

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FENOTIPAGEM PARA A EFICIÊNCIA DE FÓSFORO EM  
LINHAGENS DE SORGO**

**Lidianne Assis Silva  
Engenheira Agrônoma**

**JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL  
Junho de 2012**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FENOTIPAGEM PARA A EFICIÊNCIA DE FÓSFORO EM  
LINHAGENS DE SORGO**

Lidianne Assis Silva

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Moro

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas).

JABOTICABAL – SÃO PAULO - BRASIL

Junho de 2012

Silva, Lidianne Assis  
S586f      Fenotipagem para a eficiência de fósforo em linhagens de sorgo. /  
Lidianne Assis Silva. -- Jaboticabal, 2012  
vi, 83 f.: il.; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2012

Orientador: José Roberto Moro

Banca examinadora: Robert Eugene Schaffert, Cícero Beserra de  
Menezes, Dilermando Perecin, Rinaldo César de Paula

Bibliografia

1. Sorgo-eficiência. 2. Sorgo-fósforo. I. Título. II. Jaboticabal-  
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 633.17

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da  
Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de  
Jaboticabal.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
CAMPUS DE JABOTICABAL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** FENOTIPAGEM PARA A EFICIÊNCIA DE FÓSFORO EM LINHAGENS DE SORGO

**AUTORA:** LIDIANNE ASSIS SILVA

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. JOSE ROBERTO MORO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA (GENÉTICA E MELHORAMENTO DE PLANTAS), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOSE ROBERTO MORO  
Departamento de Biologia Aplicada / Agropecuária / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Prof. Dr. CICERO BESERRA DE MENEZES  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária / Sete Lagoas/MG

Prof. Dr. ROBERT EUGENE SCHAFFERT  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária / Sete Lagoas/MG

Prof. Dr. DILERMANDO PERECIN  
Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Prof. Dr. RINALDO CÉSAR DE PAULA  
Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Data da realização: 05 de junho de 2012.

## **DADOS CURRICULARES DA AUTORA**

**LIDIANNE ASSIS SILVA** - nascida em Itumbiara/GO, em vinte e três de janeiro de mil novecentos e oitenta e quatro, filha de Lindomar Prateado Silva e Sebastiana Maria de Assis. Em março de 2002, iniciou o curso de Agronomia da Universidade Luterana do Brasil – Instituto de Ensino Superior de Itumbiara – GO, ILES/ULBRA, completando-o em julho de 2006, quando obteve o título de Engenheira Agrônoma. Em agosto de 2006, iniciou o Mestrado no Programa de Genética e Melhoramento de Plantas da Universidade Federal de Lavras, adquirindo o título de Mestre em julho de 2008. Em março de 2009, ingressou no Doutorado em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas), da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal.

À minha querida mãe **Sebastiana** e aos meus mestres

**Robert Eugene Schaffert e José Roberto Moro,**

com muito amor e carinho, ***DEDICO.***

*Todas as vezes que eu senti a desesperança, o medo e o temor lembrava-me que, lá no final, bem no final do túnel, existia um sonho, e esse sonho era muito maior que o meu: era o sonho de **DEUS pra mim!** E foi nesse sonho que eu acreditei. Obrigado, Senhor, por sonhar pra mim e me fazer acreditar que posso tudo naquele que me fortalece e que ninguém no mundo pode me fazer desistir, mesmo quando a visão se turvava e o coração só chorava, mas na alma, sempre a certeza da vitória, eu ia sofrendo, mas continuava seguindo meu caminho enquanto tantos não entendiam a minha história e ia profetizando e continuarei a profetizar que eu POSSO TUDO EM JESUS!*

## **AGRADECIMENTOS**

Á Deus, por ter me concedido o que há de mais belo neste mundo, a vida.

À Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal – SP, pela oportunidade da realização do curso de Doutorado.

À minha mãe, pela sua intensa dedicação, mesmo fisicamente estando longe de mim. Sem você, a sua fé, o seu amor incondicional e, principalmente, pela sua compreensão com a minha ausência, minha querida mãezinha, eu jamais conseguiria, como eu te amo.

Ao meu companheiro, Fábio, pelo seu carinho, amor, paciência, incentivo e, principalmente, pela sua cumplicidade.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudos.

À Embrapa Milho e Sorgo, especialmente ao pesquisador Dr. Robert Eugene Schaffert, pelo incentivo, ensinamentos, disponibilidade, amizade e paciência nas horas mais difíceis, sempre me apoiando. Não tenho palavras pra agradecer, o que o senhor fez por mim, e muito menos para demonstrar o respeito, o carinho e a minha admiração pela sua pessoa.

Ao professor Dr. José Roberto Moro, orientador, pelos ensinamentos, sugestões e disponibilidade para me atender quando as dúvidas surgiram sempre me trazendo tranquilidade. Obrigada pela sua paciência e calma.

Aos membros da banca, professor Dr. Rinaldo César de Paula, Dr. Cícero Beserra de Menezes e Dr. Dilermando Perecin, muito obrigada pelas contribuições de todos vocês.

À Dr<sup>a</sup>. Flávia Ferreira Mendes e ao professor Dr. Vanderley Borges pelas importantes contribuições dadas, durante a execução deste trabalho, além da disponibilidade em me socorrer nas análises estatísticas. Agradeço principalmente, pela amizade construída.

Ao professor Dr. Walter Vieira da Cunha (ULBRA), por abrir as portas para essa longa jornada e, principalmente, pelo incentivo.

Aos pesquisadores Dr. Jurandir Vieira Magalhães e Dr. João Herbert Viana, pelas suas sugestões e contribuições.

Aos amigos Daniela, Giselle, Flávia, Gisele Batista, Pâmella, Cristianna, Flávia, Nei, Edney, Letícia e Camila, pela amizade construída.

Aos colegas “moretes” Cláudia, Elizandra, Maria Natália e Flávio pela amizade e alegria de viver, meu carinho todo especial.

À equipe da Embrapa Milho e Sorgo, Geraldo Magela, Davidson, Vander, Geraldo Júnior, Ráisa, José Avelino, Karla, Fernando, Edmar, Eidinilson, Alex, Geraldo (cabeção), Marcos André, Geraldo Maria, Sebastião, Adilson, Leandro, Tarcísio, Célio, Heraldo, Karine, Heliete, Rosane, Patrick, Lauro, Sedimar, Aydano, Marquinhos, Rosângela, Conceição, Vânia, Antônio Claudio, Antônio Carlos e Gislene pela imensa colaboração neste trabalho. Sem a contribuição de todos vocês, eu com certeza, não conseguiria. Vocês foram peças chaves, principalmente, depois que fui trabalhar.

A Generation Challenge Program, pelo apoio financeiro na execução do trabalho.

A Universidade Federal do Acre, em especial ao Diretor do Centro Multidisciplinar – CMULTI Campus Floresta, prof. Dr. Josimar Ferreira Batista, pelo apoio e incentivo. Obrigada também a todos os funcionários, professores da UFAC e aos meus queridos alunos, o apoio e incentivo de vocês, foram importantíssimos nessa caminhada.

À querida família GOMES, Juarez, Marli, Fernanda, Flávio, Ana Flávia, Ana Luísa, Isabela e Eduardo, Vó Raimunda pelo carinho e amizade.

À família ASSIS, meus tios, tias, primos e primas, muito obrigada, pelo carinho e amor, sempre compreensivos com a minha distância.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste projeto, nas suas diversas fases.

**Meu sincero “Agradecimento”.**

## SUMÁRIO

|                                                                                       | Página    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| LISTA DE TABELAS .....                                                                | ii        |
| LISTA DE FIGURAS.....                                                                 | iv        |
| RESUMO.....                                                                           | v         |
| SUMMARY .....                                                                         | vi        |
| <b>1. Introdução .....</b>                                                            | <b>1</b>  |
| <b>2. Revisão de Literatura .....</b>                                                 | <b>3</b>  |
| 2.1. Sorgo .....                                                                      | 3         |
| 2.2. O macronutriente fósforo (P) .....                                               | 4         |
| 2.3. Fósforo (P) no solo e sua disponibilidade para as plantas.....                   | 6         |
| 2.4. Deficiências de fósforo (P) nas plantas e no solo .....                          | 8         |
| 2.5. Eficiência no uso de fósforo (P) .....                                           | 9         |
| 2.6. Controle genético para eficiência de uso de fósforo (P) .....                    | 15        |
| 2.7. Programa de melhoramento visando à eficiência e a aquisição de fósforo (P) ..... | 17        |
| 2.8. Análise de trilha .....                                                          | 19        |
| 2.9. Análise de componentes principais.....                                           | 22        |
| <b>3. Objetivo geral.....</b>                                                         | <b>25</b> |
| 3.1. Objetivos específicos .....                                                      | 25        |
| <b>4. Materiais e Métodos.....</b>                                                    | <b>25</b> |
| 4.1. Local.....                                                                       | 25        |
| 4.2. Delineamento experimental .....                                                  | 26        |
| 4.3. Características avaliadas.....                                                   | 29        |
| 4.3.1. Estimativas dos índices de eficiência ao fósforo.....                          | 30        |
| 4.4. Análises estatísticas .....                                                      | 31        |
| 4.4.1. Correlações fenotípicas, genotípicas e análise de trilha .....                 | 33        |
| 4.4.2. Índice de eficiência .....                                                     | 34        |
| <b>5. Resultados e discussão .....</b>                                                | <b>35</b> |
| 5.1. Caracterização dos ambientes de avaliação .....                                  | 35        |
| 5.2. Análise de variância.....                                                        | 35        |
| 5.3. Análises de variância para os índices de eficiência ao fósforo .....             | 44        |
| 5.4. Correlação fenotípica, genotípica e análise de trilha .....                      | 57        |
| 5.5. Análise de componentes principais.....                                           | 64        |
| <b>6. Conclusões .....</b>                                                            | <b>67</b> |
| <b>7. Referências .....</b>                                                           | <b>68</b> |

## LISTA DE TABELAS

Página

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1. Níveis de pH, Al, Ca, Mg, K e P no solo das áreas experimentais com e sem estresse de P, para as profundidades de 0 – 20 e 20 - 40 cm, e quantificação de P suprido pelo solo, P suprido via fertilizante e P total disponível no perfil do solo, Sete Lagoas – MG, 2010.....                                                                                                                                                                                               | 35 |
| Tabela 2. Resumo das análises de variâncias para as características florescimento (FLOR), altura de plantas (AP) e produtividade de grãos (PG). Sete Lagoas – MG, avaliadas em ambientes com estresse de P, 2011.....                                                                                                                                                                                                                                                                 | 36 |
| Tabela 3. Resumo das análises de variâncias para as características florescimento (FLOR), altura de plantas (AP) e produtividade de grãos (PG). Sete Lagoas – MG, avaliadas em ambientes sem estresse de P, 2011.....                                                                                                                                                                                                                                                                 | 37 |
| Tabela 4. Resumo das análises de variância conjunta para as características: florescimento (FLOR), altura de plantas (AP) e produtividade de grãos (PG), avaliadas em ambientes com e sem estresse de P. Sete Lagoas – MG, 2011. ....                                                                                                                                                                                                                                                 | 39 |
| Tabela 5. Resumo das análises de variância para as características: eficiência de uso de P ( $E_{USO}$ ); eficiência de aquisição ( $E_{AQ}$ ); eficiência de utilização interna de P ( $E_{UTIL}$ ); teor de fósforo nos grãos (TPG); quociente de utilização de P ( $Q_{UTIL}$ ) e; índice de colheita de P ( $I_{CP}$ ). Sete Lagoas - MG, ambiente com estresse de P, 2011.....                                                                                                   | 44 |
| Tabela 6. Importância relativa da eficiência de aquisição ( $E_{AQ}$ ) e eficiência de utilização interna de P ( $E_{UTIL}$ ) para a eficiência de uso ( $E_{USO}$ ). Sete Lagoas - MG, em ambiente com estresse de P, 2011.....                                                                                                                                                                                                                                                      | 46 |
| Tabela 7. Médias e classificação das linhagens de sorgo para as características produtividade de grãos (PG), classificação de linhagens quanto à eficiência de P (CL): eficiência de uso de P ( $E_{USO}$ ), eficiência de aquisição ( $E_{AQ}$ ), eficiência de utilização interna de P ( $E_{UTIL}$ ), teor de P no grão (TPG), quociente de utilização de P ( $Q_{UTIL}$ ), e índice de colheita de P ( $I_{CP}$ ) obtidas condições de estresse de P. Sete Lagoas – MG, 2011..... | 49 |
| Tabela 8. Produtividade de grãos (PG) em ambientes sem e com estresse de P e produtividade de grãos relativa (PGR) das linhagens mais produtivas e menos produtivas. Sete Lagoas – MG, 2011.....                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 55 |
| Tabela 9. Correlações fenotípicas e genotípicas entre as características florescimento (FLOR), altura de plantas (AP), produtividade de grãos (PG), teor de P nos grãos (TPG), teor de P nas folhas (P FOLHA), fósforo total na planta (PTOT), eficiência de aquisição ( $E_{AQ}$ ), eficiência de utilização interna de P ( $E_{UTIL}$ ), eficiência no uso de P ( $E_{USO}$ ), índice de colheita de P ( $I_{CP}$ ) e quociente de                                                  |    |

utilização de interna ( $Q_{UTIL}$ ) avaliadas em ambiente com e sem estresse de P. Sete Lagoas – MG, 2011.....58

Tabela 10. Estimativas dos efeitos diretos e indiretos das variáveis explicativas florescimento (FLOR), altura de plantas (AP), teor de P nos grãos (TPG), teor de P nas folhas (P FOLHA), teor de P total na planta (PTOT), índice de colheita de P ( $I_{CP}$ ), quociente de utilização interna ( $Q_{UTIL}$ ), sob as variáveis básicas, produtividade de grãos (PG), eficiência de aquisição ( $E_{AQ}$ ), eficiência de uso de P ( $E_{USO}$ ) e eficiência de utilização interna ( $E_{UTIL}$ ) em linhagens de sorgo avaliadas em ambiente com estresse de P obtidas pelo método regressão crista. Sete Lagoas – MG, 2011 .....62

TABELA 11. Componentes principais (CP) obtidos, autovalores, porcentagem da variância (%), porcentagem acumulada (%) e coeficientes de ponderação associados a florescimento (FLOR), altura de Plantas (AP), produtividade de grãos (PG), teor de P nos grãos (TPG), teor de P nas folhas (P FOLHA), teor de P total na planta (PTOT), eficiência de aquisição ( $E_{AQ}$ ), eficiência de utilização interna de P ( $E_{UTIL}$ ), eficiência de uso de P ( $E_{USO}$ ), índice de colheita de P ( $I_{CP}$ ) e quociente de utilização de P ( $Q_{UTIL}$ ) obtidos em ambiente com estresse de P. Sete Lagoas – MG, 2011.....66

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                        | Página |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Figura 1. Representação gráfica da eficiência e resposta ao nutriente pela metodologia de Fageria et al. (1993).....                                                                                                                                   | 14     |
| Figura 2. Resultados de P no solo na camada 0 - 20 cm.....                                                                                                                                                                                             | 27     |
| Figura 3. Resultados de P no solo na camada 20 - 40 cm.....                                                                                                                                                                                            | 28     |
| Figura 4. Gráficos de dispersão das características florescimento (dias) e altura de plantas (cm) em ambientes com e sem estresse de P, com os respectivos coeficientes de correlação ambiental (r) e **significativo ao nível 1% pelo teste de t..... | 44     |
| Figura 5. Gráfico de dispersão da característica produtividade de grãos ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) em ambiente com e sem estresse de P, com o respectivo coeficiente de correlação ambiental e <sup>NS</sup> não significativo.....                       | 46     |
| Figura 6. Representação gráfica da eficiência e resposta ao P: ER: eficiente e responsivo, NER: não eficiente e responsivo, NN: não eficiente e não responsivo e ENR: eficiente e não responsivo.....                                                  | 43     |

## FENOTIPAGEM PARA A EFICIÊNCIA DE FÓSFORO EM LINHAGENS DE SORGO

**RESUMO** – o trabalho objetivou identificar e classificar linhagens de sorgo, eficientes e ineficientes ao P avaliadas em ambientes com estresse e sem estresse de P, identificar a importância relativa da eficiência de aquisição e a eficiência de utilização em relação à eficiência de uso de P, obter as estimativas dos coeficientes de correlação genética e fenotípica, realizar análise de trilha e identificar os componentes principais. Avaliou-se 243 linhagens de sorgo e duas testemunhas adicionais divididas em três látices 9x9 com três repetições. Avaliaram-se as seguintes características nos ambientes com e sem estresse de P: florescimento, altura de plantas e produtividade de grãos. As características teor de fósforo nos grãos, eficiência de aquisição, eficiência de utilização interna de P, eficiência de uso de P, índice de colheita de P e quociente de utilização, foram avaliadas somente no ambiente com estresse de P. Foram identificadas e classificadas 107 linhagens eficientes ao P e 138 linhagens ineficientes avaliadas em ambientes com e sem estresse de P. Na importância relativa das eficiências o índice eficiência de aquisição foi o que melhor se relacionou com a eficiência uso de fósforo. De acordo com os resultados das correlações fenotípicas e genotípicas o índice de eficiência de uso de fósforo pode ser avaliado indiretamente, pela avaliação da produtividade de grãos em ambiente com estresse de P. Dentre as variáveis explicativas na análise de trilha, o teor de P total na planta foi a que melhor explicou os efeitos diretos nas variáveis básicas de eficiência de aquisição e uso de P. Foram identificados três componentes principais (PCA 1, 2 e 3), que juntos explicaram 81% da variação original dos dados.

**Palavras chaves:** *Sorghum bicolor* L. Moench, produtividade de grãos, ambiente com estresse de P.

## PHENOTYPING SORGHUM LINES FOR PHOSPHORUS EFFICIENCY

**SUMMARY** – this study aimed to identify and classify sorghum lines for P efficiency in environments with high and low P, to identify the relative importance of acquisition efficiency and utilization efficiency in relation to P use efficiency, to obtain the estimates of correlation coefficients and evaluate genetic and phenotypic path analyzes through the development of the direct and indirect effects of independent variables on the dependent variables, and identify the major components. Two hundred forty-three sorghum lines and two additional controls divided into three 9x9 lattices with three replications. Flowering, plant height and grain yield were evaluated in low and high P environments. Phosphorus content in the grain, P acquisition efficiency, P utilization efficiency of internal P, P use efficiency, harvest index and P utilization quotient were evaluated in the low P environment. One hundred and seven lines were identified and classified as P efficient and 138 lines as P inefficient. The relative efficiency of the P acquisition index was the most highly correlated with the efficiency of phosphorus use. These results suggest that the phenotypic correlation index of phosphorus use efficiency can be evaluated indirectly by the assessment of grain yield in P environments total P content in plant was the variable that best explained the direct effects, in the path analysis, of variables in the basic efficiency of acquisition and use. Three main components; 1, 2 and 3, together explained 81% of the variation of the original data

**Key words:** *Sorghum bicolor* L. Moench, grain yield, environment P stress.

## 1. INTRODUÇÃO

A população mundial vem crescendo e, relacionada a este crescimento, a necessidade de aumento na produção agrícola gira em torno de 70%, para atender à demanda crescente por alimentos, fibra e energia até 2050 (FAO, 2010). Nesse sentido, a cultura do sorgo no Brasil, desde a década de 1970, vem apresentando um avanço significativo (20% ao ano, a partir de 1995). Atualmente, a cultura tem apresentado uma expansão, principalmente, em plantios de sucessão a culturas de verão, com destaque para os estados de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais, onde se concentram aproximadamente 81% do sorgo granífero plantado no país. Dentre esses estados, Goiás se destaca como o maior produtor de sorgo do Brasil, produzindo cerca de um milhão de toneladas em uma área de 422.375 hectares (APPS, 2012a). Porém, observa-se que o cultivo de sorgo granífero é mais restringido a áreas do cerrado, áreas estas que apresentam baixa fertilidade, elevada acidez e baixos teores de fósforo.

O avanço da moderna agricultura no Cerrado e os seus sistemas de produção continuam ampliando as possibilidades para o desenvolvimento do sorgo. O sistema de plantio direto abre um amplo campo para a integração do sorgo ao sistema como excelente produtor de palhada de alta qualidade. A agroindústria de carnes se expande na região na busca de matérias primas de menor custo para alimentação de aves, suínos e bovinos. Para manter o mercado de rações abastecido com grãos de qualidade confiável e custo ajustado ao negócio, o sorgo já é reconhecido como o principal grão alternativo ao milho na chamada cesta básica de ingredientes forrageiros. Uma parte da demanda de grãos, estimada entre 10% e 20% da produção de milho, pode ser atendida, com maior economicidade, com o sorgo (APPS, 2012a).

Baseando-se nos dados de crescimento da população mundial e, conseqüentemente, no aumento da produção agrícola, novas áreas de plantio deverão ser incorporadas ao setor agrícola nos próximos anos, principalmente nas regiões tropicais. Entretanto, a maioria dos solos dessas regiões apresenta baixo pH, alto

conteúdo de Al na subsuperfície, baixa disponibilidade de nutriente e alta capacidade de sorção de fósforo (P). A deficiência de P, nesse tipo de solo, é um dos principais fatores que limitam a produção agrícola no Brasil e em vários outros países tropicais. De acordo com HOLFORD (1997), o fósforo é o segundo nutriente essencial que mais limita a produção agrícola, depois do nitrogênio.

No Brasil, a principal forma de suprir a demanda de P das culturas como, por exemplo, o sorgo, tem sido via adubação fosfatada, que é indispensável à implantação e manutenção da cultura. No entanto, esta cultura necessita de critérios mais exatos para recomendação de P, com o objetivo de se obter uma maior eficiência econômica. Sendo assim, trabalhos vêm sendo realizados na busca constante de genótipos mais adaptados às condições adversas de fertilidade do solo, por meio do melhoramento genético, ou seja, cultivares que apresentam maior eficiência nutricional.

O termo eficiência nutricional pode ser definido como a biomassa produzida por unidade de nutriente aplicada no solo, que depende de dois componentes principais: a eficiência de aquisição e a eficiência de utilização (BAILIAN et al., 1991). ASHER & LONERAGAN (1967) e CLARK & DUNCAN (1974) definem como eficiente um genótipo capaz de acumular quantidade suficiente de determinado nutriente em um ambiente pobre neste nutriente. Esse conceito não tem sido utilizado por não considerar a produtividade do genótipo neste ambiente.

Existem outros trabalhos, além desses citados, que relatam os conceitos propostos por MOLL et al. (1982), que consideram apenas um ambiente, e aqueles relacionados à resposta, como os propostos por CRASWELL & GODWIN (1984), que consideram a interação entre os ambientes contrastantes no nutriente.

Diante do exposto, o programa de melhoramento genético de sorgo da Embrapa Milho e Sorgo vem utilizando diferentes alternativas na busca de materiais com maior eficiência ao fósforo; esses trabalhos têm sido realizados em campo e em solução nutritiva. Segundo o programa, a aquisição de materiais mais adaptados a ambientes com baixos níveis de nutrientes no solo, ou capazes de utilizar de maneira mais eficiente o fertilizante aplicado, seriam então uma alternativa economicamente desejável e ideal.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Sorgo

A origem da cultura do sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) é na África (RODRIGUES, 2007). O cultivo desta cultura no Brasil destina-se principalmente à produção de grãos e forragem, embora existam também cultivares para a produção de álcool ou açúcar (SAWAZAKI, 1998). Ele pode substituir total ou parcialmente o milho nas rações para aves e suínos, e totalmente para ruminantes, com uma vantagem comparativa de menor custo de produção e valor de comercialização de aproximadamente 80% do preço do milho. Além disso, a cultura tem mostrado bom desempenho como alternativa para uso no sistema de integração lavoura-pecuária e para produção de massa verde, proporcionando maior proteção do solo contra erosão, maior quantidade de matéria orgânica disponível e boa capacidade de retenção de água no solo, além de propiciar condições para uso no plantio direto (RODRIGUES, 2007).

O sorgo apresenta notável capacidade de adaptar-se a diversos ambientes e diferentes umidades de solo, sobrevivendo, assim, nos ambientes de baixa umidade (seca), altas temperaturas e com nutrientes limitados. Essa vantagem adaptativa é refletida também no desenvolvimento de resistência a doenças e pragas que afetam a produção de grãos (DILLON et al., 2007). Principalmente devido à sua tolerância à seca, a cultura do sorgo tem se expandido nas regiões de safrinha e no Nordeste brasileiro. A substituição do milho pelo sorgo, na safrinha, se deve, principalmente, ao fato de que o sorgo requer aproximadamente 50% da precipitação requeridas pelo milho durante o ciclo (APPS, 2012b). As pesquisas com sorgo também evoluíram bastante no sentido de disponibilizar híbridos cada vez mais eficientes às condições de safrinha e com alta produtividade.

## 2.2. O macronutriente fósforo (P)

O macronutriente P desempenha nas plantas importantes funções no armazenamento de energia e na integridade estrutural das membranas. Além disso, compõe a estrutura de compostos vitais das células vegetais como fosfato-açúcares, intermediários da respiração e fotossíntese. Também, é constituinte de nucleotídeos dos ácidos nucléicos (DNA e RNA) (TAIZ & ZEIGER, 2004).

O teor médio de P na litosfera é de 2,8 g/kg de solo, contudo, muitos solos contêm de 0,2 a 0,8 g/kg de solo (FASSBENDER, 1994). O P encontra-se em compostos que estão distribuídos em muitas rochas, minerais, plantas e animais. No solo, o P pode ser encontrado em formas orgânicas (Po) e inorgânicas (Pi).

A quantidade de P exigida por culturas altamente produtivas é grande. Manter a planta bem nutrida com P é um fator primordial na obtenção de altas produtividades. Devido ao fato de o P ser tão ligado aos processos metabólicos da planta, ele é móvel nos tecidos da mesma e fica concentrado nas áreas mais ativas de crescimento. Como resultado, a maior parte do P absorvida pela planta é transferida e armazenada no fruto ou no grão, ou seja, é colhida (STAUFFER & SULEWSKI, 2004).

A planta em crescimento pode exibir diferentes estádios na nutrição mineral, tendo em conta o balanço entre os suprimentos interno e externo e a demanda da planta por nutrientes. Primeiramente, as plantas vivem de suas reservas na semente, e o suprimento externo tem pouco efeito no crescimento. Uma segunda etapa ocorre quando a taxa de crescimento é determinada pelo suprimento de nutrientes através de um balanço dinâmico entre fatores internos da planta e o fósforo no solo (GRANT et al., 2001).

As diferentes formas de P no solo são coligadas em três frações: o P em solução, o fósforo lábil e o não lábil. O teor de P na solução é geralmente baixo e representa muito pouco para as necessidades dos vegetais, estando em equilíbrio rápido com as formas lábeis da fase sólida (RESENDE, 2004). Esse equilíbrio é dado

por meio da dessorção e dissolução do fosfato lábil, repondo constantemente, se houver disponibilidade, o fósforo absorvido da solução pelas plantas. O P não lábil, a maior proporção do P inorgânico do solo, apenas muito lentamente pode voltar a formas lábeis. Portanto, o que se procura determinar na análise de solo, para fins de adubação, é o somatório do P-solução e P-lábil (P disponível). A fração de P precipitado com Fe, Al e Ca, mais aquela adsorvida em óxidos de Fe e Al, representa o P-lábil, enquanto o P não lábil corresponderia aos compostos fosfatados mais complexos e estáveis (RAIJ, 1991).

Os fertilizantes desprendem o P para a solução do solo e, em seguida, para a fase sólida, convertendo-se primeiramente em fósforo lábil e, com o tempo, passando a formas não lábeis, as quais não seriam passíveis de aproveitamento imediato pelas plantas (P não disponível). O fósforo pode ser removido da solução via adsorção por ligações covalentes de alta energia com a superfície de argilas e óxidos de ferro e de alumínio em solos ácidos ou, ainda, com carbonatos de cálcio (Ca), em solos calcários. O nutriente pode fazer parte de compostos orgânicos. O P orgânico ocorre em teores proporcionais ao conteúdo de matéria orgânica do solo (RESENDE, 2004). Em geral, quanto maior a acidez, o teor de argila e, principalmente, quanto maior a presença de óxidos de Fe e Al na fração argila, mais intenso é o processo de fixação de P nos solos dos trópicos (NOVAIS & SMYTH, 1999).

A aplicação de altas doses de P em solos intemperizados é justificada pela intensa fixação desse elemento, acarretando baixo conteúdo de P disponível, principalmente em solos onde há predomínio de minerais de Fe e Al. Porém, acarreta um aumento significativo no custo final da produção. A eficiência agronômica dos adubos fosfatados pode ser afetada pelas fontes de fosfato, propriedades do solo, modos de aplicação (CHIEN & MENON, 1995).

### 2.3. Fósforo (P) no solo e sua disponibilidade para as plantas

Existe uma relação entre a fertilidade do solo e a produtividade das plantas quando os demais fatores de produção são mantidos em níveis não limitantes. Assim, a planta tem seu crescimento diretamente dependente da concentração do nutriente na solução do solo, que é denominado fator de intensidade (NOVAIS & MELLO, 2007). Dos macronutrientes essenciais às plantas, o P é um dos elementos que está frequentemente em concentrações subótimas para as culturas na solução do solo. Isso é decorrência de sua capacidade de formar compostos de alta energia de ligação com os colóides, conferindo-lhe alta estabilidade na fase sólida (NOVAIS & MELLO, 2007). Desta forma, mesmo que os teores totais do P no solo sejam altos em relação aos necessários para as plantas, somente uma pequena fração está disponível às plantas (LIU et al., 2006; PARENTONI, 2008).

