52**	-0,97**	-0,17	-0,23	0,42**	-0,14	0,29*
PG			0,82**	0,39**	0,99**	0,63**	-0,07	0,54**	-0,10	0,52**	0,12	0,58**
EFABS				-0,18	0,81**	0,59**	-0,52**	0,52**	-0,24	0,66**	-0,08	0,59**
EFUTIL					0,40**	0,11	0,77**	0,11	0,25	-0,19	0,38**	0,05
EFUSO						0,61**	-0,05	0,57**	-0,12	0,54**	0,12	0,60**
ICP							-0,53**	0,38**	-0,04	0,43**	0,21	0,50**
QUTIL								-0,18	0,28*	-0,46**	0,19	-0,30*
DIFPG									-0,74**	0,86**	0,28	0,98**
RELPG										-0,68**	-0,16	-0,71**
EFREC											-0,14	0,90**
EFIS												0,26*

^a ASI - diferença de florescimento masculino e feminino; TPG - teor de P nos grãos; PG - peso de grãos; EFABS - eficiência de absorção de P; EFUTIL - eficiência de utilização de P; EFUSO - eficiência de uso de P; ICP - índice de colheita de P; QUTIL - quociente de utilização de P; DIFPG - diferença de peso de grãos sob alto e baixo P; RELPG - relação entre peso de grãos sob baixo e alto P; EFREC - eficiência recuperação aparente de P; EFIS - eficiência fisiológica; EFAGR - eficiência agrônômica de P.

^b Para cada caráter foram utilizadas 28 observações por ambiente (7 F₁'s, 7 F₂'s, 7RC₁P₁, 7RC₁P₂) e dois ambientes sob alto P no solo (total de 56 observações por caráter).

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

Tabela 37 - Contribuição da soma de quadrados (SQ)^a de eficiência de absorção-EFABS (x_1) e de eficiência de utilização-EFUTIL (x_2) para a soma de quadrados de eficiência de uso de P-EFUSO (y), nos ambientes sob baixo e alto P

Nível de P no solo / Característica avaliada	Fração da SQ ($\Sigma (x_i y) / \Sigma y^2$)	$r_{x_i y}$	(S_{x_i} / S_y)
TRÊS AMBIENTES SOB BAIXO P			
Eficiência de absorção de P (x_1)	1,742 (64,5%) ^b	0,862	0,748
Eficiência de utilização de P (x_2)	0,957 (35,5%)	0,683	0,519
DOIS AMBIENTES SOB ALTO P			
Eficiência de absorção de P (x_1)	0,658 (74,0%)	0,813	0,910
Eficiência de utilização de P (x_2)	0,231 (26,0%)	0,441	0,591

^a Esta contribuição é determinada pela relação $\Sigma (x_i y) / \Sigma y^2$, onde $i=1$ para EFABS e $i=2$ EFUTIL. Cada uma destas frações é função do produto do coeficiente de correlação entre x_i e y , ($r_{x_i y}$), multiplicado pela relação entre desvios padrões de x_i e y (S_{x_i} / S_y); ^b Entre parêntesis está a porcentagem da soma de quadrados da EFUSO devida à EFABS e EFUTIL respectivamente.

TABELA 38 - Contribuição da soma de quadrados^a de índice de colheita de P- ICP (x_1) e do quociente de utilização de P-QUTIL (x_2) para a soma de quadrados de eficiência de utilização de P-EFUTIL (y), nos ambientes sob baixo e alto P

Nível de P no solo / Característica avaliada	Fração da SQ ($\Sigma (x_i y) / \Sigma y^2$)	$r_{x_i y}$	(S_{x_i} / S_y)
TRÊS AMBIENTES SOB BAIXO P			
Índice de colheita de P (x_1)	0,137 (19,2%) ^b	0,296	0,650
Quociente de utilização de P (x_2)	0,577 (80,8%)	0,793	1,019
DOIS AMBIENTES SOB ALTO P			
Índice de colheita de P (x_1)	0,025 (7,5%)	0,103	0,728
Quociente de utilização de P (x_2)	0,305 (92,5%)	0,788	1,175

^a Esta contribuição é determinada pela relação $\Sigma (x_i y) / \Sigma y^2$, onde $i=1$ para ICP e $i=2$ para QUTIL. Cada uma destas frações é função do produto do coeficiente de correlação entre x_i e y , ($r_{x_i y}$), multiplicado pela relação entre desvios padrões de x_i e y (S_{x_i} / S_y).

^b Entre parêntesis está a porcentagem da soma de quadrados da EFUTIL devida ao ICP e ao QUTIL.

Tabela 39 - Contribuição da soma de quadrados (SQ)^a de eficiência de recuperação aparente de P-EFREC (x_1) e de eficiência fisiológica-EFIS (x_2) para a soma de quadrados de eficiência agrônômica-EFAGR de P (y), nos ambientes sob alto e baixo P

Nível de P no solo / Característica avaliada	Fração da SQ ($\Sigma (x_i y) / \Sigma y^2$)	$r_{x_i y}$	(S_{x_i} / S_y)
TRÊS AMBIENTES SOB BAIXO P			
Eficiência de Recuperação Aparente de P (x_1)	3,149 (92,5%) ^b	0,865	1,070
Eficiência Fisiológica (x_2)	0,254 (7,5%)	0,137	0,543
DOIS AMBIENTES SOB ALTO P			
Eficiência de Recuperação Aparente de P (x_1)	1,275 (83,5%)	0,878	0,951
Eficiência Fisiológica (x_2)	0,251 (16,5%)	0,340	0,484

^a Esta contribuição é determinada pela relação $\Sigma (x_i y) / \Sigma y^2$, onde $i=1$ para EFREC e $i=2$ para EFIS. Cada uma destas frações é função do produto do coeficiente de correlação entre x_i e y , ($r_{x_i y}$), multiplicado pela relação entre desvios padrões de x_i e y (S_{x_i} / S_y).; ^b Entre parêntesis está a percentagem da soma de quadrados de EFAGR, devida à EFREC e à EFIS.