O P é encontrado no solo de duas formas: a inorgânica (Pi), forma na qual as plantas são capazes de o absorver, e a forma orgânica (Po), que deve ser mineralizada para que as plantas possam absorvê-la (DECHEN & NACHTIGALL, 2007).

A fração do Po pode constituir de 5 a 80% do P total do solo, sendo as principais formas já identificadas os fosfatos de inositol, que compõem de 10 a 80% do Po total, os fosfolipídios (0,5 a 7%), ácidos nucleicos (~3%) e outros ésteres-fosfato (>5%). O fósforo orgânico é originado a partir dos resíduos vegetais adicionados ao solo, dos tecidos microbianos e dos produtos de sua decomposição (SANTOS et al., 2008). O equilíbrio destes compostos depende de sua natureza e de sua interação com a fração mineral, pois são usados como fonte de carbono pelos microorganismos, cujo resultado é a sua mineralização e disponibilização do fósforo para as plantas (PARENTONI et al., 2011).

O Pi pode ser encontrado de várias formas, as quais dependem do pH do solo. Uma pequena quantidade, normalmente menor que  $1 \text{ mg L}^{-1}$ , encontra-se na solução do solo, em equilíbrio com o P adsorvido pelos colóides do solo (HAVLIN et al., 1999).

A adsorção do  $P_i$  depende também do pH do solo. Em solos com pH menores que 7, aumenta a concentração do ânion  $H_2PO_4^-$ , forma preferencialmente absorvida pelas plantas. Entretanto, em solos muito ácidos, aumentam também as concentrações de Fe e Al na solução do solo, podendo provocar a precipitação do fósforo inorgânico como fosfatos de Fe e de Al. Com o aumento do pH, ocorre uma menor adsorção entre o fosfato e a superfície adsorvente. Contudo, em solos com pH muito alcalino quase todo o P inorgânico se encontra como  $PO_4^{3-}$ , forma não absorvida pelas plantas. Além disso, em solos calcários com pH acima de 7, o P pode ser precipitado como hidroxiapatita ou como carbonatoapatita (DECHEN & NACHTIGALL, 2007). O sistema solo-planta é dinâmico, sendo difícil definir o pH ótimo para as várias culturas anuais. Em geral, a máxima disponibilidade do fósforo para as plantas ocorre com valores de pH entre 6 e 7.

HISINGER 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-chaves na habilidade das plantas de adquirir P do solo.

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). Segundo GUPPY et al. (2005), a adição de resíduos orgânicos pode restringir a adsorção de P, pois estes resíduos apresentam ácidos orgânicos de baixo peso molecular que são capazes de ligar e bloquear os sítios de adsorção de P e/ou solubilizar as formas de P complexadas com Al, Fe e Ca. Os ácidos orgânicos provenientes da exsudação das raízes e do metabolismo de microorganismos também mantêm esse processo de bloqueio de sítios de maneira contínua e efetiva. Assim, estes fatores podem aumentar a ciclagem de P e aumentar a sua disponibilidade para as plantas.

Com relação ao processo de aquisição de P pelas plantas, tem sido visto 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 de solo com o nutriente e o alongamento do sistema radicular. Este reabastecimento depende do coeficiente de difusão do P no solo e da zona de depleção de P, que para feijão pode variar de 0,6 a 1,9 mm de distância da raiz (HISINGER 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 o aumento de pêlos radiculares.

Os fatores que mais afetam a aquisição de P pelas plantas são: taxa de alongamento de raízes; a arquitetura de raízes; a presença de pêlos 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 (HISINGER et al., 2006).

## **2.4. Deficiências de fósforo (P) nas plantas e no solo**

Nas plantas, as limitações na disponibilidade de P no início do ciclo vegetativo podem levar a restrições no desenvolvimento, das quais a planta não se recupera posteriormente, mesmo adicionando o suprimento de P aos níveis ideais. O suprimento adequado de P é, pois, necessário desde os estádios iniciais de crescimento da planta (GRANT et al., 2001).

A concentração de P na planta é relativamente pequena, mas criticamente importante. Plantas crescidas em ambientes com deficiência de P apresentam redução no comprimento das folhas, na área foliar e no número de folhas. Embora haja rigorosa inibição da expansão celular, o conteúdo de proteínas e de clorofila por unidade de área foliar, não é muito afetado. Contudo, a sua eficiência fotossintética, por unidade de clorofila, é muito menor (MARSCHNER, 1995).

O crescimento de raízes é menos inibido em plantas deficientes de P que o crescimento da parte aérea, ocasionando frequentemente um aumento na razão massa seca parte de raiz/parte aérea. Esse aumento na razão de raiz/parte aérea, em plantas deficientes de P, é correlacionado com o aumento na partição de carboidratos em direção à raiz, indicado por um aumento acentuado no conteúdo de sacarose nas raízes (KHAMIS et al., 1990).

Assim como a taxa de crescimento da parte aérea diminui, a formação de órgãos reprodutivos também diminui. O início do florescimento é atrasado, o número de flores diminui e a formação de sementes é restrita. A senescência prematura das folhas é outro fator limitante da produção de grãos em solos deficientes em fósforo (MARSCHNER, 1995).

As plantas desenvolvem sintomas visuais devido ao acúmulo de antocianina nas folhas mais velhas. O acúmulo de antocianina serve como barreira fotoprotetora para os cloroplastos, mascarando as clorofilas e evitando danos aos cloroplastos devido à oxidação causada pela intensidade de luz (PINTO et al., 2006).

## **2.5. Eficiência no uso de fósforo (P)**

O fornecimento ideal de nutrientes contribui tanto para o aumento da produtividade como para o aumento do custo da produção. Neste caso, a otimização da eficiência nutricional é importante para aumentar a produtividade e diminuir o custo de produção. Tem-se verificado ampla diversidade em várias espécies de plantas quanto à eficiência nutricional em relação ao P, como em feijão (FAGERIA, 1998), soja (VENTIMIGLIA et al. 1999), milho (PARENTONI, 2008) e sorgo (ROCHA et al.; 2008; SCHAFFERT et al., 2001; RODRIGUES, 2010). Essa diversidade forma a base genética para programas de melhoramento e é consequência de uma cadeia de mecanismos fisiológicos, morfológicos, bioquímicos e simbióticos que aumentam a capacidade de aquisição de P e/ou melhora a eficiência de sua utilização interna, que

são desenvolvidos pelas plantas quando as mesmas são submetidas às condições adversas de fertilidade do solo, principalmente sob estresse de P.

Um ponto importante a ser considerado é a avaliação da variabilidade genética disponível no germoplasma quanto à eficiência e uso de P, pois a maioria das técnicas utilizadas não é efetiva na identificação de mecanismos desenvolvidos pelas plantas em condições naturais de campo. Além disso, existe a falta de um caráter que seja de fácil avaliação para que possa ser utilizado como critério de seleção. Também, o conhecimento da dose de P ideal a ser utilizada nesses trabalhos tem sido questionado. Na procura de soluções para tais pontos críticos, várias sugestões têm sido relatadas. FURLANI et al. (1985) recomendaram a realização de estudos preliminares utilizando uma amostra dos genótipos, cultivada em doses crescentes de P para o conhecimento prévio dos caracteres e da dose adequada desse elemento que melhor discriminem os genótipos, ou seja, que identifiquem maior variabilidade genética, para posterior avaliação de um número maior genótipos. Entretanto, tal proposta requer tempo, espaço e mão de obra. Por sua vez, as análises estatísticas dos resultados obtidos de cada caráter avaliado são feitas individualmente, o que dificulta uma interpretação mais global.

Existem diferentes conceitos para eficiência nutricional de plantas. Destacando a produtividade, eficiência nutricional pode ser definida como a capacidade da planta em produzir alto rendimento em um meio que possua características desfavoráveis que afetem diretamente a produção-padrão (MACHADO et al., 2001). Já sob ponto de vista do requerimento interno de determinado nutriente na planta, geralmente a eficiência é conceituada como a biomassa produzida por unidade de nutriente aplicada no solo, que depende de dois componentes principais: a eficiência de aquisição e a eficiência de utilização (BAILIAN et al., 1991). O primeiro componente depende das eficiências de absorção e de enraizamento. Já o segundo componente depende das eficiências de translocação e de conversão em biomassa.

De acordo do GERLOFF (1987), plantas eficientes são aquelas que produzem maior quantidade de matéria seca por unidade de P absorvido. FÖHSE et al. (1988)

definiram a eficiência para P como sendo a habilidade de uma planta em produzir certa porcentagem da produção máxima com certo nível de P no solo. Já, CLARK & BROWN (1974) definem como eficientes aquelas plantas que acumulam maiores concentrações de P quando cultivadas em baixas doses do mesmo. Segundo FAGERIA (1998), a eficiência pode expressar a relação entre produção obtida e insumos aplicados. Isto significa que a eficiência nutricional é a quantidade de matéria seca ou de grãos produzidos por unidade de nutriente aplicado. De acordo com GRAHAM (1984), o índice de eficiência pode ser definido como a produção relativa de um genótipo em solo deficiente, em comparação com sua produção no nível ótimo de nutrientes. COOKE (1987) define a eficiência nutricional como o aumento de produtividade por unidade de nutriente aplicado. De acordo com ISRAEL & RUFTY (1988), a eficiência nutricional é a relação entre a biomassa total e a quantidade de nutriente absorvido. ASHER & LONERAGAN (1967) usam esse mesmo conceito para eficiência de utilização de fósforo. Já FOX (1978) define uma planta eficiente como “aquela que produz uma grande quantidade de matéria seca por unidade de tempo ou área, desenvolvendo em um meio que tenha P disponível menos do que suficiente para máxima produtividade”. Segundo esse autor a eficiência no uso de P tem significado somente quando se comparam plantas cultivadas nas mesmas condições quanto ao conteúdo de P no solo.

SIDDIQI & GLASS (1981) propuseram para a caracterização da eficiência de utilização de P, um índice que foi bastante aceito, o mesmo é obtido através da equação:  $(\text{matéria seca produzida})^2 (\text{unidade do nutriente absorvido})^{-1}$ . Assim, reúne-se num mesmo indicador eficiência de utilização e o crescimento. O uso desse índice para classificação de genótipos para eficiência nutricional evita que plantas eficientes, mas de baixa produção de biomassa sejam selecionadas.

A eficiência ao P é um fenômeno bastante complexo e afetado por um grande número de mecanismos das plantas associados com a aquisição de P do solo e a utilização a nível celular (LYNCH & HO, 2004; OZTURK et al., 2005).

Portanto, para que se possa entender o processo de avaliação da eficiência no uso de P é preciso que alguns conceitos sejam definidos. MOLL et al. (1982) definiram

eficiência de uso de um nutriente como sendo a quantidade de grãos produzidos por quantidade de nutriente suprido à cultura. Este índice é decomposto em dois componentes principais. A chamada “eficiência de aquisição”, definida como quantidade de nutriente absorvido pela planta, dividido pela quantidade de nutriente suprido à cultura. O segundo componente é chamado “eficiência de utilização interna” definida como a razão da quantidade de grãos produzidos por unidade de nutriente absorvido. A eficiência de utilização interna pode, 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).

Os conceitos propostos por MOLL et al. (1982) permitiram um avanço no entendimento dos processos biológicos relacionados à eficiência nutricional em plantas, por separarem os efeitos relacionados com a capacidade da planta de adquirir o nutriente do meio (aquisição), dos processos metabólicos internos à mesma (utilização).

A eficiência de aquisição, sob baixa disponibilidade de P, pode ser influenciada por alterações morfológicas, fisiológicas e/ou bioquímicas no sistema radicular das plantas, tais como: desenvolvimento de raízes laterais (GERLOFF & GABELMAN, 1983) e de pêlos radiculares (BATES & LYNCH, 2001); aumento na relação entre raízes e parte aérea; mudanças na arquitetura radicular; formação de raízes proteoides; aumento na associação com fungos micorrízicos; aumento na velocidade máxima de absorção (SHANE & LAMBERS, 2005; CAMACHO-CRISTÓBAL et al., 2008); mudanças no pH da rizosfera; exsudação de compostos orgânicos pelas raízes e níveis de fosfatases nas células das raízes (STARNES et al., 2008). Diversos fatores podem afetar também a eficiência de utilização interna de P, podendo-se citar como exemplo a distribuição do nutriente na planta, conforme já observado em sorgo (WIENEKE, 1990) e trigo (HORST et al., 1993). A concentração de  $P_i$  nos tecidos das plantas também pode influenciar a eficiência de utilização interna de P, interferindo em processos como a fotossíntese, observado em feijão (WHITEAKER et al., 1976) e arroz (XU et al., 2007). Muitas destas respostas das plantas à deficiência de P atuam conjuntamente, tanto

para a eficiência de aquisição, quanto da utilização deste nutriente, o que também é observado nas alterações de natureza molecular, como ativação de genes relacionados à expressão de RNases, fosfatases, transportadores de Pi, Ca-ATPases, entre outros (RAGHOTHAMA, 1999; BALDWIN et al., 2008).

PARENTONI et al. (2008) determinaram a importância relativa da eficiência de aquisição e de utilização interna de fósforo em milho, sobre a eficiência de uso desse nutriente em milho, a eficiência de aquisição foi quase duas vezes mais importante que a eficiência de utilização interna, na variabilidade observada na eficiência de uso, nos ambientes sob baixa disponibilidade de P, e três vezes mais importante nos ambientes com alta disponibilidade. Desse modo, programas de melhoramento de milho podem utilizar índices de seleção com peso maior para eficiência de aquisição do que para eficiência de utilização interna, para aumento na eficiência de uso de P. A ausência de correlação entre a eficiência de aquisição e eficiência de utilização interna também foi observada, indicando que a seleção em uma dessas variáveis não deverá afetar a outra. O autor ressalta ainda que os índices propostos por MOLL et al. (1982) podem ser utilizados em ambientes individuais ou grupos de ambientes, estando relacionados aos conceitos de eficiência.

Uma forma de agrupar genótipos de acordo com sua eficiência e resposta foi apresentada por FAGERIA et al. (1993). Esses autores utilizaram gráficos do tipo (x,y), em que, 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 expressão  $[(PGA - PGB) / P(A-B)]$ , onde PGA e PGB correspondem à produção de grãos nos ambientes com alta e baixa disponibilidade do nutriente, respectivamente, e P(A-B) é a diferença entre o nível alto e baixo do nutriente (FURTINI, 2008). Portanto, os genótipos são classificados como eficientes e/ou responsivos de acordo com o quadrante em que se encontram (Figura 1).

|                                            |                                                  |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| II<br>Não eficientes e<br>responsivos      | Resposta<br>I<br>Eficientes e<br>responsivos     |
| III<br>Não eficientes e<br>não responsivos | IV Eficiência<br>Eficientes e<br>não responsivos |

**FIGURA 1.** Representação gráfica da eficiência e resposta ao nutriente pela metodologia de Fageria et al. (1993).

Contudo, somente a visualização gráfica não permite selecionar os melhores genótipos dentro de cada grupo. Sendo assim, a utilização de um índice que reúna a eficiência e resposta em uma única estatística seria vantajosa, pois facilitaria a seleção de genótipos pelos dois atributos simultaneamente. Vários índices de eficiência e resposta ao P são descritas na literatura (PARENTONI et al., 2008, 2010; MENDES et al., 2011) e não existe um consenso de qual é o mais adequado. GUIMARÃES (2006) cita que o próprio desempenho produtivo nos ambiente de baixa e alta disponibilidade de nutriente pode ser considerado como índice de eficiência e resposta ao nutriente, respectivamente.

SCHAFFERT et al. (2001) com o objetivo de identificar fontes genéticas de sorgo eficientes e ineficientes na aquisição de P e responsivos e não responsivos avaliou 36 linhagens de sorgo avaliadas em Latossolo Vermelho Escuro. O solo foi corrigido para elevar o pH para um intervalo entre 5,5 e 6,0. Utilizaram-se dois níveis de P no solo 50% (5 ppm) e 100% (10 ppm). As 36 linhagens foram classificados em quatro grupos: eficientes e responsivos a P (ER), não-eficiente e responsivo ao P (NER), eficientes e não responsivos ao P (ENR), e não-eficientes e não responsivos ao P (NN), de acordo com seu desempenho em campo para a característica produtividade de grãos. A

variabilidade genética para a eficiência de uso e responsividade ao P foi identificada dentro do conjunto das 36 linhagens de sorgo representando tanto a tolerância como a susceptibilidade ao alumínio tóxico.

Com o objetivo de selecionar genótipos mais eficientes na aquisição e utilização de fósforo em solos naturais de cerrado, FIDELIS et al. (2008) avaliaram 45 genótipos em ambientes com baixo e alto nível de fósforo com doses de 25 e 113 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O no plantio, respectivamente. Para identificar os genótipos adequados aos ambientes, utilizaram a metodologia proposta por FAGERIA et al. (1993), que sugerem a classificação dos genótipos quanto à eficiência no uso e resposta a aplicação de fósforo. Foram identificados 29 genótipos eficientes, que apresentaram as maiores médias de produtividade de grãos em baixo fósforo e 15 genótipos responsivos.

## **2.6. Controle genético para eficiência de uso de fósforo (P)**

Em trabalhos de melhoramento, quando iniciados para qualquer cultura, é de grande importância conhecer o controle genético da característica de interesse. Informações sobre o quanto da variabilidade fenotípica é herdável e os principais tipos de ação gênica que estão envolvidos na herança da característica, ajudam o melhorista na escolha dos métodos de melhoramento mais adequados (ROSEN & KORCAK, 1989).

CLARK & 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.

O controle gênico das características relacionadas à aquisição de P são geralmente poligênicas (CLARKSON & HAWKESFORD, 1993), com dominância; as de eficiência de utilização de P para produção de matéria seca são também poligênicas,

sendo que tanto efeitos aditivos quanto dominantes têm se mostrados importantes (SILVA et al., 1992).

Estudos para a avaliação da herança da eficiência no uso de P têm abordado a absorção e a acumulação de P na fase de plântulas, como, por exemplo, em sorgo (GORZ et al., 1987). Estes estudos mostram que tanto os efeitos aditivos quanto os não aditivos são importantes no controle da eficiência no uso de P.

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. Segundo PARENTONI et al. (2000) os efeitos não aditivos foram superiores aos aditivos para a variável gramas de grão produzido por grama de P no grão (quociente de utilização), obtidas em um dialelo de 13 linhagens de milho avaliadas em um Latossolo Vermelho Escuro com alto e baixo P. PARENTONI (2008) realizou estudos em campo avaliando milho tropical, onde estudou a herança, baseando-se nas estimativas de médias e variâncias, e as relações entre caracteres de eficiência e resposta ao P e verificou que efeitos de dominância seguidos de efeitos epistáticos (quando detectados) foram superiores aos efeitos aditivos para a maioria dos caracteres estudados.

FRITSCHÉ-NETO et al. (2010), com o objetivo de identificar efeitos genéticos que controlam a herança de caracteres associados à eficiência de utilização do fósforo em milho, realizaram um dialelo em dois níveis de disponibilidade de fósforo (alto e baixo). Os autores concluíram que a eficiência de utilização, em baixa disponibilidade de fósforo, não se correlacionou com a produtividade de grãos. Contudo, sob alta disponibilidade do nutriente, esses parâmetros se correlacionaram. Os efeitos não aditivos têm maior importância para caracteres relacionados à eficiência de utilização do fósforo, de modo que a seleção deve ser realizada nas combinações híbridas.

## 2.7. Programa de melhoramento visando à eficiência e a aquisição de (P)

Em estudos de diversidade genética em programas de melhoramento quanto ao crescimento de plantas sob baixo P, tem-se utilizado, preferencialmente, condições de cultivo controladas, como cultura hidropônica (FURLANI et al., 1985) e cultivo no solo, em vasos (ALVES et al., 1988) e no solo, em campo (PARENTONI, 2008). O uso de sistemas de cultivo mais artificiais vem sendo justificado pela necessidade de redução dos efeitos ambientais, em função da complexidade da relação solo-raiz (WHITEAKER et al., 1976).

CRUZ et al. (2008), com o objetivo de avaliar a resposta de dois híbridos de sorgo granífero a doses crescentes (25, 50 e 75 kg ha<sup>-1</sup>) de fósforo na região Nordeste, observaram que houve incremento de matéria seca em toda planta, no estágio fenológico de grão farináceo duro, em resposta à adubação fosfatada. O incremento do híbrido BRS304 foi de 27%, 38% e 33% para as doses 25, 50 e 75 kg ha<sup>-1</sup> de P, respectivamente, e para o híbrido BRS310 esse incremento foi de 18%, 27% e 38% para as doses 25, 50 e 75 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Verificou-se que o mesmo ocorreu para matéria seca, em toda a planta, do híbrido BRS304, avaliado no estágio de grão leitoso, na ordem de 21, 33% e 38 % para as doses 25, 50 e 75 kg ha<sup>-1</sup>, e para o BRS310 esse incremento foi de 5%, 24% e 34% para as doses 25, 50 e 75 kg ha<sup>-1</sup> de P, respectivamente. Esse resultado indica que a cultura do sorgo responde de forma linear à adubação fosfatada, quando ela é aplicada no sulco de semeadura e que o aumento da disponibilidade de fósforo à cultura proporciona maior participação de grãos na matéria seca total da forragem.

Estudando-se a eficiência e resposta ao uso de fósforo de variedades de arroz (*Oryza sativa* L.), em várzea irrigada, sob duas condições de adubação de P (20 e 120 kg ha<sup>-1</sup>), conclui-se que, por meio da produtividade de grãos, foi possível classificar as variedades quanto à eficiência no uso e resposta à aplicação de fósforo (ROTILI et al., 2010). Foi demonstrado que apenas a variedade BRS-Alvorada foi classificada como eficiente quanto ao uso de fósforo e responsiva a sua aplicação.

LIU et al. (2004) avaliaram em solução nutritiva com (+P) e (-P) a acumulação de biomassa, crescimento de raízes, exsudação de ácidos orgânicos, atividade da enzima fosfatase ácida (APase) e o pH da rizosfera sob condições de baixo e alto P de dois genótipos de milho, contrastantes para a eficiência de P. Os resultados obtidos mostraram que o tratamento (-P) aumentou a biomassa de raiz (entre o 6º e 15ºC) em relação a parte aérea, a taxa de crescimento de raízes laterais e a atividade da enzima APase nas raízes e na superfície de raiz, mas reduziu a exsudação de ácidos orgânicos e o pH da rizosfera de ambos os genótipos. A linhagem 181, eficiente ao P, teve um maior sistema radicular em termos de peso de massa de raiz e comprimento de raízes laterais comparadas à linhagem 197, ineficiente ao P, em ambos os tratamentos de P, indicando que a morfologia de raiz da linhagem 181 é uma característica vantajosa, mas não pode ser considerada específica na adaptação de genótipos ao (-P). A linhagem 181 quando cultivada em condições de (-P) reduziu acentuadamente o pH da solução e da rizosfera e aumentou a atividade da enzima APase nas raízes e na superfície de raiz. Surpreendentemente, a exsudação de ácidos orgânicos foi reduzida em (-P) em ambos os genótipos. A taxa de exsudação de ácidos orgânicos na linhagem 181 foi menor que na linhagem 197 sob condições de (-P). Com estes resultados, os autores concluíram que a utilização eficaz de P no solo calcário, pela linhagem 181, está relacionada com o seu amplo sistema radicular, uma maior capacidade para acidificar a rizosfera e sua resposta positiva da produção da enzima fosfatase ácida (APase).

BAYUELO-JIMÉNEZ et al. (2011) avaliaram a variação genotípica através das variáveis arquitetura e morfologia de raiz, incluindo pêlos radiculares e as características de crescimento de planta associadas com a adaptação de variedades crioulas de milho deficientes ao P em dois locais no Planalto Central do México. Duzentos e quarenta e dois acessos foram cultivados em duas áreas com baixo P (23 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup>) e alto P (97 kg de  $P_2O_5$  ha<sup>-1</sup>), posteriormente, um subconjunto de 50 acessos contrastantes foi plantado em um segundo local. Os acessos diferiram muito no crescimento de planta, morfologia radicular e eficiência de P, definida como crescimento da planta sob a disponibilidade de P abaixo do ideal. Os acessos foram

divididos em três categorias de eficiência P, usando componentes principais e análise de cluster, e em quatro categorias, de acordo com o principal componente retido e seu peso relativo para cada genótipo em combinação com o crescimento ou potencial de produção. A distribuição dos acessos em três classes de eficiência de fósforo ficou estável em todos os locais. Os acessos eficientes ao fósforo apresentaram uma maior biomassa em relação à raiz parte aérea, taxa nodal de enraizamento, raízes laterais nodais, e densidade do pêlos radiculares sob deficiência de P. Alocação de biomassa para as raízes, como quantificado pelo coeficiente de partição alométrico (K), não foi alterada pela disponibilidade de P nos acessos eficientes, mas os acessos ineficientes tiveram uma menor K em condições de baixo P. Acessos com maior enraizamento nodal e laterais apresentaram maior crescimento em baixo P, pêlos radiculares densos conferiram uma vantagem significativa em baixo P, como evidenciada pelo aumento da biomassa vegetal. Esses resultados indicam a variação de variedades crioulas mexicanas no Planalto Central para várias características de raízes que podem ser úteis para o melhoramento genético visando à eficiência ao P em milho.

## **2.8. Análise de trilha**

O estudo das relações entre características de interesse para o melhoramento de plantas é de grande importância, visto que a obtenção de ganhos genéticos e a classificação dos genótipos superiores são, em muitos casos, avaliadas em conjunto (CRUZ, et al., 2004). Outra situação é aquela em que a seleção de determinadas características é dificultada em razão da baixa herdabilidade, e, ainda, no caso em que a seleção para uma característica gera a redução em outra (CARVALHO, et al., 2001).

Para um melhor entendimento das associações entre diferentes características, WRIGHT (1921) recomendou um método de desdobramento das correlações obtidas, em efeitos diretos e indiretos das variáveis designadas explicativas sobre uma variável principal, sendo uma expansão da regressão múltipla quando são envolvidas inter-

relações complexas. Este método é chamado análise de trilha. Segundo COIMBRA et al. (2005), o estudo apenas das correlações simples entre as variáveis, possibilita somente a obtenção de uma medida de associação, sem conclusões sobre a causa e efeito.

Na análise de trilha deve-se identificar o efeito da variável residual, que, segundo Li (1981), citado por CRUZ et al. (2004), é utilizado como referencial para verificar se os efeitos diretos ou indiretos das variáveis explicativas ( $X_1$ ,  $X_2$ , ... $X_N$ ) sobre a variável principal ( $Y$ ) devem ou não ser considerados no estudo. Se o coeficiente de trilha de uma determinada variável explicativa (que expressa seu efeito direto e indireto sobre  $Y$ ) for numericamente menor que o coeficiente da variável residual, significa que esta variável independente deve explicar mudanças em  $Y$  apenas indiretamente. Em outras palavras, está variável por si só não é capaz de explicar variações em  $Y$ . Ela pode ser importante apenas quando analisada em conjunto com outras variáveis. Um coeficiente de trilha numericamente maior que o coeficiente da variável residual demonstra que existe efeito direto da variável explicativa sobre a variável principal.

Em estudos em que um grande número de variáveis são avaliadas é necessário identificar a presença ou ausência de multicolinearidade na matriz de correlação. Se identificada a presença desta, devem-se seguir alguns procedimentos, que são indicados, a fim de tornar mínimo seus efeitos (BELSLEY et al., 2004). CARVALHO (1996) sugere que análise de trilha com multicolinearidade pode ser feita utilizando todas as variáveis através de procedimento semelhante ao da análise de regressão em crista, semelhante a proposta de HOERL & KENNARD (1970).

Com o objetivo de determinar a associação e os efeitos diretos e indiretos de alguns caracteres sobre a produção de grãos de canola, através do estudo das correlações fenotípicas e pela análise de trilha, COIMBRA et al. (2004) utilizaram o delineamento blocos casualizados, com quatro repetições. De acordo com os resultados obtidos, pode ser concluído que não há associações entre os caracteres estatura de plantas com os caracteres massa de mil grãos e rendimento de grãos. A análise de trilha revelou que os componentes primários da população de plantas por

unidade de área e número de grãos por planta tem o maior efeito direto sobre a variável rendimento de grão. Por outro lado, o caráter número de grãos por planta é o maior responsável pelo aumento da massa de mil grãos. O coeficiente de trilha confirmou que o componente secundário número de grãos por síliqua tem o maior efeito direto sobre o rendimento de grãos.

EZEAKU & MOHAMMED (2006) estudaram a associação e análise de trilha entre florescimento, altura da planta, comprimento da panícula, número de panícula, massa de 1000 sementes, peso de panícula e rendimento de grãos de trinta variedades de sorgo. Os autores obtiveram os seguintes resultados: houve alta correlação positiva significativa entre o rendimento de grãos e peso de panícula ( $r = 0,976$ ), rendimento de grãos e massa de 1000 grãos ( $r = 0,522$ ) e massa de 1000 grãos e peso de panícula ( $r = 0,528$ ). A partição dos componentes de rendimento e em efeitos diretos e indiretos revelou que o peso da panícula teve o maior efeito direto sobre o rendimento de grãos (0,961), enquanto massa de 1000 grãos contribuiu indiretamente para a produção de grãos através de peso da panícula (0,507). O número de panícula também contribuiu para o rendimento de grãos indiretamente por meio de peso da panícula (0,420), seguidos por massa de 1000 grãos e, em seguida, o número de panícula. Há alto coeficiente de correlação positiva fenotípica e genotípica entre número de panícula e peso de panícula, o número de panícula e rendimento de grãos, peso da panícula e rendimento de grãos. A altura da planta tem coeficientes de correlação fenotípica e genotípica alta e positiva com peso de panícula ( $r_F = 0,550$  e  $r_G = 0,881$ ) e rendimento de grãos ( $r_F = 0,555$  e  $r_G = 0,904$ ).

RODRIGUES (2010), com o objetivo de avaliar quais caracteres devem ser considerados na seleção de genótipos de sorgo eficientes e responsivos ao fósforo. Realizou o desdobramento das correlações entre os caracteres avaliados em efeitos diretos e indiretos das variáveis básicas de eficiência e resposta por meio da análise de trilha. Segundo o autor o caráter mais indicado para a avaliação da eficiência de linhagens de sorgo ao fósforo foi o índice de colheita de fósforo para eficiência de utilização e massa seca de grãos para eficiência de absorção e uso, sob condições de

estresse. O caráter mais indicado para a avaliação da resposta ao fósforo, em linhagens de sorgo, foi o caráter massa seca de grãos para eficiência de recuperação aparente, eficiência fisiológica e eficiência agrônômica, sob condições adequadas de adubação.

RODRIGUES et al. (2010) avaliaram as correlações genéticas e fenotípicas e seus desdobramentos em efeitos diretos e indiretos de componentes de produção sobre a produtividade de frutos em acessos de tomateiro. Os autores utilizaram a metodologia de análise de trilha para obter tais resultados. Foram utilizados dados de 20 características, avaliadas em 132 acessos de tomateiro do grupo Salada. A análise de trilha com apenas um diagrama causal mostrou igual importância das variáveis primárias na determinação da produção. A análise de trilha com dois diagramas causais revelou que a seleção simultânea do comprimento da folha e do diâmetro do entrenó pode ser uma boa opção para a aquisição de ganhos na produção total de frutos.

SILVA et al. (2005) avaliaram o efeito dos caracteres número de espiga por plantas, número de grãos por espiga, massa média de grãos, tamanho da espiga e número de espiguetas por espigas sobre o rendimento de grãos, em trigo, diferenciados quanto a presença ou ausência do caráter “Stay Green” , através de seus coeficientes de relação e sua decomposição por meio da análise de trilha. Foram utilizados sete genótipos, no delineamento de blocos casualizados com cinco repetições. A análise de trilha permitiu identificar o componente primário MMG, como o de maior potencial para a seleção de constituições genéticas superiores para rendimento de grãos.

## **2.9. Análise de componentes principais**

A análise de componentes principais (CP) é uma técnica que incide em transformar um conjunto de variáveis originais em outro conjunto de variáveis de mesma dimensão chamadas componentes principais, e conhecida também como transformação de Hotelling. Os componentes principais exibem propriedades

importantes: cada componente principal é uma combinação linear de todas as variáveis originais, são independentes entre si e estimados com o propósito de reter, em ordem de estimação, o máximo de informação, em termos da variação total contida nos dados. A ideia da análise de componentes principais está associada à redução da massa de dados, com menor perda da informação. Procura-se redistribuir a variação observada nos eixos originais de forma a se conseguir um conjunto de eixos ortogonais não correlacionados. A técnica de componentes principais pode ser utilizada para geração de índices e agrupamento de indivíduos. A análise agrupa os indivíduos em função da sua variação, isto é, os indivíduos são agrupados de acordo suas variâncias, ou seja, segundo seu comportamento dentro da população, que é representado pela variação do conjunto de características que define um indivíduo, ou seja, a análise de componente principal agrupa os indivíduos de uma população de acordo com a variação de suas características (REZENDE, 2007).

PEDREIRA et al. (2005) utilizaram a técnica de componentes principais com o objetivo de avaliar as características agronômicas e nutricionais de híbridos de sorgo: BR-700, AG-2005, MASSA-03, 699005, 699001, 698005, 698007 e 498111, cultivados em dois locais. O delineamento utilizado foi em blocos ao acaso com oito tratamentos e três repetições, sendo os resultados analisados separadamente para cada local. As médias entre os dois locais das características avaliadas foram utilizadas para determinação dos componentes principais e para a análise de agrupamento. Foram determinadas a produção de matéria seca, proporção das frações folha, colmo e panícula, o teor de proteína bruta e os constituintes da parede celular. Os resultados obtidos mostraram que os maiores percentuais de proteína bruta ( $p \leq 0,05$ ) para a planta inteira foram obtidos nos híbridos 698005 e AG-2005. O híbrido 699005 apresentou maiores teores ( $p \leq 0,05$ ) de fibra em detergente neutro, fibra em detergente ácido e celulose. Os teores de lignina, hemicelulose e nitrogênio insolúvel em detergente ácido não foram significativos ( $p > 0,05$ ) na planta inteira em nenhuma dos locais. A maior produção de matéria seca ( $p \leq 0,05$ ) foi obtida pelo híbrido 698005, que também apresentou o melhor equilíbrio entre as partes constituintes da planta. O híbrido 498111 exibiu altas participações de colmo na matéria seca e baixos teores de fibra em

detergente neutro e fibra em detergente ácido. A classificação desses híbridos de acordo com análise dos componentes principais e também pelo agrupamento indicou a existência de dois grupos de plantas: um deles caracterizou-se pela proporção de panícula e teor de proteína bruta e o outro através das variáveis: produção de matéria seca, proporção de colmo e fibra em detergente ácido.

Com o objetivo de caracterizar a variabilidade genética de parte do germoplasma existente em poder de produtores de feijão no Rio Grande do Sul, e de cultivares produzidas pela pesquisa e reuni-las em grupos de similaridade genética RODRIGUES et al. (2002) avaliaram a divergência genética de 37 cultivares locais e 14 cultivares indicadas para pesquisa no Estado, utilizando 40 descritores morfológicos. Empregou-se análise multivariada, por intermédio de componentes principais e método de agrupamento. Com o uso destas técnicas foi possível identificar descritores ineficientes no estudo da variabilidade genética e agrupar as cultivares estudadas em quatro grupos diferentes de similaridade genética. As cultivares locais demonstraram variabilidade superior à encontrada nas cultivares procedentes da pesquisa, o que indica a importância da sua inclusão em programas de melhoramento.

Na avaliação da adaptabilidade e a estabilidade da produtividade de grãos ROCHA et al. (2007) avaliaram 20 genótipos de feijão-caupi. Utilizou-se, o modelo de efeitos aditivos principais e interação multiplicativa. Os experimentos foram realizados em 16 ambientes na região Nordeste do Brasil. Os efeitos de genótipos, ambientes e da interação genótipo x ambiente, e os três primeiros eixos da análise de componentes principais (PCA) foram significativos. Os dois primeiros PCA explicaram juntos 83,20% do padrão da interação genótipo x ambiente. As linhagens TE-97-321G-4, EVX-92-49E e EVX-63-10E apresentaram alta adaptabilidade, mas somente a linhagem EVX-63-10E foi altamente previsível. A cultivar BRS Guariba e as linhagens EVX-92-49E e TE97-321G-4 expressam melhor potencial genético em ambientes de alta produtividade.

### **3. OBJETIVO GERAL**

O trabalho teve como objetivo identificar linhagens de sorgo eficientes e ineficientes ao P, avaliadas em ambientes com baixa e alta disponibilidade de fósforo.

#### **3.1. Objetivos específicos**

- O trabalho objetivou identificar e classificar linhagens de sorgo eficientes e ineficientes ao fósforo, avaliadas em ambientes contrastantes (com e sem P) ao fósforo, através da metodologia proposta por FAGERIA & BARBOSA FILHO (1982);
- Identificar a importância relativa da eficiência de aquisição e a eficiência de utilização, em relação à eficiência de uso de P, utilizando a metodologia proposta por MOLL et al. (1982);
- Obter as estimativas dos coeficientes de correlação genética e fenotípica e avaliar, através das análises de trilha, os desdobramentos das correlações genotípicas em efeitos diretos e indiretos das variáveis independentes (explicativas) nas variáveis dependentes (básicas) de eficiência, com vistas a identificar dentre as características avaliadas qual a melhor para explicar os índices de eficiência; e
- Identificar os componentes principais com o objetivo de identificar quais das características avaliadas contribuíram mais com a variação dos dados.

### **4. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **4.1. Local**

Os experimentos para a avaliação de índices de eficiência ao fósforo (P) foram realizados no sítio de fenotipagem para a eficiência ao P da Embrapa Milho e Sorgo,

localizada no município de Sete Lagoas, MG, à altitude de 766,73 metros, nas coordenadas: latitude 19°27'57" e longitude 44°14'49", na safra de 2011.

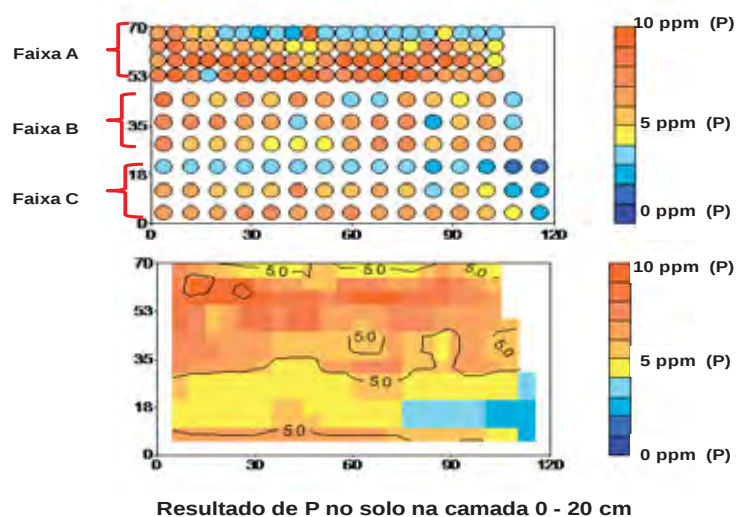
#### **4.2. Delineamento experimental**

As 243 linhagens e duas linhagens utilizadas como testemunhas, foram avaliadas em dois ambientes contrastantes para o nutriente fósforo (P), sendo um ambiente com P e outro sem P. Estas 245 linhagens de sorgo pertencem a um painel de associação, que é dividido em quatro categorias: 1) Converted tropical: essas raças são sensíveis fotoperíodo, mas têm sido convertidas em linhagens insensíveis ao fotoperíodo através de retrocruzamento. Elas representam uma grande variabilidade; 2) Breeding cultivar: representam a maior de todo o material genético (245 linhagens) foram desenvolvidas a mais de 50 anos atrás, sem a seleção de resposta a nenhum nutriente; 3) Breeding-Breeding research material: linhagens desenvolvidas mais recentemente, provavelmente com resposta a fertilizante e 4) Breeding-inbred line: linhagens desenvolvidas mais recentemente, provavelmente com resposta a fertilizante

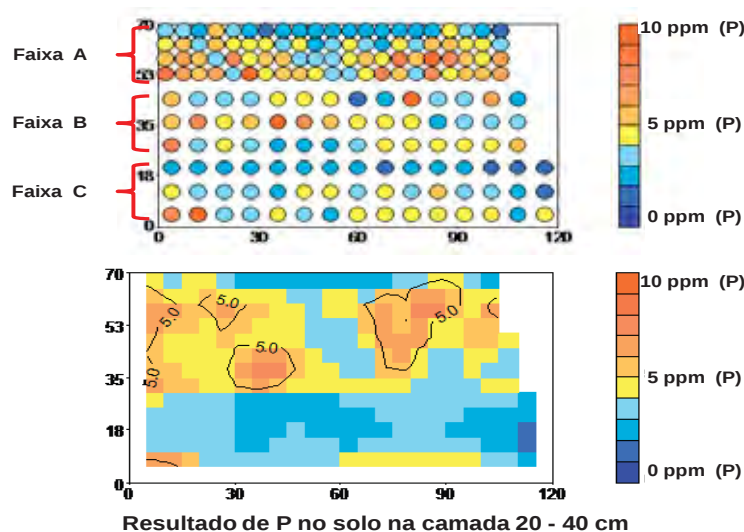
Devido ao número elevado de tratamentos, as linhagens foram divididas em três experimentos, em látice triplo 9x9, avaliados nos ambientes com P e sem P. Cada um dos três experimentos foi composto por 81 linhagens e duas testemunhas adicionais (ATF13B e ATF14B), intercaladas em cada bloco, totalizando um painel de associação de 243 linhagens de sorgo e duas linhagens testemunhas. As parcelas foram constituídas por duas linhas de 3 m de comprimento, com espaçamento de 45 cm entre linhas. A área utilizada para avaliar os experimentos conduzidos em estresse de P foi dividida em três faixas (A, B e C) e cada uma das repetições de cada experimento foram implantadas em cada uma das faixas A, B e C.

Para caracterização dos ambientes com estresse e sem estresse de P, amostras de solos foram retiradas em cada faixa A, B e C para posterior análise. A princípio foi realizada uma análise de solo das três faixas de estresse de P e também na faixa sem estresse de P. Para isso, foram coletadas várias amostras, que foram misturadas,

obtendo-se uma amostra composta de cada faixa e encaminhadas ao laboratório de análise de solo da Embrapa Milho e Sorgo. Os resultados das faixas A, B e C foram de acordo com o propósito de considerar a área de baixa disponibilidade P (25 a 50% de P em relação ao nível crítico, ou seja, mais ou menos 2,5 a 5 ppm de P). Posteriormente aos resultados obtidos realizou-se uma nova amostragem de solo nas faixas (A, B, e C) com estresse de P separadamente, mas em forma de quadrante, na faixa A as amostras foram coletadas em quadrantes de  $5 \times 5 \text{ m} = 25 \text{ m}^2$ , cada quadrante nas profundidades 0 – 20 cm e 20 – 40 cm, lembrando que a área útil total da faixa A é  $2100 \text{ m}^2$ , somente na faixa A foram coletadas 168 amostras nas profundidades 0 – 20 cm e 20 – 40 cm. Devido ao alto custo e à escassez de mão de obra, nas faixas B e C, o quadrantes foram maiores, sendo  $8 \times 8 \text{ m} = 64 \text{ m}^2$  cada quadrante, as profundidades abordadas foram as mesmas utilizadas para a faixa A, a diferença entre as faixas B e C é o tamanho ou área útil  $2688 \text{ m}^2$  e  $2880 \text{ m}^2$ , respectivamente. O número de amostra obtidas nas profundidades 0 – 20 cm e 20 – 40 cm da faixa B foram 84 e a faixa C totalizou 90 amostras. Todas as amostras de solo foram encaminhadas ao laboratório de análise de solo da Universidade Federal de Lavras. As Figuras 2 e 3 mostram os resultados de P no solo analisado nas camadas 0 – 20 e 20 – 40 cm nas faixas A, B e C com estresse de P.



**FIGURA 2:** Resultado de P no solo na camada 0 – 20 cm.



**FIGURA 3:** Resultado de P no solo na camada 20 – 40 cm.

Com base nos resultados das análises, o solo foi corrigido para acidez com a utilização de calcário dolomítico. A adubação de plantio, para o ambiente sem estresse de P, foi realizada com aplicação de  $250 \text{ kg.ha}^{-1}$  do formulado 8-28-16 ( $20 \text{ kg.ha}^{-1}$  de N,  $70 \text{ kg.ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $40 \text{ kg.ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ ). Para as faixas (A, B e C) que compõem ambiente com estresse de P, a adubação de plantio consistiu na aplicação de  $200 \text{ kg.ha}^{-1}$  do formulado 20-00-20 ( $40 \text{ kg.ha}^{-1}$  de N e  $40 \text{ kg.ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ ). A adubação de cobertura foi realizada nos dois ambientes (sem estresse e com estresse de P), quando as plantas se encontravam com 25 dias após a emergência, sendo que no ambiente sem estresse de P foram aplicados  $130 \text{ kg.ha}^{-1}$  de ureia e para as faixas com estresse de P (A, B e C) foram aplicados  $90 \text{ kg.ha}^{-1}$  de ureia.

A capacidade de suprimento de P de cada ambiente foi obtida considerando-se a quantidade de P no solo de 0 a 40 cm, fornecida pela análise de solo (P disponível nas camadas de 0-20 cm e de 20 - 40 cm de profundidade) mais a quantidade de P suprida via fertilizante. Os demais tratos culturais foram realizados de acordo com recomendado para a cultura na região. Os experimentos receberam irrigação sempre que necessário, para evitar a ocorrência de estresse hídrico.

### 4.3. Características avaliadas

As características avaliadas, em todos os experimentos, foram:

- Florescimento (FLOR), em dias: número de dias decorridos do plantio até o florescimento de 50% das plantas da parcela;
- Altura de Plantas (AP), em cm: média da altura de plantas competitivas de cada parcela, do nível do solo até a ponta da panícula;
- Produtividade de grãos (PG), em  $\text{kg.ha}^{-1}$ : obtida por meio do peso de grãos da parcela experimental corrigido para área de um hectare.

Para as faixas (A, B e C) com estresse de P foi tomada a medida de peso fresco da palhada (MFPa). No momento da colheita, oito plantas, representativas de cada parcela, foram cortadas rente ao solo e a sua massa determinada (incluindo colmos e folhas). De cada parcela, foram retiradas amostras representativas de grãos. As amostras foram secas em estufa com ventilação forçada a 65 °C até peso constante, para determinação da porcentagem de matéria seca de grãos e de palhada. Posteriormente, as amostras foram moídas, homogeneizadas e retiradas alíquotas para análise. O teor de P nos grãos e na palhada foi obtido em laboratório de análises químicas de plantas pelo método espectrofotométrico do azul de molibdênio (SILVA, 1999).

Com base nos trabalhos de PARENTONI (2008), conduzidos em campo e em laboratório foi possível obter as seguintes características para o ambiente com estresse de P que compreende as faixas A, B e C:

- Teor de P nos grãos (TPG) em  $\text{g.kg}^{-1}$ ;
- Teor de P na palhada (TPPa) em  $\text{g.kg}^{-1}$ ;
- Massa seca de grãos (MSG) em  $\text{kg.ha}^{-1}$ , obtida pelo produto entre PG e porcentagem de matéria seca de grãos;
- Massa seca de palhada (MSPa) em  $\text{kg.ha}^{-1}$ , obtida pelo produto entre MFPa e porcentagem de matéria seca de palhada;

- Quantidade de P nos grãos (QPG)  $\text{kg.ha}^{-1}$ , obtida pelo produto entre MSG e porcentagem de P na MSG;
- Quantidade de P na palhada (QPPa)  $\text{kg.ha}^{-1}$ , obtida pelo produto entre massa seca da palhada (MSPa) e porcentagem de P na MSPa;
- Quantidade total de P na parte aérea (PTOT) expressa em  $\text{kg.ha}^{-1}$ , obtida pela expressão  $\text{QPG} + \text{QPPa}$ .
- Quociente de utilização de P ( $Q_{\text{UTIL}}$ ): equivale a “unidades de massa seca de grãos por unidade de P nos grãos”, expresso em  $\text{kg.kg}^{-1}$ .
- Índice de colheita de P ( $I_{\text{CP}}$ ) que equivale a “unidades de P nos grãos por unidade de P na parte aérea” expresso em  $\text{kg.kg}^{-1}$ .

#### 4.3.1. Estimativas dos índices de eficiência ao fósforo

Para determinar a eficiência no uso de P foram utilizados os índices de eficiência propostos por MOLL et al. (1982). Neste estudo a quantidade de fósforo no solo, disponível para a planta e para cada ambiente, foi obtida pelos resultados da análise de solo e somada à quantidade de P aplicada. Foram definidos três tipos de eficiência do nutriente de acordo com PARENTONI et al. (2011):

- Eficiência de aquisição ( $E_{\text{AQ}}$ ), definida como a capacidade do genótipo de absorver o P disponível no solo, correspondendo a kg de P na planta (PTOT) por kg de P disponível no solo ( $P_s$ ), obtida pela expressão:

$$E_{\text{AQ}} = \text{PTOT} / \text{OS}$$

- Eficiência de utilização interna ( $E_{\text{UTIL}}$ ), 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 (MSG), por kg de P na planta, obtida pela expressão:

$$E_{UTIL} = MSG / PTOT$$

- Eficiência de uso de P ( $E_{USO}$ ), definida como o produto das eficiências de aquisição e utilização interna de P, correspondendo à massa seca de grãos (em kg) produzida por kg de P disponível no solo, obtida pela expressão:

$$E_{USO} = E_{AQ} \times E_{UTIL} \text{ ou } E_{USO} = MSG / OS$$

Os índices de eficiência ao P foram obtidos somente para o ambiente com baixa disponibilidade de P.

#### 4.4. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Inicialmente foram realizadas análises de variância agrupadas para cada ambiente, segundo o modelo:

$$Y_{tklw} = m + b_{k(lw)} + r_{l(w)} + s_w + t_f + sp_{wtf} + e_{tklw} \text{ em que:}$$

$Y_{fklw}$ : observação referente ao tratamento f avaliada no bloco k dentro da repetição l dentro do experimento w;

$m$ : média geral do experimento;

$b_{k(lw)}$ : efeito do bloco k dentro da repetição l dentro do experimento w ( $k = 1, \dots, 9$ );

$r_{l(w)}$ : efeito da repetição l dentro do experimento w ( $l = 1, \dots, 3$ );

$s_w$ : efeito do experimento w ( $w = 1, \dots, 3$ );

$t_f$ : efeito do tratamento f ( $f = 1, \dots, 245$ );

$st_{wtf}$ : efeito da interação do experimento w com o tratamento f;

$e_{fklw}$ : erro experimental.

Em seguida, verificou-se se os quadrados médios dos erros obtidos em cada ambiente eram homogêneos, por meio do teste F de Hartley (SNEDECOR & COCHRAN, 1978). Como os erros foram homogêneos, pôde-se realizar análise conjunta considerando os ambientes sem estresse e com estresse de P, de acordo com o seguinte modelo:

$$Y_{tklwn} = m + b_{k(lw)} + r_{l(w)} + a_n + s_w + t_f + as_{nw} + ta_{fn} + sta_{wfn} + e_{tklwn} \text{ em que:}$$

$y_{tklwn}$ : observação referente ao tratamento f avaliada no bloco k dentro da repetição l dentro do experimento w no ambiente n;

$m$ : média geral do experimento;

$b_{k(lw)}$ : efeito do bloco k dentro da repetição l dentro do experimento w dentro do ambiente n ( $k = 1, \dots, 9$ );

$r_{l(w)}$ : efeito da repetição l dentro do experimento w dentro do ambiente n ( $l = 1, \dots, 3$ );

$a_n$ : efeito do ambiente n ( $n = 1, 2$ ).

$s_w$ : efeito do experimento w ( $w = 1, \dots, 3$ );

$t_f$ : efeito do tratamento f ( $f = 1, \dots, 245$ );

$as_{nw}$ : efeito da interação ambiente n com experimento w;

$ta_{fn}$ : efeito da interação tratamento com ambiente n;

$sta_{wfn}$ : efeito da interação do tratamento f com experimento w no ambiente n;

$\bar{e}_{tklwn}$ : erro experimental médio

Posteriormente à realização das análises de variância, foi feito o teste de agrupamento de Scott-Knott, a 1% de probabilidade, em que se utilizaram as médias ajustadas dos tratamentos (linhagens) com recuperação da informação interbloco de cada ambiente utilizando o programa computacional GENES (CRUZ, 2006). As análises de variância foram realizadas com o auxílio programa (SAS, 1999).

#### 4.4.1. Correlações fenotípicas, genotípicas e análise de trilha

A matriz de correlação fenotípica entre as características foi determinada a partir da análise de variância dos dados originais, utilizando-se estimador do coeficiente de Pearson. Os coeficiente de correlações fenotípica ( $r_F$ ) e genotípicas ( $r_G$ ) foram obtidos para todas as variáveis avaliadas nos ambientes com e sem estresse de P, utilizando-se as seguintes expressões (CRUZ et al., 2004).

$$r_F = \frac{COV_{F(X,Y)}}{\sqrt{(\sigma_{F_x}^2 \cdot \sigma_{F_y}^2)}}$$

$$r_G = \frac{COV_{G(X,Y)}}{\sqrt{(\sigma_x^2 \cdot \sigma_y^2)}}$$

Em que:

$COV_{F(x,y)}$  corresponde às covariâncias fenotípicas entre os caracteres X e ;

$\sigma_{F_x}^2$  corresponde à variância fenotípica do caráter X;

$\sigma_{F_y}^2$  corresponde à variância fenotípica do caráter Y;

$COV_{G(x,y)}$  corresponde às covariâncias genotípicas entre os caracteres X e Y;

$\sigma_x^2$  corresponde à variância genotípica do caráter X e

$\sigma_y^2$  corresponde à variância genotípica do caráter Y;

As correlações genotípicas foram desdobradas pela análise de trilha em estimativas dos efeitos diretos e indiretos. Os coeficientes de trilha foram estimados segundo a metodologia proposta por LI (1975). Utilizou-se o programa computacional Genes (CRUZ, 2006) para a avaliação da significância das correlações e utilizou-se o teste t para as correlações fenotípicas e genotípicas, segundo a metodologia proposta por STEEL & TORRIE (1980).

Foi realizado o teste de multicolinearidade nas variáveis explicativas, com base no número de condições (NC) estabelecido por MONTGOMERY & PECK (2001), sendo  $NC < 100$  fraca (não constitui problema sério);  $100 < NC < 1000$ , moderada a forte,  $>$

1000, severa. Com o efeito da multicolinearidade detectado, realizou-se a análise de trilha pelo método de regressão em crista.

#### 4.4.2. Índices de eficiência

As importâncias relativas da eficiência de aquisição ( $E_{AQ}$ ) e da eficiência de utilização interna de P ( $E_{UTIL}$ ) para a eficiência de uso ( $E_{USO}$ ) foram determinadas pela metodologia proposta por MOLL et al. (1982), apresentada por PARENTONI (2008). Foi utilizada transformação logarítmica para os índices de eficiência, dessa forma foram obtidas, para cada parcela, as variáveis:

$$\begin{aligned} Y &= \text{Log}_{E_{USO}}; \\ X_1 &= \text{Log}_{E_{AQ}}; \text{ e} \\ X_2 &= \text{Log}_{E_{UTIL}}. \end{aligned}$$

Posteriormente foram determinadas as variáveis  $y$ ,  $x_1$  e  $x_2$ , definidas, respectivamente, como os desvios das médias de  $Y$ ,  $X_1$  e  $X_2$ .

A importância relativa de cada índice para eficiência de uso foi obtida pelas seguintes expressões:

$$\frac{E_{AQ}}{E_{USO}} = r_{x_1y} \times \frac{s_{x_1}}{s_y}; \text{ e, } \frac{E_{UTIL}}{E_{USO}} = r_{x_2y} \times \frac{s_{x_2}}{s_y}, \text{ em que:}$$

$r_{x_1y}$  é o coeficiente de correlação entre as variáveis  $x_1$  e  $y$ ;

$r_{x_2y}$  é o coeficiente de correlação entre as variáveis  $x_2$  e  $y$ ;

$s_y$  é o desvio padrão da variável  $y$ .

$s_{x_1}$  é o desvio padrão da variável  $x_1$ ;

$s_{x_2}$  é o desvio padrão da variável  $x_2$ .

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Caracterização dos ambientes de avaliação

Os resultados das análises de solo referentes aos ambientes onde os experimentos foram conduzidos estão descritos na Tabela 1. A adubação de P no ambiente sem estresse de P proporcionou uma diferença média de 85,00 kg.ha<sup>-1</sup> na disponibilidade desse nutriente entre os ambientes. A caracterização prévia das áreas experimentais foi uma etapa importante nesse trabalho, pois possibilitou a escolha dos ambientes mais uniformes para instalação dos ensaios.

**TABELA 1.** Níveis de pH, Al, Ca, Mg, K e P no solo das áreas experimentais com e sem estresse de P, para as profundidades de 0 – 20 e 20 - 40 cm, e quantificação de P suprido pelo solo, P suprido via fertilizante e P total disponível no perfil do solo, Sete Lagoas – MG, 2010.

| Ambiente | Perfil<br>cm | pH<br>H <sub>2</sub> O | Al<br>--- | Ca<br>cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> --- | Mg<br>--- | K<br>--- | P<br>mg.kg <sup>-1</sup> --- | P<br>Solo | P<br>Adubo*<br>kg.ha <sup>-1</sup> ----- | P<br>Total<br>----- |
|----------|--------------|------------------------|-----------|-----------------------------------------------|-----------|----------|------------------------------|-----------|------------------------------------------|---------------------|
| Baixo P  | 0 - 20       | 5,0                    | 0,8       | 1,2                                           | 0,24      | 119,1    | 5,4                          | 10,9      | -                                        | 16,9                |
|          | 20 - 40      | 4,8                    | 1,1       | 0,76                                          | 0,11      | 41,8     | 3,7                          | 6,0       | -                                        |                     |
| Alto P   | 0 - 20       | 5,7                    | 0,1       | 3,5                                           | 0,9       | 223,2    | 22,2                         | 45,7      | 30,5                                     | 101,9               |
|          | 20 - 40      | 5,4                    | 0,4       | 2,0                                           | 0,5       | 166,4    | 12,8                         | 25,7      |                                          |                     |

\* 250 kg.ha<sup>-1</sup> de 8-28-16 aplicado no sulco de plantio – 30,5 kg P.ha<sup>-1</sup>, pH (potencial hidrogeniônico), Al (alumínio), Ca (cálcio), Mg (magnésio), K (potássio) e P (fósforo).

### 5.2. Análises de variância

O resumo das análises de variância agrupadas referentes às características florescimento (FLOR), altura de plantas (AP) e produtividade de grãos (PG) para os ambientes com e sem estresse de P estão apresentadas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Verificou-se, primeiramente, que a precisão experimental, obtida através do coeficiente de Variação (CV%), variou entre as características, sendo observadas

maiores estimativas no ambiente com estresse de P para as características FLOR, AP e PG quando comparadas com as estimativas obtidas no ambiente sem estresse de P (Tabela 2). Esses resultados encontrados estão de acordo com o aqueles obtidos por BANZIGER et al. (2000). Em condições de estresse, a precisão experimental tende a diminuir, pois há maior heterogeneidade do ambiente entre as parcelas. No presente trabalho, nas condições de estresse de P, as características FLOR e AP apresentaram estimativas de CV menores que 20%, estas estimativas podem ser consideradas boas. O mesmo ocorreu no ambiente sem estresse de P onde as características FLOR, AP e PG obtiveram os mesmos resultados observados para FLOR e AP no ambiente com estresse de P. A característica PG obtida no ambiente com estresse de P foi a única característica com valor de CV acima de 20%, valor este considerado acima do recomendado para a cultura do sorgo, porém, a alta heterogeneidade das faixas A, B e C, onde cada uma das três repetições foi implantada, respectivamente, influenciou diretamente na precisão experimental, fazendo com que o CV obtido fosse de 29,48%, esta estimativa está de acordo com o relatado para essa característica por RODRIGUES (2010).

**TABELA 2.** Resumo das análises de variâncias para as características florescimento (FLOR), altura de plantas (AP) e produtividade de grãos (PG). Sete Lagoas – MG, avaliadas em ambientes com estresse de P, 2011.

| Fonte de Variação                | GL  | Quadrados Médios     |                     |                           |
|----------------------------------|-----|----------------------|---------------------|---------------------------|
|                                  |     | FLOR<br>Dias         | AP<br>cm            | PG<br>kg.ha <sup>-1</sup> |
| Bloco/Rep/E                      | 72  | 10,062               | 95,291              | 574336,00                 |
| Rep/E                            | 6   | 15,235               | 244,574             | 9305694,8                 |
| Experimento (E)                  | 2   | 2,932                | 2,932               | 1181550,00                |
| Tratamento (Trat.)               | 244 | 101,324**            | 982,827**           | 1253854,00**              |
| Trat. Regular/E                  | 240 | 100,660**            | 768,631**           | 1202967,2**               |
| Testemunha (Test.)               | 1   | 70,672**             | 211,265**           | 1388090,86**              |
| Trat. Regular vs. Test./E        | 3   | 61,997 <sup>NS</sup> | 17066,517**         | 3974881,24**              |
| Testemunha x E                   | 2   | 3450 <sup>NS</sup>   | 71450 <sup>NS</sup> | 343615,4 <sup>NS</sup>    |
| Resíduo                          | 564 | 8,02                 | 72,780              | 358022,9                  |
| Média                            |     | 75                   | 110                 | 2029,52                   |
| CV (%)                           |     | 3,78                 | 7,71                | 29,48                     |
| h <sup>2</sup> Trat. (%)         |     | 92,06                | 92,59               | 71,00                     |
| h <sup>2</sup> Trat. Regular (%) |     | 92,08                | 90,53               | 70,00                     |

\*, \* significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo teste de F.

Para as fontes de variação tratamentos e tratamentos regulares, diferenças significativas ( $p \leq 0,01$ ) foram observadas para todas as características avaliadas nos

ambientes com estresse de P (Tabela 3) e sem estresse de P (Tabela 3). Conclui-se, portanto, que houve variabilidade genética entre as linhagens, condição essa imprescindível para trabalhos desta natureza. Além disso, as altas estimativas de herdabilidade ( $h^2$ ) confirmaram a variabilidade genética entre as linhagens. A  $h^2$  é um dos parâmetros genéticos mais importantes para o trabalho do melhorista, pois possui um papel preditivo expressando a confiança do valor fenotípico como indicador do valor reprodutivo. Entre as características avaliadas para as fontes de variação tratamentos e tratamentos regulares, a  $h^2$  variou de 97%, em AP no ambiente sem estresse de P, a 70% em PG no ambiente com estresse de P. É comumente relatado que estimativas de  $h^2$  são menores em ambiente com estresse, isso ocorre devido a menor precisão experimental e concorda com diversos trabalhos (RODRIGUES, 2010; BRANCOURT-HUMEL et al., 2005). Houve diferença mínima entre as estimativas de  $h^2$  entre as fontes de variação (FV) tratamentos e tratamentos regulares, sendo que junto à FV tratamentos estão incluídas as testemunhas. De forma geral, as estimativas obtidas nesse trabalho foram consideradas de alta magnitude e podem ser devido ao bom nível de variabilidade genética entre as linhagens.

**TABELA 3.** Resumo das análises de variâncias para as características florescimento (FLOR), altura de plantas (AP) e produtividade de grãos (PG). Sete Lagoas – MG, avaliadas em ambientes sem estresse de P, 2011.

| Fonte de Variação         | GL  | Quadrados Médios    |                     |                           |
|---------------------------|-----|---------------------|---------------------|---------------------------|
|                           |     | FLOR<br>Dias        | AP<br>cm            | PG<br>kg.ha <sup>-1</sup> |
| Bloco/Rep/E               | 72  | 5,91024             | 76,902              | 2122196,0                 |
| Rep/E                     | 6   | 22,167              | 184,470             | 1365822,0                 |
| Experimento (E)           | 2   | 298,709             | 9,722               | 106700242,0               |
| Tratamento (Trat.)        | 244 | 101,445**           | 2425,620**          | 6960947**                 |
| Trat. Regular/E           | 240 | 100,534**           | 1728,723**          | 6657483,0**               |
| Testemunha (Test.)        | 1   | 90,376**            | 39,506**            | 36346281,0**              |
| Trat. Regular vs. Test./E | 3   | 239,430**           | 63197,71**          | 16315697,1**              |
| Testemunha x E            | 2   | 0,783 <sup>NS</sup> | 4,784 <sup>NS</sup> | 2504915,0 <sup>NS</sup>   |
| Resíduo                   | 564 | 5,456               | 69,313              | 1000578,0                 |
| Média                     |     | 68                  | 125                 | 6190,00                   |
| CV (%)                    |     | 3,44                | 6,21                | 16,12                     |
| $h^2$ Trat. (%)           |     | 94,57               | 95,99               | 85,69                     |
| $h^2$ Trat. Regular (%)   |     | 94,62               | 97,14               | 85,13                     |

\*\* significativo a 1% de probabilidade pelo teste de F e <sup>NS</sup> não significativo.

Houve diferenças significativas ( $p \leq 0,01$ ) para a FV testemunha em todas as características em ambos ambientes avaliados (Tabela 2 e Tabela 3). Esse resultado

indica existência de variabilidade entre as testemunhas (ATF13B e ATF14B) linhagens isogênicas para *Alt<sub>SB</sub>*. Observou-se que na interação testemunha com ambiente, para todas as características avaliadas nos ambientes com estresse e sem estresse de P, não houve diferença significativa ( $p \leq 0,01$ ), ou seja, as testemunhas não obtiveram comportamento diferente dentro de cada experimento, isso demonstra certa uniformidade entre os três experimentos avaliados tanto no ambiente com estresse de P quanto no ambiente sem estresse de P. Constatou-se que para a FV contraste tratamento regular vs. testemunha dentro de experimento houve diferença significativa ( $p \leq 0,01$ ), para todas as características avaliadas em ambos ambientes, com exceção apenas da característica FLOR no ambiente com estresse de P.

Para a característica florescimento (FLOR) foi observado, nos ambientes com e sem estresse de P, a média geral de 75 e 68 dias para o florescimento, respectivamente. Observou-se, portanto, um aumento no ciclo para as linhagens avaliadas em condições de estresse de P. Aumentos nos valores de florescimento têm sido associados com a maior susceptibilidade a diversos tipos de estresse, como seca (RIBAUT et al., 1996) e deficiência de P (PARENTONI, 2008), e ainda de acordo com os autores, início do florescimento é atrasado, o número de flores diminui e a formação de sementes é restrita.

Houve diferença de crescimento de 15 cm para a altura de plantas (AP) entre os ambientes sem e com estresse de P (Tabela 2 e Tabela 3), sendo que a média geral foi de 125 cm para o ambiente com estresse de P e 110 cm para o ambiente sem estresse de P. Na característica PG, obtida no ambiente com estresse de P (Tabela 2), a média geral foi de 2029,52 kg.ha<sup>-1</sup>, enquanto no ambiente sem estresse (Tabela 3) a média geral obtida foi 6190,00 kg.ha<sup>-1</sup>. Verificou-se, portanto, uma redução de 67,21% da PG considerando o ambiente sem estresse como referência. Resultados semelhantes foram obtidos em sorgo por SCHAFFERT et al. (2001) e RODRIGUES (2010) onde os autores obtiveram redução média de PG de 40%. PARENTONI et al. (2011) afirmam que para o estresse efetivo deve-se observar a redução no potencial produtivo de grãos

entre 40 e 60%, caso contrário a correlação entre os materiais genéticos avaliados com e sem P tende a ser alta.

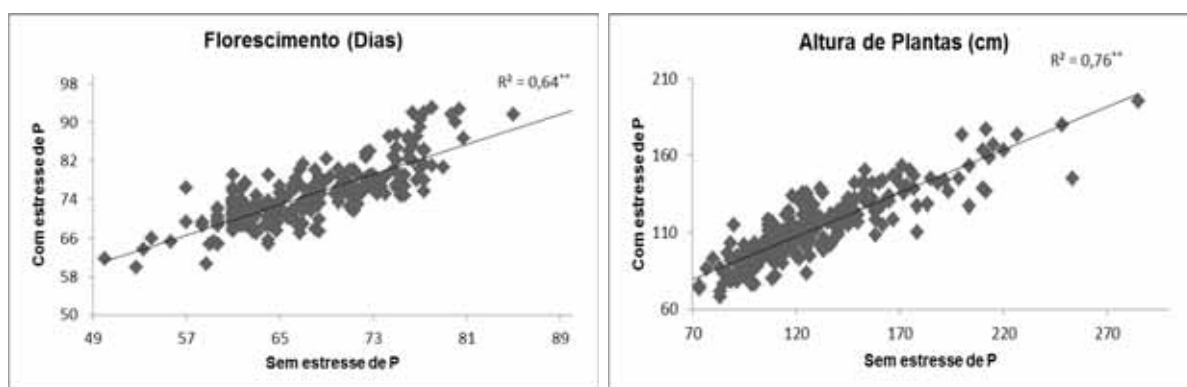
Na Tabela 4 estão apresentados os dados do resumo das análises de variâncias para as características florescimento (FLOR), altura de plantas (AP) e produtividade de grãos (PG). Na fonte de variação ambiente (Amb) houve diferenças significativas ( $p \leq 0,01$ ) para todas as características avaliadas, deste modo, os valores médios obtidos para cada uma das características avaliadas no ambiente sem estresse de P diferem dos valores médios obtidos no ambiente com estresse de P.

**TABELA 4.** Resumo das análises de variância conjunta para as características: florescimento (FLOR), altura de plantas (AP) e produtividade de grãos (PG), avaliadas em ambientes com e sem estresse de P. Sete Lagoas – MG, 2011.

| Fonte de Variação                | GL   | Quadrados Médios     |                      |                         |
|----------------------------------|------|----------------------|----------------------|-------------------------|
|                                  |      | FLOR                 | AP                   | PG                      |
|                                  |      | Dias                 | Cm                   | kg.ha <sup>-1</sup>     |
| Bloco/Amb/E/Rep.                 | 144  | 798656,00            | 86096,00             | 1348265,00              |
| Rep/Amb/Exp.                     | 12   | 1870146,00           | 2145224,00           | 5335775,00              |
| Ambiente (Amb)                   | 1    | 19674,971**          | 101876,69**          | 6432994337,00**         |
| Exp. (E)                         | 2    | 122,333**            | 10,262 <sup>NS</sup> | 5981516,00**            |
| Amb. x E                         | 2    | 179,308**            | 2,392 <sup>NS</sup>  | 5870208,00**            |
| Tratamento (Trat.)               | 244  | 184,984**            | 2981,725**           | 5111469**               |
| Trat. Regular/E                  | 240  | 183,428**            | 2140,806**           | 4902894,0**             |
| Testemunhas (Test.)              | 1    | 160,444**            | 216,743**            | 25970230,00**           |
| Trat. Regular vs. Test./E        | 3    | 98,562*              | 65498,956**          | 12428295,4**            |
| Testemunhas x E                  | 2    | 1,037 <sup>NS</sup>  | 44,058 <sup>NS</sup> | 504027,00 <sup>NS</sup> |
| Tratamento x Amb                 | 244  | 17,785**             | 426,722**            | 3103340,00**            |
| Trat. Regular x Amb/E            | 240  | 17,766**             | 356,557**            | 2957567,00**            |
| Testemunhas x Amb                | 1    | 0,604 <sup>NS</sup>  | 34,027 <sup>NS</sup> | 11764294,00**           |
| Trat. Regular vs. Test. x Amb/E  | 3    | 17,923 <sup>NS</sup> | 5481,722**           | 7862212,1**             |
| Test. x E x Amb                  | 2    | 3,197 <sup>NS</sup>  | 32,175 <sup>NS</sup> | 234472,00 <sup>NS</sup> |
| Resíduo médio                    | 1128 | 6,741                | 66,547               | 679299,0                |
| Média                            |      | 71                   | 118                  | 4110,0                  |
| CV (%)                           |      | 3,63                 | 6,92                 | 20,05                   |
| h <sup>2</sup> Trat (%)          |      | 90,3                 | 85,6                 | 39,2                    |
| h <sup>2</sup> Trat. Regular (%) |      | 90,4                 | 83,3                 | 39,6                    |

\*, \* significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo teste de F e <sup>NS</sup> não significativo.

Para as fontes de variação tratamento, tratamento regular/E e testemunha foram observadas diferenças significativas ( $p \leq 0,01$ ) para todas as características (Tabela 4). Esses resultados confirmam a existência de variabilidade genética nas linhagens avaliadas nos ambientes contrastantes, o que já era esperado, pois, durante as avaliações das características FLOR, AP e PG, foi notória a diferença entre as linhagens dentro dos ambientes e entre os ambientes (Figura 4). RODRIGUES (2010) obteve resultados semelhantes e atribuiu os resultados ao conjunto dos ambientes. Segundo o autor, tanto os efeitos aditivos como os de dominância foram importantes para explicar a variação genética entre os tratamentos avaliados nos ambientes contrastantes.



**FIGURA 4.** Gráficos de dispersão das características Florescimento (dias) e altura de plantas (cm) em ambientes com e sem estresse de P, com os respectivos coeficientes de correlação ambiental ( $r$ ) e  $r^2$  significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de t.

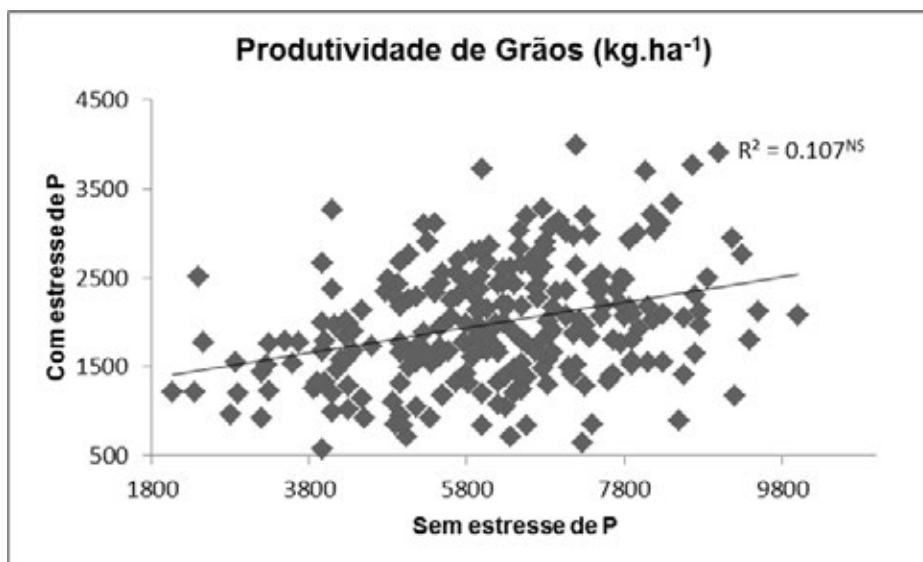
Na avaliação da fonte de variação experimento (E), houve diferença significativa ( $p \leq 0,01$ ) para as características avaliadas, com exceção de AP. O mesmo ocorreu para a interação ambiente e experimento (Tabela 4). Neste caso de interação, os experimentos que apresentaram um bom desempenho no ambiente sem estresse de P não apresentaram o mesmo comportamento para o ambiente com estresse de P. Não houve diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) para a interação testemunhas x experimento para todas as características, portanto as testemunhas obtiveram comportamento semelhante em ambos os experimentos avaliados nos ambientes com e sem P. Já para a interação de tratamentos regulares por ambientes/E, foram observadas diferenças

significativas ( $p \leq 0,01$ ) para todas as características. Assim, as linhagens que apresentaram bom desempenho para o ambiente sem estresse de P não apresentaram, necessariamente, o mesmo desempenho para o ambiente com estresse de P. Não houve diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) para a interação testemunha x ambiente, com exceção apenas das características PG. Neste caso observou-se que as testemunhas tiveram valores médios diferentes entre os ambientes contrastantes para fósforo. Na fonte de variação interação tripla testemunha x experimento x ambiente não foi observada diferença significativa ( $p > 0,05$ ) para nenhuma das características avaliadas.

No contraste tratamento regular vs. testemunha dentro de experimento houve diferença significativa ( $p \leq 0,01$  e  $0,05$ ) para todas as características avaliadas em ambos os ambientes, com exceção apenas da característica FLOR no ambiente com estresse de P. O mesmo ocorreu na fonte de variação do contraste de tratamento regular vs. testemunha interagida com ambiente/E, com exceção apenas da característica FLOR, ou seja, não houve diferença de florescimento entre os tratamentos regulares e as testemunhas nos ambientes contrastantes dentro de cada experimento (Tabela 4).

As estimativas dos coeficientes de variação (CV%) foram de baixa e média magnitude para todas as características avaliadas, sugerindo, assim, uma boa precisão experimental (Tabela 4). As estimativas de herdabilidade média ( $h^2$ ) obtiveram alta magnitude em todas as características avaliadas, tanto para os tratamentos como para os tratamentos regulares, com exceção da característica PG, em que a estimativa da  $h^2$  média foi de baixa magnitude (39,2 e 39,6 para tratamento e tratamento regular, respectivamente). Esses resultados de  $h^2$  foram diferentes daqueles obtidos quando se avaliou a característica PG em cada ambiente com e sem estresse de P separadamente, tanto para tratamento como para tratamento regular. Portanto, existe uma grande diversidade genética entre as linhagens e elas apresentaram comportamentos diferentes quando avaliadas em ambientes contrastantes (Figura 5). Diante dos baixos valores obtidos de  $h^2$  na análise conjunta para a característica PG,

recomenda-se que a seleção das linhagens baseada nesta característica, seja realizada através da análise de variância individual, ou seja, a análise de variância realizada para cada ambiente individualmente com e sem estresse de P (Tabela 3 e 4).



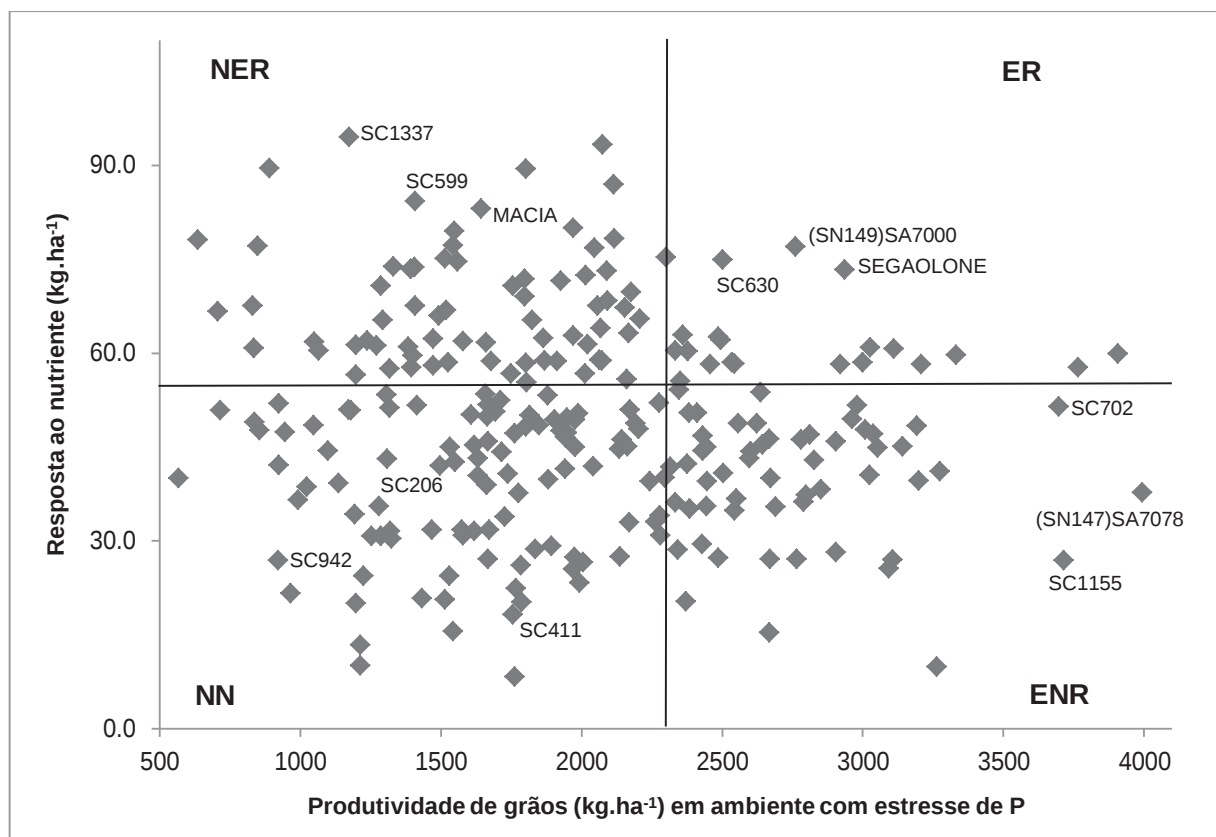
**FIGURA 5.** Gráfico de dispersão da característica produtividade de grãos ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) em ambiente com e sem estresse de P e com o respectivo coeficiente de correlação ambiental ( $r$ )<sup>NS</sup>, não significativo pelo teste de t.

Na Figura 6, observou-se a representação gráfica de eficiência e resposta ao P de acordo com a metodologia proposta por FAGERIA et al. (1993) das 245 linhagens de sorgo. Foram identificadas 20 linhagens eficientes e responsivas (ER), 67 linhagens não eficientes e responsivas (NER), 101 linhagens não eficientes e não responsivas (NN) e 57 linhagens eficientes e não responsivas (ENR).

As linhagens classificadas como ER, representam as linhagens que produziram acima da média das 245 linhagens avaliadas em condições de estresse de P e responderam bem ao incremento na produção no ambiente sem estresse de P. As linhagens (SN149)SA7000, Segalane e SC630 são classificadas nesse grupo (Figura 6).

As linhagens classificadas como ENR, representam as linhagens que produziram acima da média das 245 linhagens de sorgo, avaliadas em condições de estresse de P,

mais não responderam ao nível desse nutriente. As linhagens que representam esse grupo são: SC702, (SN147)SA7078 e SC1155 (Figura 6).



**FIGURA 6.** Representação gráfica da eficiência e resposta ao P: ER: eficiente e responsivo, NER: não eficiente e responsivo, NN: não eficiente e não responsivo e ENR: eficiente e não responsivo.

Linhagens classificadas como NER, representam as linhagens que produziram abaixo da média das 245 linhagens de sorgo, avaliadas em condições de estresse de P, mais apresentaram apreciável incremento de produção no ambiente sem estresse de P. As linhagens SC3137, MACIA e SC599 representam esse grupo (Figura 6).

As linhagens classificadas como NN, representam as linhagens que produziram abaixo da média das 245 linhagens de sorgo, avaliadas em condições de estresse e sem estresse de P. As linhagens que representam este grupo são: SC411, SC942 e SC206 (Figura 6).

### 5.3. Análises de variância para os índices de eficiência ao fósforo

As análises de variância para as características eficiência de uso de P ( $E_{USO}$ ), eficiência de aquisição ( $E_{AQ}$ ), eficiência de utilização interna ( $E_{UTIL}$ ), teor de P nos grãos (TPG), quociente de utilização de P ( $Q_{UTIL}$ ) e índice de colheita de P ( $I_{CP}$ ) estão apresentadas na Tabela 5. No presente trabalho, os índices de eficiência ao P foram avaliados somente para os ambientes com estresse de P. RODRIGUES (2010) e MENDES (2012), verificaram que, em ambiente sem estresse de P, não foi possível discriminar os genótipos eficientes e ineficientes, classificados previamente em condições de estresse. Além disso, esses autores verificaram alta correlação entre os índices avaliados em ambientes contrastantes ao P, indicando interação predominantemente do tipo simples e, portanto, sem alteração na classificação dos genótipos nos diferentes ambientes.

**TABELA 5.** Resumo das análises de variância para as características: eficiência de uso de P ( $E_{USO}$ ); eficiência de aquisição ( $E_{AQ}$ ); eficiência de utilização interna de P ( $E_{UTIL}$ ); teor de fósforo nos grãos (TPG); quociente de utilização de P ( $Q_{UTIL}$ ) e; índice de colheita de P ( $I_{CP}$ ). Sete Lagoas - MG, ambiente com estresse de , 2011.

| Fonte de Variação                | GL  | Quadrados Médios               |                     |                        |                     |                                |                      |
|----------------------------------|-----|--------------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|--------------------------------|----------------------|
|                                  |     | $E_{USO}$                      | $E_{AQ}$            | $E_{UTIL}$             | TPG                 | $Q_{UTIL}$                     | $I_{CP}$             |
|                                  |     | -----kg.kg <sup>-1</sup> ----- |                     |                        | g.kg <sup>-1</sup>  | -----kg.kg <sup>-1</sup> ----- |                      |
| Bloco/Rep/E                      | 72  | 1314,460                       | 0,035               | 3034,848               | 0,312               | 2838,761                       | 0,013                |
| Rep/E                            | 6   | 5592,230                       | 0,148               | 13111,808              | 2,882               | 21457,471                      | 0,090                |
| Experimento (E)                  | 2   | 3135,710                       | 0,043               | 1009,124               | 0,250               | 1090,598                       | 0,039                |
| Tratamento (Trat.)               | 244 | 2837,920**                     | 0,043**             | 5190,319**             | 0,494**             | 3527,958**                     | 0,023**              |
| Trat. Regular/E                  | 240 | 2732,489**                     | 0,042**             | 5243,830**             | 0,490**             | 3488,649**                     | 0,023**              |
| Testemunha (Test.)               | 1   | 2731,409 <sup>NS</sup>         | 0,022 <sup>NS</sup> | 1651,093 <sup>NS</sup> | 0,537 <sup>NS</sup> | 2921,477 <sup>NS</sup>         | 0,0002 <sup>NS</sup> |
| Trat. Regular vs. Test./E        | 3   | 8396,237**                     | 0,145**             | 521,914 <sup>NS</sup>  | 0,076 <sup>NS</sup> | 973,392 <sup>NS</sup>          | 0,028 <sup>NS</sup>  |
| Testemunha x E                   | 2   | 749,362 <sup>NS</sup>          | 0,024 <sup>NS</sup> | 92,273 <sup>NS</sup>   | 0,02 <sup>NS</sup>  | 232,443 <sup>NS</sup>          | 0,002 <sup>NS</sup>  |
| Resíduo                          | 564 | 814,803                        | 0,015               | 1076,830               | 0,103               | 1027,280                       | 0,007                |
| Média                            |     | 96,44                          | 0,42                | 232,28                 | 3,44                | 296,65                         | 0,78                 |
| CV(%)                            |     | 29,59                          | 29,62               | 14,12                  | 9,30                | 10,80                          | 11,20                |
| h <sup>2</sup> Trat. (%)         |     | 71,28                          | 65,03               | 79,25                  | 79,45               | 70,88                          | 68,83                |
| h <sup>2</sup> Trat. Regular (%) |     | 70,18                          | 64,29               | 79,46                  | 79,14               | 70,55                          | 68,83                |

\*\* significativo a 1% de probabilidade pelo teste de F e <sup>NS</sup> não significativo.

Foi observado que, para as estimativas de coeficiente de variação experimental (CV%) houve variação entre características. Observaram-se menores estimativas de CV% para  $Q_{UTIL}$ , TPG,  $E_{UTIL}$  e  $I_{CP}$ , e estimativas de CV% com maiores magnitudes para  $E_{AQ}$  e  $E_{USO}$  (Tabela 5), os resultados obtidos estão de acordo com os reportados na literatura para essas características (RODRIGUES, 2010; MENDES, 2012).

Foram observadas diferenças significativas ( $p \leq 0,01$ ) para o efeito de tratamentos e tratamentos regulares/E para todas as características  $E_{USO}$ ,  $E_{AQ}$ ,  $E_{UTIL}$ , TPG,  $Q_{UTIL}$  e  $I_{CP}$  (Tabela 5), confirmando assim a variabilidade genética existente entre as linhagens, do mesmo modo que ocorreu para as variáveis: FLOR, AP e PG. As linhagens que apresentaram maiores estimativas de  $E_{USO}$  mostraram uma maior capacidade de adquirir o P do solo e também uma capacidade de utilização mais eficiente do P adquirido. Esses resultados indicam que uma melhor eficiência de uso pode ser obtida em linhagens de sorgo tanto via aumento da eficiência de aquisição, quanta eficiência de utilização interna de P pela planta. Para a fonte de variação (FV) testemunha não houve diferença significativa ( $p \leq 0,01$ ) em nenhuma das características avaliadas, o mesmo ocorreu para a interação entre testemunha e experimento. Para o contraste entre tratamento regular vs. testemunha/E houve somente diferenças significativas ( $p \leq 0,01$ ) para  $E_{USO}$  e  $E_{AQ}$ .

A estimativa de herdabilidade de tratamento e tratamento regular, para a eficiência de uso de P, foi de alta magnitude, indicando que a maior parte da variabilidade fenotípica observada entre as linhagens foi devida a causas genéticas. Entre os índices que compõem a eficiência de uso de P, a eficiência de aquisição apresentou menor estimativa de herdabilidade, apresentando, portanto, maior efeito ambiental em relação à eficiência de utilização interna. Baseando-se na metodologia proposta por MOLL et al. (1982), realizou-se o cálculo das importâncias relativas da  $E_{AQ}$  para  $E_{USO}$  e  $E_{UTIL}$  para  $E_{USO}$ . Os seguintes resultados foram obtidos: a  $E_{AQ}$  para  $E_{USO}$  apresentou um valor de 70,0%, enquanto que para  $E_{UTIL}$  foi observada importância relativa de 30,0% (Tabela 6). Resultados semelhantes com a cultura do milho foram obtidos por MENDES (2012).

**TABELA 6.** Importância relativa da eficiência de aquisição ( $E_{AQ}$ ) e eficiência de utilização interna de P ( $E_{UTIL}$ ) para a eficiência de uso de P ( $E_{USO}$ ). Sete Lagoas - MG, ambiente com estresse de P, 2011.

| Característica                                          | $r_{x,y}$ | $s_{x_i}/s_y$ | Importância relativa para $E_{USO}$ (%) |
|---------------------------------------------------------|-----------|---------------|-----------------------------------------|
| Eficiência de aquisição – $E_{AQ}$ ( $x_1$ )            | 0,828     | 0,846         | 70,0                                    |
| Eficiência de utilização interna – $E_{UTIL}$ ( $x_2$ ) | 0,533     | 0,561         | 30,0                                    |

$r_{x,y}$ : correlação fenotípica entre as variáveis  $E_{AQ}$ ,  $E_{UTIL}$  com  $E_{USO}$ .

$s_{x_i}$ : desvio padrão para  $E_{AQ}$  e  $E_{UTIL}$ ;  $s_y$ : desvio padrão para  $E_{USO}$ .

A contribuição da  $E_{AQ}$  e  $E_{UTIL}$  para  $E_{USO}$  varia de acordo com a espécie vegetal e condições ambientais WANG et al. (2010). De acordo com STEENBJERG & JAKOBSEN (1963), uma explicação para o fato de que maiores eficiências de  $E_{AQ}$ ,  $E_{UTIL}$  e  $E_{USO}$  são observadas sob níveis mais baixos de um dado nutriente no solo, reporta-se a estudos com doses de um nutriente variando de baixas a altas, as curvas 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 sigmoide ou convexa. Esse formato faz com que os acréscimos em produção de grãos, advindos de aumentos constantes na dose aplicada do nutriente (kg de grão por kg de nutriente, ou  $E_{USO}$ ) e acréscimos de kg de nutriente absorvido por kg de nutriente aplicado ( $E_{AQ}$ ) tendam a ser decrescentes, ou seja, as eficiências de uso de aquisição tendem a serem maiores nas doses mais baixas do nutriente, diminuindo com o aumento da dose dele.

Estudos realizados com milho por MENDES (2012) verificaram que a  $E_{AQ}$  foi quase duas vezes mais importante que a  $E_{UTIL}$ , na variabilidade observada para a  $E_{USO}$  para os ambientes com baixa disponibilidade de P. Dados similares foram observados em sorgo, de acordo com Tabela 7. Com estes resultados programas de melhoramento sorgo que buscam desenvolver cultivares mais eficientes no uso de P devem dar maior atenção aos mecanismos envolvidos na eficiência de aquisição desse nutriente.

Várias características bioquímicas e fisiológicas estão envolvidas na maior eficiência de uso de P pelas plantas. Para eficiência de aquisição, as características mais importantes estão relacionadas à morfologia e arquitetura do sistema radicular

(WANG et al. 2010). A capacidade de exsudação de ácidos orgânicos e enzimas, como as fosfatases, e a associação simbiótica com microorganismos da rizosfera, também têm sido apontadas como mecanismos capazes de aumentar a eficiência de aquisição de P em plantas (WANG et al.; 2010).

Para a característica teor de P nos grãos - TPG (gramas de P por quilo de massa seca de grãos) foi observada uma média geral de  $3,44 \text{ g.kg}^{-1}$  (Tabela 6).

Na Tabela 7 do presente trabalho está a classificação de todas as linhagens realizadas pelo teste de Scott-Knott quanto à eficiência e ineficiência ao P, e também as médias agrupadas de todas as características relacionadas à eficiência. A classificação de genótipos eficiente e ineficientes é realizada de acordo com a produtividade de grãos, segundo FAGERIA & BARBOSA FILHO (1982). Segundo os autores, genótipos com produção de grãos acima da média geral, em condições de baixa disponibilidade de fósforo, são classificados como eficientes enquanto se considera como ineficientes aqueles que apresentarem produção de grãos abaixo da média geral. Das 245 linhagens de sorgo avaliadas, incluindo as duas testemunhas (ATF13B e ATF14B), 107 foram classificadas como eficientes e 138 linhagens, como ineficientes, de acordo com a Tabela 8. Notou-se que a produtividade de grãos das linhagens eficientes foi superior às linhagens ineficientes em  $1093,40 \text{ kg.ha}^{-1}$  ou 42%. Na eficiência de aquisição ( $E_{AQ}$ ), tida como a mais importante em relação à eficiência de uso de P ( $E_{USO}$ ), foi observada que a média desta característica, assim como a produtividade de grãos, foi superior nas linhagens eficientes, com valor médio de 0,51, contra 0,34 referentes às linhagens inferiores. Segundo PARENTONI (2008), a média recomendada para a  $E_{AQ}$  é em torno de 0,40 a 0,50, mais que isto, a  $E_{AQ}$  pode ser superestimada.

Para o restante das características avaliadas em condições de estresse de P, todas elas apresentaram médias superiores quando comparadas às linhagens eficientes com ineficientes (Tabela 7), com exceção apenas da característica TPG, que no caso das linhagens ineficientes tiveram valores médios de TPG superiores às linhagens eficientes. Esse resultado significa que as linhagens classificadas como eficientes ao P apresentaram valores de TPG menores, porém, com valores superiores de  $E_{AQ}$ ,  $E_{USO}$  e  $E_{UTIL}$ .

Os índices que compõem a eficiência de utilização interna são: índice de colheita de P –  $I_{CP}$  (quantidade de P nos grãos dividida pela quantidade de P total na parte aérea da planta) e o quociente de utilização de P -  $Q_{UTIL}$  (unidades de massa seca de grãos produzida por unidade de P nos grãos). Verificou-se que, para as linhagens de sorgo, a média obtida foi 78% para  $I_{CP}$ . Esse resultado significa dizer que 78% do P presente na parte aérea encontravam-se nos grãos. Já para  $Q_{UTIL}$  foi observada uma média geral de 297,70 kg produzidos de grãos por kg de P nos grãos (Tabela 5 e 7). As médias de  $Q_{UTIL}$  das linhagens de sorgo classificadas como eficientes e ineficientes ao P foram 307,09 e 289,29, respectivamente. O  $Q_{UTIL}$  das linhagens eficientes foi superior 5,8% ao das linhagens ineficientes, lembrando que ambas foram avaliadas em condições de estresse de P.

Para a característica produtividade de grãos (PG) o teste Scott Knott agrupou as 245 linhagens de sorgo classificadas quanto à eficiência e ineficiência ao P, em três grupos distintos, sendo que o grupo a envolveu as 34 linhagens mais produtivas e eficientes ao P (Tabela 7). Dentre estas 34 linhagens eficientes ao P, deve-se, destacar que as cinco primeiras linhagens de sorgo: (SN147)SA7078 COMBINE7078, BR007B, SC964, SC1155 e SC702, além de serem as linhagens mais produtivas, as mesmas também foram classificadas como eficientes e não responsivas ao P (ENR) (Figura 6), ou seja, elas produziram acima da média em condições de estresse de P, mas não responderam ao nível desse nutriente.

**TABELA 7.** Médias e classificação das linhagens de sorgo para as características produtividade de grãos (PG), classificação de linhagens quanto à eficiência de P (CL): eficiência de uso de P ( $E_{USO}$ ), eficiência de aquisição ( $E_{AQ}$ ), eficiência de utilização interna de P ( $E_{UTIL}$ ), teor de P no grão (TPG), quociente de utilização de P ( $Q_{UTIL}$ ), e índice de colheita de P ( $I_{CP}$ ) obtidas condições de estresse de P. Sete Lagoas – MG, 2011.

| Trat. | Pedigree                                | PG                  | CL | EF <sub>USO</sub> | EF <sub>AQ</sub>    | E <sub>UTIL</sub> | TPG                | Q <sub>UTIL</sub>   | I <sub>CP</sub> |   |      |   |        |   |      |   |
|-------|-----------------------------------------|---------------------|----|-------------------|---------------------|-------------------|--------------------|---------------------|-----------------|---|------|---|--------|---|------|---|
|       |                                         | kg.ha <sup>-1</sup> |    |                   | kg.kg <sup>-1</sup> |                   | g.kg <sup>-1</sup> | kg.kg <sup>-1</sup> |                 |   |      |   |        |   |      |   |
| 1     | (SN147)SA7078 COMBINE7078               | 3992,0              | a  | E                 | 190,63              | a                 | 0,70               | a                   | 272,52          | a | 3,37 | c | 300,82 | b | 0,91 | a |
| 83    | BR007B                                  | 3907,4              | a  | E                 | 182,12              | a                 | 0,74               | a                   | 245,41          | b | 3,33 | c | 302,70 | b | 0,81 | a |
| 68    | SC964                                   | 3765,7              | a  | E                 | 183,17              | a                 | 0,78               | a                   | 245,24          | b | 3,44 | c | 291,28 | b | 0,85 | a |
| 46    | SC1155                                  | 3714,8              | a  | E                 | 176,71              | a                 | 0,78               | a                   | 226,02          | b | 3,89 | b | 257,15 | c | 0,88 | a |
| 172   | SC702                                   | 3697,2              | a  | E                 | 178,26              | a                 | 0,68               | a                   | 266,46          | a | 3,23 | d | 309,81 | b | 0,86 | a |
| 198   | SC627                                   | 3330,9              | a  | E                 | 160,28              | a                 | 0,66               | a                   | 241,44          | b | 3,10 | d | 325,38 | b | 0,74 | a |
| 67    | SC641                                   | 3272,7              | a  | E                 | 155,51              | a                 | 0,58               | a                   | 269,70          | a | 3,15 | d | 319,23 | b | 0,85 | a |
| 14    | SC319                                   | 3262,7              | a  | E                 | 159,76              | a                 | 0,59               | a                   | 267,31          | a | 3,26 | d | 307,90 | b | 0,87 | a |
| 215   | SOBERANO                                | 3206,2              | a  | E                 | 155,51              | a                 | 0,68               | a                   | 231,46          | b | 3,18 | d | 314,93 | b | 0,74 | a |
| 72    | SC103                                   | 3197,5              | a  | E                 | 150,90              | a                 | 0,57               | a                   | 264,20          | a | 3,37 | c | 301,77 | b | 0,88 | a |
| 96    | SC979                                   | 3192,4              | a  | E                 | 154,07              | a                 | 0,66               | a                   | 235,55          | b | 3,29 | d | 304,86 | b | 0,77 | a |
| 25    | SC110                                   | 3140,7              | a  | E                 | 149,98              | a                 | 0,56               | a                   | 270,15          | a | 3,33 | c | 300,05 | b | 0,90 | a |
| 236   | (SN69)PI48770 WHITE KAFIR (ASA NO.21)   | 3109,1              | a  | E                 | 146,47              | a                 | 0,66               | a                   | 223,19          | b | 3,51 | c | 285,46 | c | 0,78 | a |
| 37    | SC328                                   | 3104,9              | a  | E                 | 146,06              | a                 | 0,58               | a                   | 261,49          | a | 3,41 | c | 294,31 | b | 0,89 | a |
| 41    | SC671                                   | 3092,6              | a  | E                 | 146,96              | a                 | 0,57               | a                   | 260,84          | a | 3,47 | c | 292,47 | b | 0,89 | a |
| 125   | SC623                                   | 3051,9              | a  | E                 | 144,30              | a                 | 0,54               | a                   | 265,30          | a | 3,20 | d | 314,95 | b | 0,84 | a |
| 6     | SC782                                   | 3035,8              | a  | E                 | 147,58              | a                 | 0,47               | a                   | 310,02          | a | 3,03 | d | 332,67 | b | 0,93 | a |
| 194   | ICSV400                                 | 3024,7              | a  | E                 | 139,97              | a                 | 0,53               | a                   | 271,27          | a | 3,03 | d | 338,71 | b | 0,81 | a |
| 61    | SC1328                                  | 3022,9              | a  | E                 | 143,59              | a                 | 0,54               | a                   | 268,52          | a | 3,30 | c | 305,95 | b | 0,88 | a |
| 212   | B.Tx378                                 | 3007,4              | a  | E                 | 144,55              | a                 | 0,52               | a                   | 270,22          | a | 3,09 | d | 328,55 | b | 0,83 | a |
| 171   | SC720                                   | 2998,2              | a  | E                 | 143,91              | a                 | 0,50               | a                   | 291,55          | a | 2,90 | d | 346,33 | b | 0,85 | a |
| 38    | B.DLO357                                | 2979,9              | a  | E                 | 143,15              | a                 | 0,55               | a                   | 267,85          | a | 3,38 | c | 296,57 | b | 0,90 | a |
| 91    | SC414_12                                | 2961,5              | a  | E                 | 139,76              | a                 | 0,58               | a                   | 238,80          | b | 3,24 | d | 310,11 | b | 0,78 | a |
| 214   | Segaolane                               | 2934,4              | a  | E                 | 140,73              | a                 | 0,56               | a                   | 251,36          | b | 3,09 | d | 326,40 | b | 0,77 | a |
| 190   | (SN72)FC13642 PINK KAFIR (ASA N°22)     | 2920,3              | a  | E                 | 136,38              | a                 | 0,75               | a                   | 180,20          | c | 4,06 | b | 246,55 | c | 0,73 | b |
| 217   | SC566                                   | 2903,7              | a  | E                 | 139,29              | a                 | 0,65               | a                   | 215,90          | b | 3,46 | c | 292,43 | b | 0,75 | a |
| 90    | SC112_14                                | 2902,9              | a  | E                 | 136,59              | a                 | 0,59               | a                   | 228,04          | b | 3,38 | c | 296,09 | b | 0,77 | a |
| 26    | SC648                                   | 2851,8              | a  | E                 | 136,01              | a                 | 0,49               | a                   | 277,24          | a | 3,15 | d | 318,41 | b | 0,87 | a |
| 73    | SC373                                   | 2825,5              | a  | E                 | 138,11              | a                 | 0,53               | a                   | 262,42          | a | 3,47 | c | 289,67 | b | 0,91 | a |
| 23    | SC124                                   | 2811,4              | a  | E                 | 135,02              | a                 | 0,62               | a                   | 217,72          | b | 4,11 | b | 243,35 | c | 0,89 | a |
| 101   | MR732                                   | 2797,1              | a  | E                 | 130,36              | b                 | 0,59               | a                   | 228,66          | b | 3,81 | c | 264,00 | c | 0,87 | a |
| 21    | SC637                                   | 2789,0              | a  | E                 | 132,93              | a                 | 0,46               | a                   | 292,56          | a | 3,05 | d | 328,75 | b | 0,89 | a |
| 233   | SRN39                                   | 2779,3              | a  | E                 | 132,03              | b                 | 0,56               | a                   | 236,34          | b | 3,44 | c | 290,51 | b | 0,82 | a |
| 86    | CMSXS116 (SC326-6)                      | 2763,6              | a  | E                 | 131,22              | b                 | 0,62               | a                   | 214,41          | b | 3,63 | c | 275,70 | c | 0,78 | a |
| 137   | (SN149)SA7000 CAPROCK (ASA N°88) Tx7000 | 2760,1              | a  | E                 | 128,52              | b                 | 0,44               | a                   | 286,79          | a | 2,95 | d | 342,84 | b | 0,84 | a |
| 226   | SC15                                    | 2689,6              | b  | E                 | 125,51              | b                 | 0,74               | a                   | 175,60          | c | 4,22 | b | 240,71 | c | 0,73 | b |
| 5     | SC984                                   | 2670,8              | b  | E                 | 130,13              | b                 | 0,51               | a                   | 255,90          | b | 3,44 | c | 290,61 | b | 0,88 | a |
| 44    | SC418                                   | 2670,0              | b  | E                 | 124,45              | b                 | 0,49               | a                   | 260,25          | b | 3,04 | d | 335,18 | b | 0,79 | a |
| 110   | SC725                                   | 2666,9              | b  | E                 | 123,47              | b                 | 0,48               | a                   | 255,36          | b | 3,19 | d | 316,31 | b | 0,81 | a |

"...continua..."

"TABELA 7, Cont."

|     |                          |        |   |   |        |   |      |   |        |   |      |   |        |   |      |   |
|-----|--------------------------|--------|---|---|--------|---|------|---|--------|---|------|---|--------|---|------|---|
| 80  | SC655                    | 2666,0 | b | E | 125,39 | b | 0,47 | a | 263,22 | a | 3,21 | d | 313,42 | b | 0,84 | a |
| 160 | SC6                      | 2643,2 | b | E | 127,50 | b | 0,48 | a | 252,03 | b | 2,97 | d | 338,55 | b | 0,74 | a |
| 204 | B.AZ9504                 | 2635,8 | b | E | 123,81 | b | 0,51 | a | 245,51 | b | 2,87 | d | 348,48 | b | 0,70 | b |
| 27  | B.Tx3042                 | 2621,9 | b | E | 125,49 | b | 0,46 | a | 272,23 | a | 3,18 | d | 317,38 | b | 0,86 | a |
| 126 | SC1319                   | 2601,2 | b | E | 122,97 | b | 0,59 | a | 215,64 | b | 3,43 | c | 291,78 | b | 0,74 | a |
| 167 | CS3541                   | 2595,2 | b | E | 122,62 | b | 0,50 | a | 242,13 | b | 3,47 | c | 289,26 | b | 0,84 | a |
| 213 | B.OK11                   | 2556,8 | b | E | 117,43 | b | 0,54 | a | 208,80 | b | 3,36 | c | 299,63 | b | 0,69 | b |
| 84  | BR012R                   | 2549,7 | b | E | 120,54 | b | 0,64 | a | 188,99 | c | 3,80 | c | 265,64 | c | 0,71 | b |
| 11  | SC22                     | 2543,2 | b | E | 122,70 | b | 0,59 | a | 205,71 | b | 3,88 | b | 259,04 | c | 0,80 | a |
| 17  | 01MN1589-B               | 2542,1 | b | E | 124,01 | b | 0,41 | b | 305,56 | a | 2,87 | d | 350,95 | b | 0,87 | a |
| 159 | SC1251                   | 2533,3 | b | E | 119,95 | b | 0,49 | a | 250,53 | b | 3,03 | d | 334,08 | b | 0,75 | a |
| 197 | SC970                    | 2512,4 | b | E | 119,80 | b | 0,43 | a | 280,58 | a | 3,02 | d | 331,76 | b | 0,84 | a |
| 107 | SC982                    | 2502,5 | b | E | 121,14 | b | 0,58 | a | 209,14 | b | 3,64 | c | 275,09 | c | 0,76 | a |
| 206 | SC630                    | 2500,1 | b | E | 117,95 | b | 0,47 | a | 252,26 | b | 3,18 | d | 318,66 | b | 0,79 | a |
| 43  | R.Tx2783                 | 2494,7 | b | E | 118,78 | b | 0,51 | a | 237,32 | b | 3,62 | c | 279,59 | c | 0,85 | a |
| 143 | Kuyuma                   | 2485,6 | b | E | 118,62 | b | 0,42 | b | 286,78 | a | 2,67 | d | 377,49 | a | 0,76 | a |
| 62  | SC1055                   | 2484,6 | b | E | 116,91 | b | 0,42 | b | 275,90 | a | 3,16 | d | 321,20 | b | 0,86 | a |
| 199 | B.Tx626                  | 2456,5 | b | E | 114,68 | b | 0,52 | a | 225,75 | b | 3,40 | c | 294,22 | b | 0,77 | a |
| 97  | SC1271                   | 2445,5 | b | E | 114,97 | b | 0,49 | a | 235,86 | b | 3,77 | c | 265,62 | c | 0,89 | a |
| 145 | SC673                    | 2444,5 | b | E | 117,00 | b | 0,61 | a | 191,88 | c | 3,41 | c | 296,88 | b | 0,66 | b |
| 20  | SC598                    | 2444,4 | b | E | 115,66 | b | 0,47 | a | 246,85 | b | 3,70 | c | 270,43 | c | 0,91 | a |
| 35  | SC399                    | 2431,1 | b | E | 111,30 | b | 0,41 | b | 268,90 | a | 3,47 | c | 290,46 | b | 0,93 | a |
| 128 | SC659                    | 2429,4 | b | E | 113,84 | b | 0,43 | a | 266,06 | a | 3,17 | d | 320,59 | b | 0,84 | a |
| 155 | SC574                    | 2426,9 | b | E | 117,75 | b | 0,52 | a | 220,79 | b | 3,64 | c | 275,92 | c | 0,80 | a |
| 30  | B.Tx399                  | 2411,0 | b | E | 117,01 | b | 0,44 | a | 267,72 | a | 3,28 | d | 304,95 | b | 0,88 | a |
| 130 | SC708                    | 2383,8 | b | E | 111,17 | b | 0,41 | b | 268,94 | a | 3,07 | d | 325,76 | b | 0,83 | a |
| 151 | SC325                    | 2381,0 | b | E | 113,17 | b | 0,40 | b | 294,86 | a | 2,87 | d | 354,19 | b | 0,83 | a |
| 81  | Ajabsido                 | 2376,6 | b | E | 110,32 | b | 0,53 | a | 208,36 | b | 3,67 | c | 276,31 | c | 0,76 | a |
| 237 | Malisor 84-7             | 2374,1 | b | E | 113,76 | b | 0,50 | a | 226,53 | b | 3,15 | d | 319,16 | b | 0,71 | b |
| 74  | KS115                    | 2370,4 | b | E | 115,36 | b | 0,49 | a | 232,55 | b | 3,60 | c | 282,41 | c | 0,83 | a |
| 82  | ATF14B                   | 2358,8 | b | E | 109,62 | b | 0,44 | a | 247,08 | b | 3,14 | d | 325,35 | b | 0,76 | a |
| 201 | B.Tx3197                 | 2350,4 | b | E | 109,96 | b | 0,44 | a | 244,50 | b | 2,97 | d | 337,05 | b | 0,72 | b |
| 245 | ATF 14B                  | 2347,2 | b | E | 110,78 | b | 0,48 | a | 236,49 | b | 3,39 | c | 298,96 | b | 0,79 | a |
| 42  | SC738                    | 2341,7 | b | E | 112,35 | b | 0,42 | b | 266,60 | a | 3,19 | d | 313,81 | b | 0,85 | a |
| 76  | SC214                    | 2332,2 | b | E | 112,11 | b | 0,53 | a | 214,79 | b | 4,09 | b | 245,94 | c | 0,87 | a |
| 144 | SA5330-Martin (ASA N°89) | 2332,1 | b | E | 111,68 | b | 0,55 | a | 204,20 | b | 3,79 | c | 265,05 | c | 0,77 | a |
| 138 | SC465                    | 2315,1 | b | E | 107,21 | b | 0,40 | b | 265,06 | a | 3,09 | d | 329,12 | b | 0,81 | a |
| 188 | SURENO                   | 2298,8 | b | E | 110,77 | b | 0,45 | a | 245,12 | b | 3,11 | d | 323,16 | b | 0,76 | a |
| 32  | Tx2882                   | 2296,3 | b | E | 107,74 | b | 0,38 | b | 313,25 | a | 2,71 | d | 410,14 | a | 0,79 | a |
| 182 | SC1356                   | 2279,0 | b | E | 108,06 | b | 0,40 | b | 292,90 | a | 3,02 | d | 345,50 | b | 0,85 | a |
| 242 | SC1124                   | 2278,0 | b | E | 107,07 | b | 0,43 | a | 249,31 | b | 3,25 | d | 308,93 | b | 0,81 | a |
| 36  | SC572                    | 2275,3 | b | E | 113,83 | b | 0,48 | a | 233,61 | b | 3,61 | c | 277,06 | c | 0,84 | a |
| 228 | SC748                    | 2261,7 | b | E | 108,74 | b | 0,44 | a | 252,56 | b | 3,06 | d | 328,53 | b | 0,77 | a |
| 40  | R.Tx431                  | 2242,8 | b | E | 107,76 | b | 0,49 | a | 219,08 | b | 3,97 | b | 253,08 | c | 0,87 | a |
| 238 | SC145                    | 2206,7 | b | E | 103,02 | b | 0,54 | a | 200,88 | c | 3,54 | c | 286,72 | c | 0,70 | b |
| 208 | SC564                    | 2202,3 | b | E | 103,48 | b | 0,30 | b | 341,25 | a | 2,41 | d | 416,35 | a | 0,82 | a |
| 95  | SC121                    | 2191,9 | b | E | 107,12 | b | 0,35 | b | 320,92 | a | 2,92 | d | 346,27 | b | 0,92 | a |

"...continua..."

"TABELA 7, Cont."

|     |               |        |   |   |        |   |      |   |        |   |      |   |        |   |      |   |
|-----|---------------|--------|---|---|--------|---|------|---|--------|---|------|---|--------|---|------|---|
| 3   | R.Tx433       | 2175,9 | b | E | 105,75 | b | 0,39 | b | 276,05 | a | 3,28 | d | 304,87 | b | 0,91 | a |
| 28  | P-721         | 2170,4 | b | E | 105,76 | b | 0,49 | a | 215,81 | b | 3,84 | c | 261,56 | c | 0,83 | a |
| 216 | SC498         | 2169,1 | b | E | 104,53 | b | 0,48 | a | 212,98 | b | 3,70 | c | 270,59 | c | 0,79 | a |
| 94  | P9517         | 2167,1 | b | E | 105,41 | b | 0,42 | b | 267,40 | a | 3,36 | c | 309,61 | b | 0,86 | a |
| 244 | ATF 13B       | 2162,0 | b | E | 102,57 | b | 0,45 | a | 230,10 | b | 3,51 | c | 290,47 | b | 0,79 | a |
| 70  | SC502         | 2160,5 | b | E | 104,39 | b | 0,39 | b | 271,08 | a | 3,27 | d | 306,47 | b | 0,88 | a |
| 124 | Tx2891        | 2153,6 | b | E | 104,60 | b | 0,38 | b | 281,86 | a | 3,01 | d | 341,56 | b | 0,84 | a |
| 56  | SC757         | 2143,2 | b | E | 104,89 | b | 0,37 | b | 278,29 | a | 3,02 | d | 332,73 | b | 0,84 | a |
| 117 | SC1104        | 2135,7 | b | E | 101,78 | b | 0,45 | a | 227,74 | b | 3,55 | c | 282,66 | c | 0,81 | a |
| 129 | SC425         | 2134,3 | b | E | 100,90 | b | 0,40 | b | 256,97 | b | 3,18 | d | 314,31 | b | 0,82 | a |
| 195 | KAT83369      | 2116,1 | b | E | 101,52 | b | 0,43 | a | 257,18 | b | 3,02 | d | 337,88 | b | 0,76 | a |
| 134 | P850029       | 2113,1 | b | E | 99,72  | b | 0,49 | a | 209,82 | b | 3,83 | c | 262,50 | c | 0,79 | a |
| 210 | Pinolero 1    | 2092,7 | b | E | 99,54  | b | 0,37 | b | 279,13 | a | 2,89 | d | 353,06 | b | 0,80 | a |
| 150 | SC1080        | 2088,9 | b | E | 99,41  | b | 0,43 | a | 238,10 | b | 3,17 | d | 316,57 | b | 0,75 | a |
| 136 | Dorado        | 2073,8 | c | E | 97,51  | b | 0,33 | b | 296,63 | a | 2,90 | d | 345,24 | b | 0,86 | a |
| 165 | SC209         | 2070,8 | c | E | 98,47  | b | 0,40 | b | 248,67 | b | 3,44 | c | 293,34 | b | 0,85 | a |
| 209 | SC672         | 2067,1 | c | E | 96,04  | b | 0,47 | a | 203,69 | b | 3,80 | c | 265,69 | c | 0,78 | a |
| 69  | SC51          | 2063,0 | c | E | 100,53 | b | 0,35 | b | 287,07 | a | 2,91 | d | 344,87 | b | 0,83 | a |
| 135 | SC334         | 2056,7 | c | E | 97,89  | b | 0,43 | a | 249,26 | b | 2,88 | d | 353,87 | b | 0,70 | b |
| 220 | EBA-3         | 2044,9 | c | E | 96,80  | b | 0,45 | a | 217,70 | b | 3,72 | c | 269,24 | c | 0,81 | a |
| 225 | SC734         | 2041,5 | c | E | 96,68  | b | 0,47 | a | 206,15 | b | 3,11 | d | 322,27 | b | 0,64 | b |
| 207 | Lian Tang Ai  | 2020,1 | c | I | 93,62  | b | 0,35 | b | 270,85 | a | 3,16 | d | 318,02 | b | 0,85 | a |
| 148 | SC84          | 2013,6 | c | I | 95,89  | b | 0,43 | a | 223,62 | b | 3,61 | c | 282,11 | c | 0,80 | a |
| 18  | B.Tx406       | 2012,3 | c | I | 94,19  | b | 0,35 | b | 265,95 | a | 3,34 | c | 299,96 | b | 0,89 | a |
| 192 | SC283         | 2006,2 | c | I | 93,07  | b | 0,55 | a | 168,59 | c | 3,97 | b | 252,09 | c | 0,67 | b |
| 78  | SC423         | 1991,4 | c | I | 95,06  | b | 0,38 | b | 252,22 | b | 3,36 | c | 299,73 | b | 0,84 | a |
| 31  | R.Tx435       | 1987,1 | c | I | 97,03  | b | 0,49 | a | 197,15 | c | 4,07 | b | 246,87 | c | 0,80 | a |
| 186 | SC562         | 1976,5 | c | I | 91,81  | b | 0,29 | b | 322,32 | a | 2,78 | d | 360,16 | b | 0,89 | a |
| 75  | SC155         | 1975,9 | c | I | 95,77  | b | 0,43 | a | 218,34 | b | 3,93 | b | 255,91 | c | 0,85 | a |
| 45  | SC704         | 1974,4 | c | I | 112,71 | b | 0,33 | b | 341,50 | a | 2,60 | d | 385,68 | a | 0,89 | a |
| 10  | NSA440-KARPER | 1969,7 | c | I | 92,51  | b | 0,36 | b | 252,79 | b | 3,48 | c | 287,83 | c | 0,88 | a |
| 112 | B.Tx2752      | 1969,4 | c | I | 93,15  | b | 0,42 | b | 240,81 | b | 3,36 | c | 306,03 | b | 0,78 | a |
| 154 | SC855         | 1969,1 | c | I | 93,96  | b | 0,50 | a | 187,64 | c | 4,01 | b | 249,78 | c | 0,75 | a |
| 4   | SC108         | 1947,5 | c | I | 96,59  | b | 0,33 | b | 287,48 | a | 3,13 | d | 321,93 | b | 0,89 | a |
| 121 | SC59          | 1946,9 | c | I | 90,22  | b | 0,32 | b | 300,06 | a | 3,06 | d | 332,59 | b | 0,90 | a |
| 102 | R.Tx436       | 1941,7 | c | I | 91,63  | b | 0,50 | a | 184,82 | c | 3,57 | c | 280,70 | c | 0,66 | b |
| 24  | SC749         | 1940,7 | c | I | 92,90  | b | 0,33 | b | 282,00 | a | 3,03 | d | 335,33 | b | 0,84 | a |
| 59  | SC1158        | 1925,1 | c | I | 91,61  | b | 0,47 | a | 201,72 | c | 4,07 | b | 249,26 | c | 0,81 | a |
| 88  | IS10317       | 1924,9 | c | I | 90,62  | b | 0,41 | b | 231,23 | b | 3,28 | d | 307,13 | b | 0,75 | a |
| 202 | SC645         | 1912,1 | c | I | 89,61  | b | 0,31 | b | 286,55 | a | 2,87 | d | 348,22 | b | 0,82 | a |
| 133 | SC60          | 1904,5 | c | I | 91,26  | b | 0,34 | b | 271,27 | a | 3,00 | d | 335,64 | b | 0,81 | a |
| 193 | ICSV745       | 1892,4 | c | I | 87,67  | b | 0,41 | b | 208,38 | b | 3,51 | c | 285,87 | c | 0,72 | b |
| 176 | SC587         | 1882,4 | c | I | 89,88  | b | 0,41 | b | 218,70 | b | 3,18 | d | 314,54 | b | 0,70 | b |
| 65  | SC971         | 1879,4 | c | I | 89,50  | b | 0,39 | b | 236,65 | b | 3,42 | c | 295,65 | b | 0,80 | a |
| 166 | SC1211        | 1867,9 | c | I | 88,95  | b | 0,48 | a | 189,86 | c | 3,66 | c | 274,40 | c | 0,69 | b |
| 163 | SC1321        | 1863,6 | c | I | 90,62  | b | 0,35 | b | 287,31 | a | 3,28 | d | 316,53 | b | 0,91 | a |
| 142 | SC1085        | 1848,9 | c | I | 86,77  | b | 0,43 | a | 211,22 | b | 3,33 | c | 301,91 | b | 0,69 | b |

"...continua..."

"TABELA 7, Cont."

|     |                                          |        |   |   |       |   |      |   |        |   |      |   |        |   |      |   |
|-----|------------------------------------------|--------|---|---|-------|---|------|---|--------|---|------|---|--------|---|------|---|
| 105 | SC184                                    | 1834,6 | c | I | 88,52 | b | 0,51 | a | 174,69 | c | 3,68 | c | 272,59 | c | 0,64 | b |
| 131 | JOCORO                                   | 1823,5 | c | I | 86,28 | b | 0,41 | b | 215,81 | b | 3,36 | c | 302,17 | b | 0,72 | b |
| 227 | SC628                                    | 1814,2 | c | I | 88,01 | b | 0,37 | b | 239,10 | b | 3,36 | c | 298,64 | b | 0,80 | a |
| 51  | R.TAM2566                                | 1803,7 | c | I | 87,75 | b | 0,36 | b | 241,35 | b | 3,42 | c | 293,65 | b | 0,82 | a |
| 63  | SC1201                                   | 1802,5 | c | I | 84,44 | c | 0,49 | a | 178,86 | c | 4,12 | b | 248,48 | c | 0,72 | b |
| 132 | SC175                                    | 1802,2 | c | I | 85,11 | c | 0,33 | b | 264,24 | a | 3,25 | d | 308,05 | b | 0,86 | a |
| 100 | B.Tx645                                  | 1800,7 | c | I | 85,54 | c | 0,33 | b | 255,10 | b | 2,78 | d | 364,91 | b | 0,71 | b |
| 77  | P898012                                  | 1797,5 | c | I | 85,00 | c | 0,32 | b | 264,97 | a | 3,39 | c | 296,73 | b | 0,89 | a |
| 16  | N263B                                    | 1796,3 | c | I | 86,58 | b | 0,36 | b | 240,84 | b | 3,72 | c | 268,90 | c | 0,90 | a |
| 169 | SC63                                     | 1785,9 | c | I | 83,90 | c | 0,36 | b | 237,37 | b | 3,45 | c | 294,16 | b | 0,81 | a |
| 48  | Tx2741                                   | 1783,7 | c | I | 83,21 | c | 0,33 | b | 248,20 | b | 3,11 | d | 325,22 | b | 0,77 | a |
| 64  | SC1077                                   | 1774,4 | c | I | 84,72 | c | 0,37 | b | 236,80 | b | 3,98 | b | 254,13 | c | 0,93 | a |
| 54  | SC320                                    | 1765,4 | c | I | 84,41 | c | 0,48 | a | 176,08 | c | 4,54 | a | 224,36 | c | 0,79 | a |
| 104 | SC56                                     | 1762,7 | c | I | 83,55 | c | 0,37 | b | 234,15 | b | 3,43 | c | 294,66 | b | 0,79 | a |
| 34  | SC115                                    | 1762,7 | c | I | 82,44 | c | 0,28 | b | 290,14 | a | 3,07 | d | 326,16 | b | 0,89 | a |
| 162 | SC1322                                   | 1754,6 | c | I | 83,49 | c | 0,33 | b | 250,38 | b | 3,26 | d | 319,06 | b | 0,80 | a |
| 53  | SC411                                    | 1754,4 | c | I | 85,12 | c | 0,35 | b | 241,62 | b | 3,78 | c | 269,68 | c | 0,90 | a |
| 29  | R.Tx2903                                 | 1749,5 | c | I | 81,99 | c | 0,33 | b | 247,33 | b | 3,49 | c | 287,92 | c | 0,86 | a |
| 103 | SC42                                     | 1737,9 | c | I | 81,38 | c | 0,30 | b | 282,21 | a | 3,22 | d | 318,11 | b | 0,89 | a |
| 175 | (SN76)FC6608 RED KAFIR BAZINE (ASA Nº23) | 1727,1 | c | I | 81,93 | c | 0,36 | b | 224,88 | b | 3,67 | c | 273,67 | c | 0,82 | a |
| 113 | R.Tx2737                                 | 1714,8 | c | I | 80,01 | c | 0,30 | b | 264,89 | a | 2,98 | d | 336,91 | b | 0,79 | a |
| 221 | SC323                                    | 1711,3 | c | I | 82,61 | c | 0,26 | b | 314,75 | a | 2,80 | d | 357,48 | b | 0,88 | a |
| 2   | BTx641                                   | 1693,4 | c | I | 81,23 | c | 0,30 | b | 273,68 | a | 3,07 | d | 327,46 | b | 0,84 | a |
| 211 | Tx2911                                   | 1677,3 | c | I | 81,03 | c | 0,34 | b | 234,71 | b | 3,23 | d | 310,64 | b | 0,76 | a |
| 108 | SC1076                                   | 1670,7 | c | I | 79,51 | c | 0,34 | b | 232,48 | b | 3,49 | c | 287,50 | c | 0,81 | a |
| 178 | SC1345                                   | 1666,9 | c | I | 80,25 | c | 0,25 | b | 312,72 | a | 2,53 | d | 397,45 | a | 0,79 | a |
| 57  | SC1154                                   | 1666,6 | c | I | 78,97 | c | 0,43 | a | 184,04 | c | 4,23 | b | 236,61 | c | 0,78 | a |
| 122 | SC1033                                   | 1665,7 | c | I | 78,89 | c | 0,40 | b | 196,13 | c | 3,57 | c | 280,48 | c | 0,70 | b |
| 203 | (SN142)SA386 REDBINE-60 (ASA Nº98)       | 1665,0 | c | I | 78,87 | c | 0,36 | b | 222,91 | b | 3,65 | c | 275,26 | c | 0,81 | a |
| 52  | SC968                                    | 1663,2 | c | I | 79,14 | c | 0,50 | a | 163,83 | c | 5,15 | a | 196,32 | c | 0,83 | a |
| 127 | R.Tx434                                  | 1660,7 | c | I | 79,27 | c | 0,41 | b | 195,22 | c | 3,38 | c | 305,52 | b | 0,65 | b |
| 15  | SC1017                                   | 1658,8 | c | I | 78,98 | c | 0,47 | a | 168,25 | c | 4,21 | b | 237,87 | c | 0,71 | b |
| 179 | Macia                                    | 1643,2 | c | I | 75,81 | c | 0,30 | b | 250,10 | b | 2,55 | d | 400,39 | a | 0,62 | b |
| 223 | SC21                                     | 1632,1 | c | I | 74,52 | c | 0,41 | b | 179,68 | c | 3,82 | c | 264,08 | c | 0,68 | b |
| 177 | SC760                                    | 1631,4 | c | I | 76,90 | c | 0,26 | b | 295,51 | a | 3,07 | d | 327,69 | b | 0,90 | a |
| 115 | SC199                                    | 1618,3 | c | I | 75,10 | c | 0,35 | b | 212,60 | b | 3,62 | c | 276,64 | c | 0,77 | a |
| 120 | SC305                                    | 1617,3 | c | I | 74,55 | c | 0,31 | b | 246,04 | b | 3,48 | c | 288,25 | c | 0,86 | a |
| 111 | SC949 - short on seed                    | 1607,4 | c | I | 74,84 | c | 0,44 | a | 191,27 | c | 3,62 | c | 276,28 | c | 0,69 | b |
| 55  | SC58                                     | 1579,2 | c | I | 75,10 | c | 0,38 | b | 199,50 | c | 4,59 | a | 219,46 | c | 0,91 | a |
| 19  | SC118                                    | 1577,8 | c | I | 74,40 | c | 0,32 | b | 234,01 | b | 3,82 | c | 266,64 | c | 0,87 | a |
| 174 | SC391                                    | 1572,8 | c | I | 73,20 | c | 0,27 | b | 268,44 | a | 3,15 | d | 326,16 | b | 0,82 | a |
| 241 | Shan Qui Red                             | 1557,1 | c | I | 75,68 | c | 0,32 | b | 239,58 | b | 3,53 | c | 283,51 | c | 0,85 | a |
| 60  | SC805                                    | 1549,4 | c | I | 73,52 | c | 0,30 | b | 259,08 | b | 3,65 | c | 305,69 | b | 0,85 | a |
| 161 | SC35                                     | 1548,2 | c | I | 74,17 | c | 0,35 | b | 209,18 | b | 3,45 | c | 302,87 | b | 0,71 | b |
| 49  | SC53                                     | 1543,8 | c | I | 71,12 | c | 0,41 | b | 167,90 | c | 4,73 | a | 211,71 | c | 0,80 | a |
| 13  | LG70                                     | 1543,2 | c | I | 75,65 | c | 0,33 | b | 228,00 | b | 3,81 | c | 267,61 | c | 0,86 | a |
| 205 | SC991                                    | 1530,9 | c | I | 72,28 | c | 0,27 | b | 263,74 | a | 2,95 | d | 347,14 | b | 0,77 | a |

"...continua..."

"TABELA 7, Cont."

|     |                                          |        |   |   |       |   |      |   |        |   |      |   |        |   |      |   |
|-----|------------------------------------------|--------|---|---|-------|---|------|---|--------|---|------|---|--------|---|------|---|
| 33  | SC38                                     | 1528,4 | c | I | 73,09 | c | 0,42 | b | 172,73 | c | 3,89 | b | 259,59 | c | 0,67 | b |
| 189 | Marupantse                               | 1525,9 | c | I | 71,31 | c | 0,42 | b | 179,12 | c | 3,28 | d | 309,60 | b | 0,57 | c |
| 140 | (SN150)SA7005 PLAINSMAN (ASA N°87)Tx7005 | 1517,3 | c | I | 74,23 | c | 0,35 | b | 219,38 | b | 2,90 | d | 345,78 | b | 0,64 | b |
| 173 | HEGARI                                   | 1514,8 | c | I | 71,85 | c | 0,25 | b | 293,94 | a | 2,91 | d | 343,91 | b | 0,85 | a |
| 146 | SC663                                    | 1513,6 | c | I | 72,31 | c | 0,31 | b | 233,92 | b | 3,19 | d | 316,15 | b | 0,75 | a |
| 222 | SC563                                    | 1497,0 | c | I | 71,24 | c | 0,27 | b | 264,60 | a | 3,16 | d | 316,84 | b | 0,83 | a |
| 12  | SC1038                                   | 1492,4 | c | I | 71,21 | c | 0,32 | b | 224,54 | b | 3,41 | c | 296,10 | b | 0,77 | a |
| 89  | IS10622B                                 | 1471,9 | c | I | 69,42 | c | 0,32 | b | 229,33 | b | 3,31 | c | 313,01 | b | 0,73 | b |
| 39  | N268B                                    | 1471,6 | c | I | 70,31 | c | 0,27 | b | 263,40 | a | 3,33 | c | 303,44 | b | 0,87 | a |
| 8   | SC25                                     | 1467,8 | c | I | 70,86 | c | 0,56 | a | 131,83 | d | 4,57 | a | 221,37 | c | 0,61 | c |
| 47  | SC144                                    | 1432,9 | c | I | 68,85 | c | 0,25 | b | 274,07 | a | 3,43 | c | 291,97 | b | 0,94 | a |
| 123 | R.Tx432                                  | 1415,3 | c | I | 67,79 | c | 0,48 | a | 180,01 | c | 3,35 | c | 299,38 | b | 0,61 | c |
| 184 | SC599                                    | 1407,5 | c | I | 66,78 | c | 0,30 | b | 237,78 | b | 3,41 | c | 299,07 | b | 0,79 | a |
| 196 | SC333                                    | 1406,7 | c | I | 66,79 | c | 0,29 | b | 238,81 | b | 3,36 | c | 300,91 | b | 0,80 | a |
| 139 | B.Tx615                                  | 1404,6 | c | I | 66,76 | c | 0,27 | b | 252,10 | b | 3,13 | d | 323,93 | b | 0,79 | a |
| 229 | SC348                                    | 1399,8 | c | I | 67,03 | c | 0,29 | b | 229,15 | b | 3,55 | c | 281,73 | c | 0,81 | a |
| 183 | SC603                                    | 1395,1 | c | I | 66,47 | c | 0,31 | b | 213,34 | b | 3,70 | c | 272,53 | c | 0,79 | a |
| 164 | B.Tx2928                                 | 1392,5 | c | I | 66,79 | c | 0,29 | b | 230,77 | b | 3,44 | c | 290,90 | b | 0,79 | a |
| 109 | Feterita Gishesh                         | 1384,4 | c | I | 64,87 | c | 0,38 | b | 177,84 | c | 3,29 | d | 311,38 | b | 0,57 | c |
| 149 | SC1056                                   | 1330,0 | c | I | 63,32 | c | 0,25 | b | 253,40 | b | 3,33 | c | 300,62 | b | 0,84 | a |
| 185 | SC295                                    | 1322,7 | c | I | 63,43 | c | 0,26 | b | 241,05 | b | 3,35 | c | 299,38 | b | 0,81 | a |
| 58  | SC557                                    | 1320,2 | c | I | 62,60 | c | 0,30 | b | 215,64 | b | 3,81 | c | 266,80 | c | 0,81 | a |
| 153 | SC135                                    | 1317,0 | c | I | 61,65 | c | 0,40 | b | 154,42 | d | 4,22 | b | 237,86 | c | 0,65 | b |
| 99  | B.Tx631                                  | 1316,1 | c | I | 62,03 | c | 0,37 | b | 175,59 | c | 3,40 | c | 294,49 | b | 0,60 | c |
| 93  | SC206                                    | 1308,4 | c | I | 63,05 | c | 0,33 | b | 191,83 | c | 3,86 | c | 259,62 | c | 0,74 | a |
| 157 | SC441                                    | 1306,2 | c | I | 62,14 | c | 0,40 | b | 168,65 | c | 3,52 | c | 286,01 | c | 0,58 | c |
| 118 | R.Tx430                                  | 1291,9 | c | I | 65,19 | c | 0,30 | b | 236,26 | b | 3,68 | c | 272,13 | c | 0,87 | a |
| 79  | SC473                                    | 1287,0 | c | I | 57,96 | c | 0,44 | a | 120,78 | d | 4,16 | b | 241,03 | c | 0,50 | c |
| 180 | SC1063                                   | 1285,2 | c | I | 59,86 | c | 0,32 | b | 192,65 | c | 3,82 | c | 264,54 | c | 0,73 | b |
| 7   | SC420                                    | 1278,5 | c | I | 61,89 | c | 0,22 | b | 274,07 | a | 3,21 | d | 313,95 | b | 0,87 | a |
| 71  | B.Tx643                                  | 1269,9 | c | I | 57,42 | c | 0,26 | b | 228,59 | b | 3,81 | c | 264,27 | c | 0,86 | a |
| 87  | CMSXS225                                 | 1252,8 | c | I | 58,33 | c | 0,30 | b | 203,65 | b | 3,12 | d | 324,86 | b | 0,61 | c |
| 218 | (SN311)FC8917 CHILTEX (ASA NO 8)         | 1237,3 | c | I | 58,63 | c | 0,26 | b | 225,87 | b | 2,85 | d | 357,22 | b | 0,64 | b |
| 235 | SC224                                    | 1224,7 | c | I | 58,71 | c | 0,50 | a | 121,85 | d | 4,84 | a | 207,79 | c | 0,58 | c |
| 187 | SC987                                    | 1213,8 | c | I | 57,60 | c | 0,48 | a | 120,35 | d | 5,10 | a | 196,66 | c | 0,61 | c |
| 231 | SC1108                                   | 1212,4 | c | I | 58,02 | c | 0,50 | a | 147,71 | d | 4,07 | b | 245,79 | c | 0,60 | c |
| 85  | BTx644                                   | 1198,0 | c | I | 56,82 | c | 0,37 | b | 155,74 | d | 3,40 | c | 295,09 | b | 0,52 | c |
| 168 | SC303                                    | 1197,9 | c | I | 57,18 | c | 0,27 | b | 216,56 | b | 3,37 | c | 298,35 | b | 0,72 | b |
| 147 | R9188                                    | 1196,8 | c | I | 58,33 | c | 0,26 | b | 224,16 | b | 3,43 | c | 291,78 | b | 0,77 | a |
| 224 | SC480                                    | 1193,3 | c | I | 57,22 | c | 0,41 | b | 145,35 | d | 3,70 | c | 271,18 | c | 0,53 | c |
| 156 | B.Tx642                                  | 1180,5 | c | I | 55,95 | c | 0,34 | b | 168,62 | c | 3,72 | c | 269,71 | c | 0,63 | b |
| 181 | B.Tx623                                  | 1173,6 | c | I | 56,08 | c | 0,34 | b | 183,18 | c | 3,23 | d | 309,62 | b | 0,59 | c |
| 240 | CSM-63                                   | 1170,4 | c | I | 55,84 | c | 0,24 | b | 233,98 | b | 3,16 | d | 316,14 | b | 0,74 | a |
| 158 | SC833                                    | 1136,3 | c | I | 53,87 | c | 0,31 | b | 176,48 | c | 4,21 | b | 237,64 | c | 0,74 | a |
| 92  | SC549                                    | 1097,3 | c | I | 51,28 | c | 0,27 | b | 188,22 | c | 3,99 | b | 252,79 | c | 0,74 | a |
| 106 | SC489                                    | 1065,3 | c | I | 49,77 | c | 0,26 | b | 195,63 | c | 3,46 | c | 289,50 | b | 0,68 | b |
| 22  | R,Tx2907                                 | 1049,4 | c | I | 50,19 | c | 0,24 | b | 204,76 | b | 3,63 | c | 277,14 | c | 0,74 | a |

"...continua..."

"TABELA 7, Cont."

|     |                                   |        |   |   |        |   |      |   |        |   |      |   |        |   |      |   |
|-----|-----------------------------------|--------|---|---|--------|---|------|---|--------|---|------|---|--------|---|------|---|
| 234 | AR2002                            | 1046,9 | c | I | 53,11  | c | 0,25 | b | 205,61 | b | 3,63 | c | 278,22 | c | 0,74 | a |
| 232 | SC449                             | 1022,2 | c | I | 48,85  | c | 0,22 | b | 237,28 | b | 3,54 | c | 286,23 | c | 0,81 | a |
| 66  | SC467                             | 992,7  | c | I | 45,71  | c | 0,24 | b | 190,67 | c | 4,31 | b | 232,35 | c | 0,82 | a |
| 9   | SC55                              | 965,0  | c | I | 44,82  | c | 0,24 | b | 182,78 | c | 4,14 | b | 243,49 | c | 0,76 | a |
| 114 | SC937                             | 944,2  | c | I | 43,94  | c | 0,26 | b | 169,05 | c | 3,74 | c | 269,23 | c | 0,63 | b |
| 119 | SC33                              | 923,5  | c | I | 43,55  | c | 0,28 | b | 160,44 | c | 4,12 | b | 243,53 | c | 0,65 | b |
| 239 | SC49                              | 922,8  | c | I | 42,50  | c | 0,22 | b | 189,56 | c | 3,50 | c | 286,44 | c | 0,66 | b |
| 116 | SC942                             | 920,7  | c | I | 41,95  | c | 0,22 | b | 176,16 | c | 3,68 | c | 273,80 | c | 0,64 | b |
| 243 | SC1337                            | 890,9  | c | I | 41,72  | c | 0,37 | b | 121,09 | d | 4,57 | a | 221,19 | c | 0,56 | c |
| 141 | SC192                             | 853,8  | c | I | 40,86  | c | 0,18 | b | 229,58 | b | 3,59 | c | 280,91 | c | 0,82 | a |
| 152 | 88V1080                           | 847,3  | c | I | 40,97  | c | 0,17 | b | 252,50 | b | 3,12 | d | 325,78 | b | 0,78 | a |
| 230 | SC532                             | 837,0  | c | I | 39,16  | c | 0,18 | b | 213,57 | b | 3,67 | c | 273,76 | c | 0,79 | a |
| 219 | QL3 (India)                       | 834,6  | c | I | 39,07  | c | 0,26 | b | 152,22 | d | 3,40 | c | 294,33 | b | 0,52 | c |
| 191 | M35-1                             | 829,6  | c | I | 36,81  | c | 0,26 | b | 122,16 | d | 2,99 | d | 335,78 | b | 0,35 | d |
| 50  | R.TAM428                          | 716,1  | c | I | 33,29  | c | 0,19 | b | 177,54 | c | 4,23 | b | 236,60 | c | 0,75 | a |
| 170 | B.Tx635                           | 705,8  | c | I | 35,44  | c | 0,19 | b | 193,00 | c | 3,51 | c | 285,19 | c | 0,68 | b |
| 98  | B.Tx623(BMX)                      | 634,7  | c | I | 29,23  | c | 0,32 | b | 98,49  | d | 3,85 | c | 259,83 | c | 0,38 | d |
| 200 | SEPON82                           | 565,9  | c | I | 27,73  | c | 0,15 | b | 172,12 | c | 3,89 | b | 257,60 | c | 0,67 | b |
|     | Média Geral                       | 1981,7 |   |   | 94,3   |   | 0,41 |   | 232,07 |   | 3,45 |   | 297,07 |   | 0,78 |   |
|     | Média das linhagens eficientes    | 2597,7 |   |   | 123,66 |   | 0,51 |   | 249,63 |   | 3,32 |   | 307,09 |   | 0,82 |   |
|     | Médias das linhagens ineficientes | 1504,1 |   |   | 71,50  |   | 0,34 |   | 218,46 |   | 3,55 |   | 289,29 |   | 0,75 |   |

Médias seguidas pela mesma letra, em cada coluna, pertencem a uma mesma classe, de acordo com o teste de Scott-Knott ao nível de 1% de probabilidade.

CL: Classificação, E: eficiente ao P e I: ineficiente ao P

Na Tabela 8, estão apresentados os valores de produtividade de grãos das 34 linhagens mais produtivas e os valores das 34 linhagens menos produtivas nos ambiente com e sem estresse de P e a produtividade de grãos relativa. Pode-se observar que ao todo estão presente na Tabela 9, 68 linhagens de sorgo das 245 linhagens avaliadas e classificadas quanto à eficiência de P. As primeiras 34 linhagens são as linhagens mais produtivas e eficientes ao P, assim como as últimas 34 linhagens são as linhagens menos produtivas e ineficientes ao P.

Observou-se que na média geral as linhagens mais produtivas e eficientes ao P, obtiveram PG média de 6915,0 kg.ha<sup>-1</sup> no ambiente sem estresse de P, contra 3127,0 kg.ha<sup>-1</sup> no ambiente com estresse de P e uma redução na PG de 53,8%. Para as linhagens menos produtivas e ineficientes ao P, esses valores foram superiores quando comparados às linhagens eficientes e mais produtivas. As linhagens ineficientes e menos produtivas obtiveram média de PG de 3966,7 kg.ha<sup>-1</sup> no ambiente sem estresse de P, contra 565,9 kg.ha<sup>-1</sup> no ambiente com estresse de P e redução média de 85,9% na PG (Tabela 8).

Das 34 linhagens mais produtivas e eficientes ao P avaliadas para a PG no ambiente com estresse de P, 20 linhagens produziram acima de 3000 kg.ha<sup>-1</sup> contra 16 linhagens ineficientes e menos produtivas que produziram menos 1000 kg.ha<sup>-1</sup>. As primeiras cinco linhagens que obtiveram os valores mais altos de PG e foram classificadas como eficientes ao P são: (SN147)SA7078 COMBINE7078, BR007B, SC964, SC1155 e SC702, e as últimas cinco linhagens ineficientes e menos produtivas foram: M35-1, RTAM428, BTx635, BTx623(BMX) e SEPON82 (Tabela 8).

**TABELA 8.** Produtividade de grãos (PG) em ambientes sem e com estresse de P e produtividade de grãos relativa (PGR) das linhagens mais produtivas e menos produtivas. Sete Lagoas – MG, 2011.

| Trat. | Pedigree                  | PG sem estresse de P | PG com estresse de P | PGR  |
|-------|---------------------------|----------------------|----------------------|------|
|       |                           | kg.ha <sup>-1</sup>  | kg.ha <sup>-1</sup>  | %    |
| 1     | (SN147)SA7078 COMBINE7078 | 7200,0               | 3992,0               | 44,6 |
| 83    | BR007B                    | 9000,0               | 3907,4               | 56,6 |
| 68    | SC964                     | 8666,7               | 3765,7               | 56,5 |
| 46    | SC1155                    | 6000,0               | 3714,8               | 38,1 |
| 172   | SC702                     | 8066,7               | 3697,2               | 54,2 |
| 198   | SC627                     | 8400,0               | 3330,9               | 60,3 |
| 67    | SC641                     | 6766,7               | 3272,7               | 51,6 |
| 14    | SC319                     | 4100,0               | 3262,7               | 20,4 |
| 215   | SOBERANO                  | 8150,0               | 3206,2               | 60,7 |

“...continua...”

"TABELA 8, cont."

|                                       |                                      |        |        |      |
|---------------------------------------|--------------------------------------|--------|--------|------|
| 72                                    | SC103                                | 6566,7 | 3197,5 | 51,3 |
| 96                                    | SC979                                | 7300,0 | 3192,4 | 56,3 |
| 25                                    | SC110                                | 6966,7 | 3140,7 | 54,9 |
| 236                                   | (SN69)PI48770 WHITE KAFIR (ASA N°21) | 8266,7 | 3109,1 | 62,4 |
| 37                                    | SC328                                | 5400,0 | 3104,9 | 42,5 |
| 41                                    | SC671                                | 5266,7 | 3092,6 | 41,3 |
| 125                                   | SC623                                | 6866,7 | 3051,9 | 55,6 |
| 6                                     | SC782                                | 7033,3 | 3035,8 | 56,8 |
| 194                                   | ICSV400                              | 8200,0 | 3024,7 | 63,1 |
| 61                                    | SC1328                               | 6466,7 | 3022,9 | 53,3 |
| 212                                   | B,Tx378                              | 7066,7 | 3007,4 | 57,4 |
| 171                                   | SC720                                | 7966,7 | 2998,2 | 62,4 |
| 38                                    | B,DLO357                             | 7366,7 | 2979,9 | 59,5 |
| 91                                    | SC414_12                             | 7166,7 | 2961,5 | 58,7 |
| 214                                   | Segaolane                            | 9166,7 | 2934,4 | 68,0 |
| 190                                   | (SN72)FC13642 PINK KAFIR (ASA N°22)  | 7866,7 | 2920,3 | 62,9 |
| 217                                   | SC566                                | 5300,0 | 2903,7 | 45,2 |
| 90                                    | SC112_14                             | 6800,0 | 2902,9 | 57,3 |
| 26                                    | SC648                                | 6100,0 | 2851,8 | 53,2 |
| 73                                    | SC373                                | 6466,7 | 2825,5 | 56,3 |
| 23                                    | SC124                                | 6800,0 | 2811,4 | 58,7 |
| 101                                   | MR732                                | 5966,7 | 2797,1 | 53,1 |
| 21                                    | SC637                                | 5866,7 | 2789,0 | 52,5 |
| 233                                   | SRN39                                | 6700,0 | 2779,3 | 58,5 |
| 86                                    | CMSXS116 (SC326-6)                   | 5066,7 | 2763,6 | 45,5 |
| 87                                    | CMSXS225                             | 3866,7 | 1252,8 | 67,6 |
| 218                                   | (SN311)FC8917 CHILTEX (ASA NO 8)     | 6500,0 | 1237,3 | 81,0 |
| 235                                   | SC224                                | 3300,0 | 1224,7 | 62,9 |
| 187                                   | SC987                                | 2350,0 | 1213,8 | 48,3 |
| 231                                   | SC1108                               | 2066,7 | 1212,4 | 41,3 |
| 85                                    | BTx644                               | 6000,0 | 1198,0 | 80,0 |
| 168                                   | SC303                                | 2900,0 | 1197,9 | 58,7 |
| 147                                   | R9188                                | 6400,0 | 1196,8 | 81,3 |
| 224                                   | SC480                                | 4100,0 | 1193,3 | 70,9 |
| 156                                   | B,Tx642                              | 5500,0 | 1180,5 | 78,5 |
| 181                                   | B,Tx623                              | 9200,0 | 1173,6 | 87,2 |
| 240                                   | CSM-63                               | 5500,0 | 1170,4 | 78,7 |
| 158                                   | SC833                                | 4466,7 | 1136,3 | 74,6 |
| 92                                    | SC549                                | 4866,7 | 1097,3 | 77,5 |
| 106                                   | SC489                                | 6200,0 | 1065,3 | 82,8 |
| 22                                    | R,Tx2907                             | 6300,0 | 1049,4 | 83,3 |
| 234                                   | AR2002                               | 5166,7 | 1046,9 | 79,7 |
| 232                                   | SC449                                | 4300,0 | 1022,2 | 76,2 |
| 66                                    | SC467                                | 4100,0 | 992,7  | 75,8 |
| 9                                     | SC55                                 | 2800,0 | 965,0  | 65,5 |
| 114                                   | SC937                                | 4966,7 | 944,2  | 81,0 |
| 119                                   | SC33                                 | 5333,3 | 923,5  | 82,7 |
| 239                                   | SC49                                 | 4500,0 | 922,8  | 79,5 |
| 116                                   | SC942                                | 3200,0 | 920,7  | 71,2 |
| 243                                   | SC1337                               | 8500,0 | 890,9  | 89,5 |
| 141                                   | SC192                                | 4900,0 | 853,8  | 82,6 |
| 152                                   | 88V1080                              | 7400,0 | 847,3  | 88,5 |
| 230                                   | SC532                                | 5000,0 | 837,0  | 83,3 |
| 219                                   | QL3 (India)                          | 6000,0 | 834,6  | 86,1 |
| 191                                   | M35-1                                | 6566,7 | 829,6  | 87,4 |
| 50                                    | R,TAM428                             | 5033,3 | 716,1  | 85,8 |
| 170                                   | B,Tx635                              | 6366,7 | 705,8  | 88,9 |
| 98                                    | B,Tx623(BMX)                         | 7266,7 | 634,7  | 91,3 |
| 200                                   | SEPON82                              | 3966,7 | 565,9  | 85,7 |
| Média das linhagens eficientes ao P   |                                      | 6915,0 | 3127,9 | 53,8 |
| Média das linhagens ineficientes ao P |                                      | 3966,7 | 565,9  | 85,7 |
| Média geral                           |                                      | 6047,0 | 2067,7 | 65,7 |

Produtividade de grãos relativa (PGR):  $(PG \text{ sem estresse de } P - PG \text{ com estresse de } P) / PG \text{ sem estresse de } P \times 100$ .

#### 5.4. Correlações fenotípicas, genotípicas e análise de trilha

As estimativas de correlações fenotípicas e genotípicas entre as características florescimento (FLOR), altura da planta (AP), produtividade de grãos (PG), teor de P nos grãos (TPG), teor de fósforo na folha (P FOLHA), teor de fósforo total na planta (PTOT), eficiência de aquisição ( $E_{AQ}$ ), eficiência de utilização interna de P ( $E_{UTIL}$ ), eficiência no uso de P ( $E_{USO}$ ), índice de colheita de P ( $I_{CP}$ ) e quociente de utilização de P ( $Q_{UTIL}$ ) avaliadas em ambiente com e sem estresse de P encontram-se na Tabela 9.

De acordo com os autores SANTOS & VENCOVSKY (1986), as correlações são, em geral, explicadas pelo efeito aditivo dos genes, afetando duas características ao mesmo tempo. Portanto, o conhecimento do grau de associação entre características agrônômicas é de grande importância para os melhoristas, principalmente porque a seleção sobre determinada característica pode alterar o comportamento de outra, ou seja, uma resposta correlacionada.

Observou-se a existência de variabilidade genética entre as linhagens de sorgo ( $p \leq 0,01$ ) através da análise de variância (Tabela 2) para as características avaliadas. Essa condição é importante para a exploração dos dados pela análise de trilha.

Verifica-se que os valores estimados para as correlações genéticas, encontram-se dentro do espaço paramétrico (-1 a 1) (Tabela 9), indicando boa confiabilidade nos resultados SANTOS & VENCOVSKY (1986). A característica PG, em ambiente com baixa disponibilidade de P, apresentou correlações altas e positivas com  $E_{AQ}$  ( $\hat{r}_F = 0,835^{**}$ ),  $E_{USO}$  ( $\hat{r}_F = 0,998^{**}$ ) e PTOT ( $\hat{r}_F = 0,834^{**}$ ). Entretanto, a  $E_{USO}$  foi obtida pelo produto entre PG e o TPG, explicando, portanto, a alta associação entre as características no ambiente com estresse de P. Esse resultado indica que a  $E_{USO}$  pode ser avaliada, indiretamente, pela PG em ambiente com estresse de P, RODRIGUES (2010) obteve resultados semelhantes. FOX (1978) encontrou correlação muita alta entre produção de massa seca da parte aérea e a quantidade de P absorvido em milho ( $\hat{r}_F = 0,96^{**}$ ). OZTURK et al. (2005) afirmam que a avaliação de produção de grãos em

ambiente com estresse de P seria o critério mais adequado na busca de genótipos mais eficientes no uso de P neste ambiente.

**TABELA 9.** Correlações fenotípicas e genotípicas entre as características florescimento (FLOR), altura de plantas (AP), produtividade de grãos (PG), teor de P nos grãos (TPG), teor de P nas folhas (P FOLHA), fósforo total na planta (PTOT), eficiência de aquisição ( $E_{AQ}$ ), eficiência de utilização interna de P ( $E_{UTIL}$ ), eficiência no uso de P ( $E_{USO}$ ), índice de colheita de P ( $I_{CP}$ ) e quociente de utilização de interna ( $Q_{UTIL}$ ) avaliadas em ambiente com e sem estresse de P. Sete Lagoas – MG, 2011.

| AMBIENTE BAIXO P |             |       |          |          |          |         |          |            |           |          |            |
|------------------|-------------|-------|----------|----------|----------|---------|----------|------------|-----------|----------|------------|
|                  |             | AP    | PG       | TPG      | P FOLHA  | PTOT    | $E_{AQ}$ | $E_{UTIL}$ | $E_{USO}$ | $I_{CP}$ | $Q_{UTIL}$ |
| FLOR             | $\hat{r}_F$ | 0,398 | -0,155*  | 0,191**  | 0,303**  | 0,061   | 0,062    | -0,418**   | -0,159*   | -0,434** | -0,193**   |
|                  | $\hat{r}_G$ | 0,052 | -0,142** | 0,222**  | 0,429**  | 0,135** | 0,136**  | -0,494     | -0,149    | -0,555   | -0,226**   |
| AP               | $\hat{r}_F$ |       | -0,040   | -0,054   | -0,071   | 0,083   | 0,085    | -0,228**   | -0,052    | -0,397** | 0,055      |
|                  | $\hat{r}_G$ |       | -0,065   | -0,059   | -0,113** | 0,082   | 0,085    | -0,268**   | -0,078    | 0,482**  | 0,059      |
| PG               | $\hat{r}_F$ |       |          | -0,273** | -0,295** | 0,834** | 0,835**  | 0,458*     | 0,998**   | 0,457**  | 0,248**    |
|                  | $\hat{r}_G$ |       |          | -0,371** | -0,479   | 0,843*  | 0,845*   | -0,568     | 1,000**   | 0,567    | 0,353**    |
| TPG              | $\hat{r}_F$ |       |          |          | 0,380**  | 0,155*  | 0,150*   | -0,747**   | -0,277**  | -0,183** | -0,974**   |
|                  | $\hat{r}_G$ |       |          |          | 0,438**  | 0,090   | 0,088    | -0,785**   | -0,374**  | -0,299** | -0,984     |
| P FOLHA          | $\hat{r}_F$ |       |          |          |          | 0,031   | 0,029    | -0,056**   | -0,298**  | -0,495** | -0,380**   |
|                  | $\hat{r}_G$ |       |          |          |          | -0,158  | -0,160   | -0,635**   | -0,484**  | -0,565*  | -0,461     |
| PTOT             | $\hat{r}_F$ |       |          |          |          |         | 0,998**  | -0,070     | 0,829**   | 0,066    | -0,171**   |
|                  | $\hat{r}_G$ |       |          |          |          |         | 1,000**  | 0,048      | 0,839*    | 0,190    | -0,110**   |
| $E_{AQ}$         | $\hat{r}_F$ |       |          |          |          |         |          | -0,066     | 0,831**   | 0,068    | -0,167**   |
|                  | $\hat{r}_G$ |       |          |          |          |         |          | 0,049      | 0,837*    | 0,192    | -0,111**   |
| $E_{UTIL}$       | $\hat{r}_F$ |       |          |          |          |         |          |            | 0,468**   | 0,767**  | 0,755**    |
|                  | $\hat{r}_G$ |       |          |          |          |         |          |            | 0,577     | 0,810*   | 0,780      |
| $E_{USO}$        | $\hat{r}_F$ |       |          |          |          |         |          |            |           | 0,468**  | 0,253**    |
|                  | $\hat{r}_G$ |       |          |          |          |         |          |            |           | 0,576    | 0,356*     |
| $I_{CP}$         | $\hat{r}_F$ |       |          |          |          |         |          |            |           |          | 0,168**    |
|                  | $\hat{r}_G$ |       |          |          |          |         |          |            |           |          | 0,299**    |
| AMBIENTE ALTO P  |             |       |          |          |          |         |          |            |           |          |            |
|                  |             | AP    | PG       |          |          |         |          |            |           |          |            |
| FLOR             | $\hat{r}_F$ | -0,10 | 0,13*    | -        | -        | -       | -        | -          | -         | -        | -          |
|                  | $\hat{r}_G$ | -0,10 | 0,16     | -        | -        | -       | -        | -          | -         | -        | -          |
| AP               | $\hat{r}_F$ |       | 0,20**   | -        | -        | -       | -        | -          | -         | -        | -          |
|                  | $\hat{r}_G$ |       | 0,22**   | -        | -        | -       | -        | -          | -         | -        | -          |

\*\* \*: Significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo teste t.

Correlações de média e baixa magnitude foram observadas no ambiente com estresse de P entre PG com as variáveis  $E_{UTIL}$  ( $\hat{r}_F=0,458^{**}$ ),  $I_{CP}$  ( $\hat{r}_F=0,457^{**}$ ) e  $Q_{UTIL}$  ( $\hat{r}_F=0,248^{**}$ ) (Tabela 9). Foi observada correlação significativa negativa entre as características PG com TPG ( $\hat{r}_F= -0,273^{**}$ ) e P Folha ( $\hat{r}_F=-0,295^{**}$ ) indicando que a seleção sobre uma delas não deve afetar a outra de forma previsível, nas linhagens de sorgo estudadas. A ausência de correlação entre TPG e PG foi reportada na cultura do trigo ( $\hat{r}_F=0,28$ ) por SHULTHESS et al. (1997) (Tabela 9).

Como, por definição, a característica TPG é o inverso da variável  $Q_{UTIL}$  e como esta última é um dos componentes da característica  $E_{UTIL}$  em ambiente com estresse de P, correlações fenotípicas de alta magnitude e negativas foram obtidas entre TPG e  $E_{UTIL}$  ( $\hat{r}_F=-0,747^{**}$ ) e entre TPG e  $Q_{UTIL}$  ( $\hat{r}_F=-0,974^{**}$ ) (Tabela 9). A correlação fenotípica baixa e negativa entre TPG e  $I_{CP}$  ( $\hat{r}_F=-0,183^{**}$ ) indica uma situação desfavorável para a seleção simultânea nestas duas características. O mesmo fato ocorreu entre TPG e  $E_{USO}$ , onde a correlação fenotípica obtida foi de  $\hat{r}_F= -0,277$ . Já, a correlação fenotípica de TPG com  $E_{AQ}$ , PTOT e P FOLHA, foram significativas, porém de baixa magnitude  $\hat{r}_F= 0,150^*$ ,  $\hat{r}_F=0,155^*$ ,  $\hat{r}_F=0,380^{**}$  respectivamente.

Ocorreu correlação fenotípica negativa, de baixa magnitude entre a característica P FOLHA com as características  $E_{UTIL}$  ( $\hat{r}_F= -0,056^{**}$ ),  $E_{USO}$  ( $\hat{r}_F= -0,298^{**}$ ),  $I_{CP}$  ( $\hat{r}_F= -0,495^{**}$ ) e  $Q_{UTIL}$  ( $\hat{r}_F= -0,380^{**}$ ) (Tabela 9).

Na característica PTOT, observou-se correlação fenotípica significativa e de alta magnitude com  $E_{AQ}$  ( $\hat{r}_F= 0,998^{**}$ ) e  $E_{USO}$  ( $\hat{r}_F= 0,829^{**}$ ). Entretanto, correlações de alta magnitude entre estas características já eram esperadas, pois, PTOT é um dos componentes da  $E_{AQ} = PTOT/Ps$  e  $E_{USO} = E_{AQ} \times E_{UTIL}$  o que influencia nos resultados destas correlações (Tabela 9).

As estimativas de correlações altas facilitam o processo de seleção para a eficiência de P, pois reduz o número de caracteres avaliados. Nos índices de  $E_{AQ}$  e  $E_{UTIL}$ , que compõem a  $E_{USO}$ , observou-se correlação fenotípica negativa e de baixa magnitude ( $\hat{r}_F= -0,066$ ) entre  $E_{AQ}$  e  $E_{UTIL}$ , assim como não foi verificada correlação

fenotípica importante entre  $E_{AQ}$  e os componentes de  $E_{UTIL}$ , que são:  $Q_{UTIL}$  ( $\hat{r}_F = -0,167^{**}$ ) e  $I_{CP}$  ( $\hat{r}_F = 0,068$ ) (Tabela 9).

Com relação às correlações fenotípicas observadas com a característica  $E_{UTIL}$  em condições de estresse de (Tabela 9), houve correlação alta e positiva com  $Q_{UTIL}$  ( $\hat{r}_F = 0,755^{**}$ ) e  $I_{CP}$  ( $\hat{r}_F = 0,767^{**}$ ).

Com respeito às correlações fenotípicas entre as variáveis ligadas à eficiência ao P ( $E_{AQ}$ ,  $E_{UTIL}$  e  $E_{USO}$ ) no ambiente com estresse de P, temos que: a PG apresentou uma alta associação com  $E_{AQ}$  ( $\hat{r}_F = 0,835^{**}$ ) e  $E_{USO}$  ( $\hat{r}_F = 0,998^{**}$ ) quando comparada a  $E_{UTIL}$  ( $\hat{r}_F = 0,458^{**}$ ); alta correlação negativa foi observada entre  $E_{UTIL}$  e TPG ( $\hat{r}_F = -0,747^{**}$ ), indicando que a redução do TPG pode ser critério de seleção ideal para aumentar a  $E_{UTIL}$  (Tabela 9).

A característica FLOR no ambiente com baixo P apresentou correlação de baixa magnitude e negativa com PG ( $\hat{r}_F = -0,155^*$ ),  $E_{UTIL}$  ( $\hat{r}_F = -0,418^{**}$ ),  $E_{USO}$  ( $\hat{r}_F = -0,159^*$ ),  $I_{CP}$  ( $\hat{r}_F = -0,434^{**}$ ), e  $Q_{UTIL}$  ( $\hat{r}_F = -0,193^{**}$ ) e não significativa com PTOT ( $\hat{r}_F = 0,061$ ), a AP ( $\hat{r}_F = 0,398$ ) e correlação baixa e positiva com TPG ( $\hat{r}_F = 0,191^{**}$ ) e P FOLHA ( $\hat{r}_F = 0,303^{**}$ ). A característica AP não apresentou correlação significativa com PG ( $\hat{r}_F = -0,040$ ), TPG ( $\hat{r}_F = -0,054$ ), P FOLHA ( $\hat{r}_F = -0,071$ ), PTOT ( $\hat{r}_F = 0,083$ ),  $E_{AQ}$  ( $\hat{r}_F = 0,085$ ),  $E_{USO}$  ( $\hat{r}_F = -0,052$ ) e  $Q_{UTIL}$  ( $\hat{r}_F = -0,055$ ) (Tabela 9).

Na estimativa da correlação genética foi obtido o valor de  $\hat{r}_G = 0,845$  para PG e  $E_{AQ}$ , PG e  $E_{USO}$   $\hat{r}_G = 1,00$  e PG e PTOT  $\hat{r}_G = 0,843$ ; esses resultados indicam que os genes responsáveis por aumentar a  $E_{AQ}$  pela planta contribuíram também para aumentar a  $E_{USO}$  e, por consequência, a produtividade de grãos (Tabela 9).

Uma correlação genética de alta magnitude foi obtida entre  $E_{UTIL}$  com  $I_{CP}$  e  $Q_{UTIL}$  ( $\hat{r}_G = 0,81$ ) e ( $\hat{r}_G = 0,79$ ), respectivamente (Tabela 9). Esses resultados indicam que os genes responsáveis por aumentar a  $E_{UTIL}$  contribuem também para aumentar o  $I_{CP}$  e  $Q_{UTIL}$ . FOX (1978) obteve resultados semelhantes. De acordo com os autores Vencovsky & Barriga (1993), as correlações geralmente são explicadas pelo efeito

aditivo dos genes, afetando dois caracteres simultaneamente. Deste modo, o conhecimento do grau de associação entre características agronômicas é de grande importância para os melhoristas, principalmente porque a seleção sobre determinada característica pode alterar o comportamento de outra.

No ambiente com alto P, observaram-se correlações fenotípicas positivas e de baixa magnitude entre as características FLOR e PG ( $\hat{r}_F=0,13^*$ ) e entre AP e PG ( $\hat{r}_F=0,20^{**}$ ). No entanto, entre FLOR com AP, verificou-se correlação fenotípica baixa e negativa (Tabela 9).

Deve-se levar em consideração que uma correlação simples entre variáveis, embora possua grande importância na quantificação da magnitude e direção (correlação negativa ou positiva) das influências de fatores na determinação dos caracteres complexos não relatam exatamente as relações de causa e efeito entre as variáveis, pois são consideradas medidas de associação. As correlações são, em geral, explicadas pelo efeito aditivo dos genes, afetando dois caracteres (VENCOVSKY & BARRIGA, 1993). Por isso, procedeu-se à análise de trilha (*Path Analysis*), a qual investiga a relação de causa-efeito e fornecem as quantidades dessas relações, denominadas coeficientes de trilha. Entretanto, para que a avaliação da associação entre caracteres tenha uma estimativa e forneça uma interpretação biologicamente apropriada e segura, é de grande importância que se teste o grau de multicolinearidade entre as variáveis independentes (CARVALHO & CRUZ, 1996).

As estimativas dos efeitos diretos e indiretos das variáveis explicativas florescimento (FLOR), altura de plantas (AP), teor de P no grão (TPG), teor de P nas folhas (P FOLHA), teor de P total na planta (PTOT), índice de colheita de P ( $I_{CP}$ ), quociente de utilização ( $Q_{UTIL}$ ), sob as variáveis básicas, produtividade de grãos (PG), eficiência de aquisição ( $E_{AQ}$ ), eficiência de uso de P ( $E_{USO}$ ) e eficiência de utilização interna de P ( $E_{UTIL}$ ) em linhagens de sorgo avaliadas em ambiente sob baixa disponibilidade de P obtidas pelo método de regressão em crista, estão apresentadas na Tabela 10.

**TABELA 10.** Estimativas dos efeitos diretos e indiretos das variáveis explicativas florescimento (FLOR), altura de plantas (AP), teor de P nos grãos (TPG), teor de P nas folhas (P FOLHA), teor de P total na planta (PTOT), índice de colheita de P ( $I_{CP}$ ), quociente de utilização interna ( $Q_{UTIL}$ ), sob as variáveis básicas, produtividade de grãos (PG), eficiência de aquisição ( $E_{AQ}$ ), eficiência de uso de P ( $E_{USO}$ ) e eficiência de utilização interna ( $E_{UTIL}$ ) em linhagens de sorgo avaliadas em ambiente com estresse de P obtidas pelo método regressão crista. Sete Lagoas – MG, 2011.

|            | Variáveis Explicativas         | Variáveis Básicas |               |               |               |
|------------|--------------------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|
|            |                                | PG                | $E_{AQ}$      | $E_{USO}$     | $E_{UTIL}$    |
| FLOR       | Efeito direto sobre            | 0,004             | 0,055         | -0,001        | -0,074        |
|            | Efeito indireto via AP         | -0,001            | 0,002         | -0,002        | -0,004        |
|            | Efeito indireto via TPG        | -0,033            | 0,000         | -0,037        | -0,056        |
|            | Efeito indireto via P FOLHA    | -0,043            | -0,009        | -0,037        | -0,040        |
|            | Efeito indireto via PTOT       | 0,085             | 0,109         | 0,096         | 0,003         |
|            | Efeito indireto via $I_{CP}$   | -0,127            | -0,041        | -0,135        | -0,238        |
|            | Efeito indireto via $Q_{UTIL}$ | -0,028            | 0,007         | -0,031        | -0,071        |
|            | <b>TOTAL</b>                   | <b>-0,142</b>     | <b>0,136</b>  | <b>-0,149</b> | <b>-0,494</b> |
| AP         | Efeito direto sobre            | -0,026            | 0,043         | -0,041        | -0,090        |
|            | Efeito indireto via FLOR       | 0,000             | 0,002         | -0,000        | -0,003        |
|            | Efeito indireto via TPG        | 0,008             | -0,000        | 0,010         | 0,015         |
|            | Efeito indireto via P FOLHA    | 0,011             | -0,002        | 0,010         | 0,010         |
|            | Efeito indireto via PTOT       | 0,051             | 0,066         | 0,058         | 0,001         |
|            | Efeito indireto via $I_{CP}$   | -0,110            | -0,035        | -0,117        | -0,207        |
|            | Efeito indireto via $Q_{UTIL}$ | 0,007             | -0,002        | 0,008         | 0,018         |
|            | <b>TOTAL</b>                   | <b>-0,065</b>     | <b>0,085</b>  | <b>-0,078</b> | <b>-0,268</b> |
| TPG        | Efeito direto sobre            | -0,148            | 0,003         | -0,169        | -0,254        |
|            | Efeito indireto via FLOR       | 0,001             | 0,012         | -0,000        | -0,016        |
|            | Efeito indireto via AP         | 0,001             | -0,002        | 0,002         | 0,005         |
|            | Efeito indireto via P FOLHA    | -0,044            | -0,009        | -0,038        | -0,041        |
|            | Efeito indireto via PTOT       | 0,056             | 0,072         | 0,063         | 0,002         |
|            | Efeito indireto via $I_{CP}$   | -0,068            | -0,022        | -0,073        | -0,128        |
|            | Efeito indireto via $Q_{UTIL}$ | -0,127            | 0,343         | -0,135        | -0,312        |
|            | <b>TOTAL</b>                   | <b>-0,371</b>     | <b>0,088</b>  | <b>-0,374</b> | <b>-0,785</b> |
| P FOLHA    | Efeito direto sobre            | -0,101            | -0,022        | -0,088        | -0,093        |
|            | Efeito indireto via FLOR       | 0,001             | 0,024         | -0,000        | -0,031        |
|            | Efeito indireto via AP         | 0,003             | -0,004        | 0,004         | 0,010         |
|            | Efeito indireto via TPG        | -0,065            | 0,001         | -0,074        | -0,111        |
|            | Efeito indireto via PTOT       | -0,099            | -0,127        | -0,112        | -0,003        |
|            | Efeito indireto via $I_{CP}$   | -0,130            | -0,042        | -0,138        | -0,243        |
|            | Efeito indireto via $Q_{UTIL}$ | -0,058            | 0,016         | -0,063        | -0,146        |
|            | <b>TOTAL</b>                   | <b>-0,479</b>     | <b>-0,160</b> | <b>-0,484</b> | <b>-0,635</b> |
| PTOT       | Efeito direto sobre            | 0,626             | 0,805         | 0,709         | 0,023         |
|            | Efeito indireto via FLOR       | 0,000             | 0,007         | -0,000        | -0,010        |
|            | Efeito indireto via AP         | -0,002            | 0,003         | -0,003        | -0,007        |
|            | Efeito indireto via TPG        | -0,013            | 0,000         | -0,015        | -0,022        |
|            | Efeito indireto via PTOT       | 0,015             | 0,003         | 0,013         | 0,014         |
|            | Efeito indireto via $I_{CP}$   | 0,043             | 0,014         | 0,046         | 0,081         |
|            | Efeito indireto via $Q_{UTIL}$ | -0,014            | 0,003         | -0,015        | -0,035        |
|            | <b>TOTAL</b>                   | <b>0,843</b>      | <b>1,00</b>   | <b>0,839</b>  | <b>0,048</b>  |
| $I_{CP}$   | Efeito direto sobre            | 0,229             | 0,074         | 0,244         | 0,430         |
|            | Efeito indireto via FLOR       | -0,002            | -0,031        | 0,000         | 0,041         |
|            | Efeito indireto via AP         | 0,0127            | -0,021        | 0,019         | 0,043         |
|            | Efeito indireto via TPG        | 0,044             | -0,001        | 0,050         | 0,076         |
|            | Efeito indireto via P FOLHA    | 0,057             | 0,012         | 0,049         | 0,053         |
|            | Efeito indireto via PTOT       | 0,119             | 0,152         | 0,134         | 0,004         |
|            | Efeito indireto via $Q_{UTIL}$ | 0,037             | -0,010        | 0,041         | 0,095         |
|            | <b>TOTAL</b>                   | <b>0,567</b>      | <b>0,192</b>  | <b>0,576</b>  | <b>0,810</b>  |
| $Q_{UTIL}$ | Efeito direto sobre            | 0,126             | -0,034        | 0,137         | 0,317         |
|            | Efeito indireto via FLOR       | -0,001            | -0,012        | 0,000         | 0,016         |
|            | Efeito indireto via AP         | -0,001            | 0,002         | -0,002        | -0,005        |
|            | Efeito indireto via TPG        | 0,146             | -0,003        | 0,166         | 0,250         |

“...continua...”

"TABELA 10, cont."

|                                                       |              |               |              |              |
|-------------------------------------------------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| Efeito indireto via P FOLHA                           | 0,046        | 0,010         | 0,040        | 0,043        |
| Efeito indireto via PTOT                              | -0,069       | -0,089        | -0,078       | -0,002       |
| Efeito indireto via $I_{CP}$                          | 0,068        | 0,022         | 0,073        | 0,128        |
| <b>TOTAL</b>                                          | <b>0,353</b> | <b>-0,111</b> | <b>0,356</b> | <b>0,798</b> |
| <b>Coefficiente de determinação <math>R^2</math>=</b> | <b>0,806</b> | <b>0,840</b>  | <b>0,894</b> | <b>0,922</b> |
| <b>Valor de K</b>                                     | <b>0,296</b> | <b>0,203</b>  | <b>0,145</b> | <b>0,155</b> |
| <b>Efeito da variável residual=</b>                   | <b>0,437</b> | <b>0,399</b>  | <b>0,325</b> | <b>0,277</b> |

As variáveis explicativas ou dependentes FLOR, AP, TPG, P FOLHA, PTOT,  $I_{CP}$  e  $Q_{UTIL}$  foram avaliadas quanto ao grau de colinearidade. O resultado obtido foi à detecção de multicolinearidade entre as variáveis explicativas com valor obtido de 106,7. Este valor, segundo MONTGOMERY & PECK (2001), é considerado valor de colinearidade moderada. Os autores consideram que o número de condições (NC) de multicolinearidade maior que 100 é considerado moderado a forte e com isto pode constituir problema sério na análise, sendo assim, realizou-se a análise de trilha pelo método de regressão em crista considerando a colinearidade.

No método de regressão em crista, para que uma variável independente seja considerada importante sobre a variável dependente, é necessário que o valor numérico do seu efeito direto seja maior que o efeito da variável residual. É importante também que os coeficientes de correlação sejam em valores absolutos e altos. Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), observados no modelo de análise de trilha (Tabela 10), foram elevados (superiores a 0,80). O  $R^2$  próximo ou igual à unidade 1, se aceita que todas as variáveis explicativas foram eficientes para elucidar as variações que ocorreram nas variáveis básicas. No melhoramento de plantas, é de grande importância identificar, dentre os caracteres de alta correlação com a variável básica, aqueles que têm maior efeito direto em sentido favorável à seleção, de tal maneira que a resposta correlacionada por meio da seleção indireta seja eficiente (CRUZ et al., 2004). Deste modo, as variáveis explicativas que obtiveram maiores efeitos diretos, ou seja, que explicaram o efeito da variável explicativa sob a variável básica, para a seleção de linhagens de sorgo com uma maior eficiência ao P foram PTOT para PG,  $E_{AQ}$  e  $E_{USO}$ , obtendo os valores de 0,626, 0,805 e 0,709, respectivamente. Esses resultados são confirmados pela alta estimativa de coeficientes de correlação  $\hat{r}_G = 0,843$ ,  $\hat{r}_G = 1,00$  e

$\hat{r}_G=0,839$  (Tabela 10) entre PTOT com PG, PTOT com  $E_{AQ}$  e PTOT com  $E_{USO}$ , respectivamente.

O  $I_{CP}$  obteve efeito direto em  $E_{UTIL}$  no valor de 0,430, valor este superior ao efeito da variável residual 0,277 e coeficiente de correlação de  $\hat{r}_G=0,810$  e  $Q_{UTIL}$  com efeito direto em  $E_{UTIL}$  de 0,317 com coeficiente de determinação de 0,922 e  $\hat{r}_G=0,78$ , porém, nestes dois últimos casos envolvendo  $I_{CP}$  com  $E_{UTIL}$  e  $Q_{UTIL}$  com  $E_{UTIL}$ , é importante observar que apesar de os valores de efeito direto sob a variável básica a ambos os casos serem superiores à variável residual e assim explicar os efeitos das variáveis explicativas ( $I_{CP}$  e  $Q_{UTIL}$ ) diretas sob a variável básica ( $E_{UTIL}$ ), deve-se levar em consideração que o  $I_{CP}$  e  $Q_{UTIL}$  são componentes da  $E_{UTIL}$  (Tabela 10). Esses resultados na análise de trilha indicam que algumas variáveis explicativas apresentaram efeito direto e total baixos, porém, não são influenciados por outros caracteres nas variáveis básicas, pois, nenhuma das variáveis explicativas foi influenciada indiretamente por outras características avaliadas.

## 5.5. Análise de componentes principais

A análise de componentes principais (PCA) é uma técnica de transformação linear para redução de dimensionalidade de dados multivariados. A técnica baseia-se nos componentes principais de um conjunto de  $v$  variáveis correlacionadas; são novas  $v$  variáveis utilizando as seguintes propriedades: são funções lineares das  $v$  variáveis originais; são não correlacionadas umas com as outras e explicam sucessivamente o máximo da variação original, além disso, a (PCA) possibilita o estudo da variabilidade genética entre um grupo de genitores, tem a vantagem de possibilitar a avaliação da importância de cada característica avaliada sobre a variação total disponível entre os genótipos avaliados. Essa avaliação possibilita o descarte de características que contribuem pouco para a discriminação do genótipo avaliado, reduzindo, desta forma, a mão de obra, o tempo e o custo despendidos na experimentação agrícola (IEZZONI & PRITTS, 1991). Estes mesmos autores afirmam que, geralmente, descritores com

maiores autovetores e maiores coeficientes de correlação são considerados de maior importância para o respectivo componente.

Na Tabela 11, estão apresentados os componentes principais (PCA), autovalores, porcentagem da variância (%), porcentagem acumulada (%) e coeficientes de ponderação associados a florescimento (FLOR), altura de plantas (AP), produtividade de grãos (PG), teor de P nos grãos (TPG), teor de P nas folhas (P FOLHA), teor de P total na planta (PTOT), eficiência de aquisição ( $E_{AQ}$ ), eficiência de utilização interna de P ( $E_{UTIL}$ ), eficiência de uso de P ( $E_{USO}$ ), índice de colheita de P ( $I_{CP}$ ) e quociente de utilização ( $Q_{UTIL}$ ), obtidos em ambiente com estresse de P.

Na análise de PCA realizada para as características FLOR, AP, PG, TPG, P FOLHA, PTOT,  $E_{AQ}$ ,  $E_{UTIL}$ ,  $E_{USO}$ ,  $I_{CP}$  e  $Q_{UTIL}$ , (Tabela 11) dentre os PCA obtidos os três primeiros componentes explicaram 81,36% da variação existente entre os dados originais. Nesse sentido, no primeiro componente principal, as características de maior contribuição na discriminação das linhagens foram: AP, PG,  $E_{USO}$  e  $E_{UTIL}$ . No segundo componente destacaram-se a TPG, PTOTAL  $E_{AQ}$  e  $E_{UTIL}$ . Os resultados encontrados no segundo componente indicam que as linhagens de sorgo apresentaram maior eficiência de aquisição ( $E_{AQ}$ ) em detrimento da eficiência de uso ( $E_{USO}$ ), lembrando que a  $E_{USO}$  é a função do produto de  $E_{AQ}$  e  $E_{UTIL}$ , e no terceiro PCA os destaques foram: AP, TPG,  $I_{CP}$  e  $Q_{UTIL}$ . Analisando os dois primeiros componentes pode-se observar que as características AP, PG,  $E_{AQ}$ , PTOT,  $E_{USO}$ ,  $E_{UTIL}$  e o TPG foram as variáveis que mais contribuíram com a variação dos dados. Os resultados obtidos estão de semelhantes a aqueles encontrados na análise de trilha em que a variável PTOT, considerada como explicativa, é a única causa do efeito direto nas variáveis básicas PG,  $E_{AQ}$  e  $E_{USO}$ , além de altas estimativas de correlações genéticas.

**TABELA 11.** Componentes principais (CP) obtidos, autovalores, porcentagem da variância (%), porcentagem acumulada (%) e coeficientes de ponderação associados a florescimento (FLOR), altura de Plantas (AP), produtividade de grãos (PG), teor de P nos grãos (TPG), teor de P nas folhas (P FOLHA), teor de P total na planta (PTOT), eficiência de aquisição ( $E_{AQ}$ ), eficiência de utilização interna de P ( $E_{UTIL}$ ), eficiência de uso de P ( $E_{USO}$ ), índice de colheita de P ( $I_{CP}$ ) e quociente de utilização de P ( $Q_{UTIL}$ ) obtidos em ambiente com estresse de P. Sete Lagoas – MG, 2011.

| Nº Componente<br>PRINCIPAL | Autovalor | %     | %      | Coeficientes de ponderação associados: |        |        |        |         |         |          |            |           |          |            |
|----------------------------|-----------|-------|--------|----------------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|----------|------------|-----------|----------|------------|
|                            |           |       |        | FLOR                                   | AP     | PG     | TPG    | P FOLHA | P TOTAL | $E_{AQ}$ | $E_{UTIL}$ | $E_{USO}$ | $I_{CP}$ | $Q_{UTIL}$ |
| 1                          | 4,30      | 0,39  | 39,16  | 0,173                                  | 0,502  | -0,435 | 0,264  | 0,260   | -0,266  | -0,268   | -0,372     | -0,438    | -0,315   | -0,256     |
| 2                          | 3,14      | 0,28  | 67,79  | 0,181                                  | 0,066  | 0,231  | 0,350  | 0,219   | 0,462   | 0,461    | -0,331     | 0,226     | -0,147   | -0,359     |
| 3                          | 1,49      | 0,13  | 81,36  | 0,278                                  | 0,570  | 0,035  | -0,398 | 0,043   | 0,075   | 0,077    | -0,078     | 0,027     | -0,505   | 0,401      |
| 4                          | 0,98      | 0,08  | 90,31  | 0,551                                  | -0,639 | 0,048  | -0,212 | 0,424   | -0,000  | -0,000   | 0,097      | 0,055     | -0,056   | 0,201      |
| 5                          | 0,66      | 0,06  | 96,39  | 0,703                                  | 0,070  | -0,008 | 0,133  | -0,652  | -0,054  | -0,051   | 0,015      | -0,009    | 0,179    | -0,134     |
| 6                          | 0,33      | 0,03  | 99,40  | 0,244                                  | 0,503  | 0,030  | 0,083  | 0,525   | -0,106  | -0,098   | 0,295      | 0,032     | 0,533    | -0,095     |
| 7                          | 0,03      | 0,003 | 99,72  | -0,011                                 | 0,006  | 0,338  | -0,498 | 0,022   | -0,300  | -0,281   | -0,378     | 0,308     | 0,029    | -0,476     |
| 8                          | 0,02      | 0,002 | 99,93  | -0,001                                 | 0,011  | 0,402  | 0,569  | 0,027   | -0,300  | -0,365   | 0,068      | 0,364     | -0,289   | 0,261      |
| 9                          | 0,00      | 0,000 | 99,96  | 0,007                                  | 0,000  | -0,103 | -0,065 | -0,009  | -0,073  | 0,749    | 0,694      | 0,103     | -0,462   | -0,516     |
| 10                         | 0,00      | 0,000 | 99,99  | -0,003                                 | 0,002  | -0,512 | 0,038  | 0,000   | -0,461  | 0,426    | -0,130     | 0,556     | 0,064    | 0,103      |
| 11                         | 0,00      | 0,000 | 100,00 | -0,002                                 | -0,006 | 0,449  | 0,021  | 0,000   | 0,544   | 0,544    | 0,019      | -0,451    | -0,011   | 0,009      |

## 6. CONCLUSÕES

Foram identificadas e classificadas 107 linhagens eficientes ao fósforo e 138 linhagens ineficientes, avaliadas em ambientes com e sem estresse de fósforo de acordo com a metodologia proposta por FAGERIA & BARBOSA FILHO (1982).

Na importância relativa das eficiências, o índice eficiência de aquisição foi o que melhor se relacionou com a eficiência uso de fósforo do que a eficiência de utilização interna, sendo assim, os mecanismos de maior importância são os que estão ligados à eficiência de aquisição e não aqueles que estão ligados à eficiência de utilização interna.

De acordo com os resultados das correlações fenotípicas e genotípicas o índice de eficiência de uso de fósforo pode ser avaliado indiretamente, pela estimativa da produtividade de grãos em ambientes com estresse de fósforo.

Dentre as variáveis explicativas ou independentes na análise de trilha, o teor de P total nas plantas foi a melhor variável que explicou os efeitos diretos nas variáveis básicas ou dependentes eficiência de aquisição e eficiência de uso.

Foram identificados três componentes principais, que, juntos, explicaram 81% da variação original dos dados. As características que obtiveram mais escores foram produtividade de grãos e os índices de eficiência de aquisição, eficiência de uso e eficiência de utilização interna de P.

## 7. REFERÊNCIAS

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

APPS. Associação Paulista de Produtores de Sorgo. **Evolução da área e produção de sorgo no Brasil**. Disponível em: <[http://www.apps.agr.br/dados\\_estatisticos/](http://www.apps.agr.br/dados_estatisticos/)>. Acesso em: 01 mar. 2012a.

APPS. Associação Paulista de Produtores de Sorgo. **Sorgo**: ótima opção para a safrinha. Disponível em: <[http://www.apps.agr.br/upload/ax2\\_2402200649695300\\_sorgo-seednewsjan2006.pdf](http://www.apps.agr.br/upload/ax2_2402200649695300_sorgo-seednewsjan2006.pdf)>. Acesso em: 01 mar. 2012b.

ASHER, C. J.; LONERAGAN, J. F. Response of plants to phosphate concentration in solution culture. **Soil Science**, Baltimore, v. 103, p. 311-318, 1967.

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

BALDWIN, J. C.; KARTHIKEYAN, A. S.; CAO, A.; RAGHOTHAMA, K. G. Biochemical and molecular analysis of LePS2;1: a phosphate starvation induced protein phosphatase gene from tomato. **Planta**, Berlin, v. 228, n. 2, p. 273-280, 2008.

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.

BÄNZIGER, M. G. O.; EDMEADES, G. O.; BECK, D.; BELLON, M. **Breeding for drought and nitrogen stress tolerance in maize**: from theory to practice. México, D.F: CIMMYT, 2000. 68 p.

BRANCOURT-HULMEL, M.; HEUMEZ, E.; PLUCHARD, P.; BEGHIN, D.; DEPATUREAUX, C.; GIRAUD, A.; LE GOUIS, J. Indirect versus direct selection of winter wheat for low input or high input levels. **Crop Science**, Madison, v. 45, p. 1427-1431, 2005.

BATES, T. R.; LYNCH, J. P. Root hairs confer a competitive advantage under low phosphorus availability. **Plant and Soil**, The Hague, v. 236, n. 2, p. 243-250, Oct. 2001.

BAYUELO-JIMÉNEZ, J. S.; GALLARDO-VALDÉZ, M.; PÉREZ-DECELIS, V. A.; MAGDALENO-ARMAS, M. L.; OCHOA, I.; CÁRDENAS-NAVARRO, R. Genotypic variation for root traits of maize (*Zea mays* L.) from the Purhepecha Plateau under contrasting phosphorus availability. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 121, p. 350-362, 2011.

BELSLEY, D. A.; KUH, E.; WELSCH, R. E. **Regression Diagnostics: identifying influential and sources of collinearity**. New Jersey. Willey & Sons, 2004. 314 p.

BORGES, V.; SOBRINHO, S. F.; LEDO, F. J. S.; KOPP, M. M. Associação entre caracteres e análise de trilha na seleção de progênies de meios-irmãos de *Brachiaria ruziensis*. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 58, p. 765-772, 2011.

CAMACHO-CRISTÓBAL, J. J.; HERRERA-RODRÍGUEZ, M. B.; BEATO, B. M.; REXACH, J.; NAVARRO-GOCHICOA, M. T.; MALDONADO, J. M.; GONZÁLEZ-FRANCO, A. The expression of several cell wall-related genes in *Arabidopsis* roots is down-regulated under boron deficiency. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 63, 351-358, 2008.

CARVALHO, S. P.; CRUZ, C. D. Diagnosis of multicollinearity: assessment of the condition of correlation matrices used in genetic studies. **Brazilian Journal of Genetics**, Ribeirão Preto, v. 19, p. 479-484, 1996.

CARVALHO, C. G. P.; BORSATO, R.; CRUZ, C. D.; VIANA, J. M. S. Path analysis under multicollinearity in S0 x S0 maize hybrids. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Londrina, v. 1, p. 263-270, 2001.

CHIEN, S. H.; MENON, R. G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 41, n. 3, p. 227-234, Jan. 1995.

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.; DUNCAN, R. R. Improvement of plant mineral nutrition through breeding. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 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.

COIMBRA, J. L. M.; BENIN, G.; VIEIRA, E. A.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, F. I. F.; GUIDOLIN, A. F.; SOARES, A. P. Consequências da multicolinearidade sobre a análise de trilha em canola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, p. 347-352, 2005.

COIMBRA, J. L. M.; GUIDOLIN, A. F.; ALMEIDA, M. L.; SANGOI, L.; ENDER, M.; MEROTTO JUNIOR, A. Análise de trilha dos componentes do rendimento de grãos em genótipos de canola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 1421-1428, 2004.

COOKE, G. W. Maximizing fertilizer efficiency by overcoming constraints to crop growth. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 10, n. 1, p. 1357-1369, 1987.

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. **Programa Genes**: estatística experimental e matrizes. Viçosa: UFV, 2006. 285 p.

CRUZ, S. S. C.; OLIVEIRA, S. C.; CRUZ, S. C. S.; MACHADO, C. G.; PEREIRA, R. G. Adubação fosfatada para o sorgo granífero. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 27., 2008, Londrina. **Resumos...** Londrina: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2008. 1 CD-ROM.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2004. 480 p.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, R. G. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F. et al. (Org.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 91- 132.

DILLON, S. L.; SCHAPTER, F. M.; HENRY, R. J.; CORDEIRO, J.; IZQUIERDO, L.; SLADE, L. Domesticacion to crop improvement: genetic resources for Sorghum and Saccharum (Andropogoneae). **Annals of Botany**, London, v. 100, p. 975-989, 2007.

EZEAKU, I. E.; MOHAMMED, S. G. Character association and path analysis in grain sorghum. **Africa Journal Biotechnology**, v. 5, p. 1337-1340, 2006.

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. Publication, 94-2).

FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P. Avaliação preliminar de cultivares de arroz irrigado para maior eficiência de utilização de nitrogênio **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 12, p. 1709-1712, dez. 1982.

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

FASSBENDER, R. L. F. **Química dos solos**: com ênfase em solos de America Latina. São José: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1994. 422 p.

FAO. **How to feed the world in 2050**. Roma, 2010. Disponível em: <[http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert\\_paper/How\\_to\\_Feed\\_the\\_World\\_in\\_2050.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf)>. Acesso em: 01 mar. 2012.

FIDELIS, R. R.; MIRANDA, G. V.; SANTOS, I. C. S. GALVÃO, J. C. C. Metodologias de seleção de cultivares de milho para eficiência na absorção e utilização de nitrogênio. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 52, n. 2, p. 987-1002, 2008.

FÖHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants. I. External and internal P requirement and P uptake efficiency of different plant species. **Plant and Soil**, The Hague, v. 110, n. 1, p. 101-109, Aug. 1988.

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.

FRITSCH NETO, R.; MIRANDA, G. V.; DELIMA, R. O.; SOUZA, L. M. SILVA, J. Herança de caracteres associados à eficiência de utilização do fósforo em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 5, p. 465-471, maio 2010.

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.

FURTINI, I. V. **Implicações da seleção no feijoeiro efetuada em ambientes contrastantes em níveis de nitrogênio**. 2008. 67 p. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

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

GERLOFF, G. C.; GABELMAN, W. H. Genetic basis of inorganic plant nutrition. In: LÄUCHLI, A.; BIELESKI, R. L. (Ed.). **Inorganic plant nutrition**. Berlin: Springer-Verlag, 1983. p. 453-480. (Encyclopedia of Plant Physiology, v.15B).

GORZ, H. J.; HASKINS, F. A.; PEDERSON, J. F.; ROSS, W. M. Combining ability effects for mineral elements in forage sorghum hybrids. **Crop Science**, Madison, v. 27, p. 216-219, 1987.

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

GRANT, C. A.; FLATEN, D. N.; TOMASIEWICZ, D. J.; SHEPPARD, S. C. **A importância do fósforo no desenvolvimento da planta**. Piracicaba: POTAFOS, 2001. 5 p. (Informações Agronômicas, 95).

GUIMARÃES, L. J. M. **Caracterização de genótipos de milho desenvolvidos sob estresse de nitrogênio e herança da eficiência de uso deste nutriente**. 2006. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

GUPPY, C. N.; MENZIES, N. W.; MOODY, P. W.; BLAMEY, F. P. C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 43, n. 2, p. 189-202, 2005.

HOERL, A. E.; KENNARD, R. W. Ridge regression: applications to nonorthogonal problems. **Technometrics**, Washington, v. 12, p. 69-82, 1970.

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

HAVLIN, J. L.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil fertility and fertilizers**: an introduction to nutrient management. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1999. 499 p.

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 of wheat. In: BARROW, N. J. (Ed). **Plant nutrition**: from genetic engineering to field practice. Dordrecht: Kluwer Academic, 1993. p. 367-370.

IEZZONI, A. F.; PRITTS, M. P. Applications of principal component analysis to horticultural research. **HortScience**, Alexandria, v. 26, n. 4, p. 334-338, 1991.

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.

KHAMIS, S.; CHAILLOU, S.; LAMAZE, T. CO<sub>2</sub> assimilation and partitioning of carbon in maize plants deprived of orthophosphate. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 41, n. 233, p. 1619-1625, 1990.

LI, C. C. **Path analysis**: a primer. 3. ed. Pacific Grove: Boxwood Press, 1985. 347 p.

LIU, Y.; GUOHUA, M.; CHEN, F. ZHANG, F.; ZHANG F. Rhizosphere effect and root growth of two maize (*Zea mays* L.) genotypes with contrasting P efficiency at low P availability. **Plant Science**, Limerick, v. 167, p. 217-223, 2004.

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.

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, Feb. 2004.

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.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London: Academic Press, 1995. 888 p.

MENDES, F. F. **Controle genético de características relacionadas à eficiência no uso de fósforo em milho tropical**. 2012. 114 f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

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

MOLL, R. H.; KAMPRATH, E. J.; JACKSON, W. A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, p. 562-564, 1982.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A. **Introduction to linear regression analysis**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. 504 p.

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

NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. Relação solo-planta. In: NOVAIS, R. F. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 133-204.

OZTURK, L.; EKER, S.; TORUN, 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. 69, n. 1/2, p. 69-80, Feb. 2005.

PARENTONI, S. N. **Estimativas de efeitos gênicos de diversos caracteres relacionados à eficiência e resposta ao fósforo em milho tropical**. 2008. 207 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

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

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

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

PARENTONI, S. N.; VASCONCELOS, C. A.; ALVES, V. M. C.; PACHECO, C. A.; SANTOS, M. X.; GAMA, E. E. G.; MEIRELLES, 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; Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2000. p. 92.

PEDREIRA, M. S.; GIMENES, N. S.; MOREIRA, A. L.; REIS, R. A.; BERCHIELLI, T. T. Características agronômicas e bromatológicas de híbridos de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cultivados para produção de silagem. **ARS Veterinária**, Jaboticabal, v. 21, p. 183-202, 2005.

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.

RAGHOTHAMA, K. G. Phosphate acquisition. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 50, p. 665-693, June 1999.

RAIJ, B. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: POTAFOS, 1991. 343 p.

RESENDE, M. D. V. **Matemática e estatística na análise de experimentos**. Colombo: Embrapa Florestas, 2007. 362 p.

RESENDE, A. V. **Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do cerrado**. 2004. 169 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

RIBAUT, 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.

ROCHA, M. C.; MIRANDA, G. V.; SOARES, M. O.; CANTÃO, F. R. O.; SILVA, L. A.; RODRIGUES, F.; MAGALHÃES, P. C.; TARDIN, F. D.; SANTOS, J. A. S. Caracterização da morfologia radicular de linhagens de sorgo contrastantes para eficiência do uso de fósforo. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 27., 2008, Londrina. **Resumos...** Londrina: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2008. 1 CD-ROM.

ROCHA, M. M.; FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q.; CARVALHO, H. W. L.; BELARMINO FILHO, J.; RAPOSO, J. A. A.; ALCÂNTARA, J. P.; RAMOS, S. R. R.; MACHADO, C. F. Adaptabilidade e estabilidade produtiva de genótipos de feijão-caupi de porte semi-ereto na Região Nordeste do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 9, p. 1283-1289, 2007.

RODRIGUES, F. **Fenotipagem e seleção de linhagens de sorgo quanto à eficiência reposta ao fósforo**. 2010. 95 f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

RODRIGUES, J. A. S. (Ed.). **Cultivo do sorgo**. 3. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2007. (Embrapa Milho e Sorgo. Sistema de produção, 2). Disponível em: <<http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo/index.htm>>. Acesso em: 01 mar. 2012.

RODRIGUES, L. S.; ANTUNES, I. F.; TEIXEIRA, M. G.; SILVA, J. B. Divergência genética entre cultivares locais e cultivares melhoradas de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 9, p. 1275-1284, 2002.

RODRIGUES, G. B.; MARIM, B. G.; SILVA, D. J. H.; MATTEDI, A. P.; ALMEIDA, V. S. Análise de trilha de componentes de produção primários e secundários em tomateiro do grupo Salada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 2, p. 155-162, fev. 2010.

ROSEN, C. J.; KORCAK. R. F. Introduction to the colloquium. **HortScience**, Alexandria, v. 24, n. 4, p. 558-559, 1989.

ROTILI, E. A.; FIDELIES, R. R.; SANTOS, M. M.; CASTRO NETO, M. D.; KICHEL, E.; CANCELLIER, E. L. Eficiência no uso de fósforo de variedades de arroz cultivadas em solos de várzea irrigada. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 57, n. 3, p. 415-420, maio/jun. 2010.

SAS, Institute. SASonlinedoc<sup>R</sup>: version 8. Cary, 1999.

SAWAZAKI, E. Sorgo forrageiro ou misto, sorgo granífero, sorgo vassoura - *Sorghum bicolor* L. Moench. In: FALH, J. L. (Ed.). **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**. 6. ed. Campinas: IAC, 1998. p. 44-49.

SANTOS, J.; VENCOVSKY, R. Correlação fenotípica e genética entre alguns caracteres agronômicos do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). **Ciência e Prática**, Lavras, v. 10, p. 265-272, 1986.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, p. 576-586, 2008.

SCHAFFERT, R. E. ALVES, V. M. C.; PITTA, G.; BAHIA, A.; SANTOS, F. Genetic variability in sorghum for efficiency and responsiveness. In: \_\_\_\_\_. **Plant nutrition: food security and sustainability of agro-ecosystems**. Netherlands: Academics, 2001. p. 72-73.

SCHAFFERT, R. E.; ALVES, V. M. C.; BAHIA FILHO, A. F. C.; PITTA, G. V. E.; SANTOS, F. G.; OLIVEIRA, C. A. Sorghum genetic resources with contrasting

phosphorus efficiency. In: **Workshop on improving phosphorus acquisition efficiency in marginal soils**, 1999, Sete Lagoas. Proceedings... Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2001. p. 139-149.

SHANE, M.; LAMBERS, H. Cluster roots: a curiosity in context. **Plant and Soil**, The Hague, v. 274, n. 1/2, p. 111-125, Jul. 2005.

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

SILVA, F. C. da. **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.

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, S. A.; CARVALHO, F. I. F.; NEDEL, J. L.; CRUZ, P. J.; SILVA, J. A. G.; CAETANO, V. R.; HARTWIG, I.; SOUSA, C. S. Análise de trilha para os componentes de rendimento de grãos em trigo. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 2, p. 191-196, 2005.

SCHULTHESS, U.; FEIL, B.; JUTZI, S. P. Yield-independent variation in grain nitrogen and phosphorus concentration among Ethiopian wheats. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, p. 497-506, 1997.

STARNES, D. L.; PADMANABHAN, P.; SAHI, S. V. Effect of P sources on growth. P accumulation and activities of phytase and acid phosphatases in two cultivars of annual

ryegrass (*Lolium multiflorum* L.). **Plant physiology and biochemistry**, Paris, v. 46, n. 5/6, p. 580-589, May/June 2008.

STAUFFER, M. D.; SULEWSKI, G. Fósforo essencial para a vida. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, São Pedro, SP. **Fósforo na agricultura brasileira**: anais. Piracicaba: POTAFOS, 2004. p. 1-11.

STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H. **Principles and procedures of statistics**. New York: McGraw-Hill, 1980. 633 p.

STEENBJERG, F.; JAKOBSEN, S. T. Plant nutrition and yield curves. **Soil Science**, Baltimore, v. 95, p. 69-88, 1963.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

VENTIMIGLIA, L. A.; COSTA, J. A.; THOMAS, A. L.; PIRES, J. L. F. Potencial de rendimento da soja em razão da disponibilidade de fósforo no solo e dos espaçamentos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 2, p. 195-199, fev. 1999.

VENCOVSKY, R.; BARRIGA, P. **Genética biométrica aplicada ao fitomelhoramento**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1993. 496 p.

WANG, X.; SHEN, J.; LIAO, H. Acquisition or utilization, which is more critical for enhancing phosphorus efficiency in modern crops. **Plant Science**, Limerick, v. 179, p. 302-306, 2010.

WHITEAKER, G.; GERLOFF, C. G.; 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. 472-475, 1976.

WIENEKE, J. Phosphorus efficiency and phosphorus remobilization in two sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cultivars. **Plant and Soil**, The Hague, v. 123, n. 2, p. 139-145, Apr. 1990.

WRIGHT, S. Correlation and causation. **Journal of Agricultural Research**, Islamabad, v. 20, p. 557-585, 1921.

XU, H. X.; WENG. X. Y.; YANG. Y. Effect of phosphorus deficiency on the photosynthetic characteristics of rice plants. **Russian Journal of Plant Physiology**, New York, v. 54, n. 6, p. 741-748, Nov. 2007.