

## Análise de Trilha em Linhagens de *Sorghum bicolor* L. Moench Avaliadas em Condições de Estresse de Fósforo<sup>1</sup>

Lidianne Assis Silva<sup>2</sup>, Karine da Costa Bernadino<sup>3</sup>, Robert Eugene Schaffert<sup>4</sup>

### Resumo

Este trabalho objetivou avaliar os efeitos diretos e indiretos dos componentes de produção e dos componentes dos índices de eficiência ao fósforo (P) sobre a produtividade de grãos e os índices de eficiência de P: (aquisição de P, eficiência de uso de P e eficiência de utilização interna de P), através da análise de trilha, visando identificar quais das variáveis avaliadas a melhor para explicar os índices de eficiência de P e a produtividade de grãos em linhagens de sorgo avaliadas em ambiente com estresse de fósforo. Foram utilizadas 243 linhagens e duas linhagens utilizadas como testemunhas. Devido ao número elevado de tratamentos, os mesmos foram divididos em três experimentos, em látice triplo 9x9. As variáveis avaliadas foram: 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), quociente de utilização de P ( $Q_{UTIL}$ ), índice de colheita de P ( $I_{CP}$ ), eficiência de aquisição de P ( $E_{AQ}$ ), eficiência de utilização interna de P ( $E_{UTIL}$ ) e eficiência de uso de P ( $E_{USO}$ ). Dentre as variáveis explicativas na análise de trilha, o PTOT foi a variável que melhor explicou os efeitos diretos nas variáveis básicas de PG,  $E_{AQ}$  e  $E_{USO}$  avaliadas em linhagens de sorgo em condições de estresse de P.

### Introdução

A população mundial vem crescendo e, relacionada a este crescimento, a necessidade de aumento na produção agrícola gira em torno de 70% (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) (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 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. No Brasil, a principal forma de suprir a demanda de P das culturas como, por exemplo, o sorgo, tem sido via adubação fosfatada. 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, o programa de melhoramento genético de sorgo da Embrapa Milho e Sorgo vem utilizando diferentes alternativas na busca de genótipos com maior eficiência ao P, por meio do melhoramento genético, ou seja, cultivares que apresentam maior eficiência nutricional. Esses trabalhos têm sido realizados em campo e em solução nutritiva. Segundo o programa, a seleção e a aquisição de genótipos 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.

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. (2004) a análise de trilha tem sido utilizada em estudos envolvendo várias culturas como canola, feijão-caupi (Bezerra et al. 2001), feijão comum (Furtado et al. 2002), e sorgo (Ro-

1 Parte da tese de doutorado do primeiro autor

2 Professora Adjunta na Universidade Federal do Acre – UFAC/ Rio Branco – AC. e-mail: [lidianne@ufac.br](mailto:lidianne@ufac.br)

<sup>3</sup> Mestranda do Programa de Pós-graduação em Genética e Melhoramento de Plantas – UFV/Viçosa e-mail: [karinecosta23@gmail.com](mailto:karinecosta23@gmail.com)

3 <sup>4</sup> Pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo/Sete Lagoas. e-mail: [shcaffer@cnpmc.embrapa.br](mailto:shcaffer@cnpmc.embrapa.br)

4

drigues 2010 e Ezeaku and Mohammed 2006).

Sendo assim, o presente trabalho objetivou avaliar os efeitos diretos e indiretos dos componentes de produção e dos componentes dos índices de eficiência ao fósforo (P) sobre a produtividade de grãos e os índices de eficiência de P: (aquisição de P, eficiência de uso de P e eficiência de utilização interna de P), através da análise de trilha, visando identificar quais das variáveis avaliadas a melhor para explicar os índices de eficiência de P e a produtividade de grãos em linhagens de sorgo avaliadas em ambiente com estresse de P.

## Material e Métodos

Os experimentos para a avaliação de produtividade de grãos e os 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.

Os tratamentos genéticos utilizados foram 243 linhagens e duas linhagens utilizadas como testemunhas, avaliadas em ambiente com estresse do nutriente fósforo (P), ou seja, sem P. Devido ao número elevado de tratamentos (243 linhagens), os mesmos foram divididos em três experimentos, em látice triplo 9x9. Cada um dos três experimentos foi composto por 81 linhagens e duas testemunhas adicionais (ATF13B e ATF14B), intercaladas em cada bloco. 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.

As variáveis avaliadas foram: florescimento (FLOR), em dias, altura de plantas (AP), em cm, produtividade de grãos (PG), em kg.ha<sup>-1</sup>, teor de P nos grãos (TPG) em g.kg<sup>-1</sup>; teor de P nas folhas (P FOLHA) em g.kg<sup>-1</sup>, quantidade total de P na planta (PTOT) em kg.ha<sup>-1</sup>, quociente de utilização de P (Q<sub>UTIL</sub>) em kg.kg<sup>-1</sup>, Índice de colheita de P (I<sub>CP</sub>) em kg.kg<sup>-1</sup>; Eficiência de aquisição (E<sub>AQ</sub>), definida como a capacidade do genótipo de absorver o P disponível no solo, correspondendo a (PTOT) por kg de P disponível no solo (P<sub>S</sub>), obtida pela expressão: E<sub>AQ</sub>: PTOT/P<sub>S</sub>; eficiência de utilização interna de P (E<sub>UTIL</sub>), definida como a capacidade do genótipo de utilizar o P absorvido pela planta para produzir grãos, correspondendo a (MSG), por kg de P na planta, obtida pela expressão: E<sub>UTIL</sub>: MSG/PTOT; eficiência de uso de P (E<sub>USO</sub>), definida como o produto das E<sub>AQ</sub> x E<sub>UTIL</sub> ou E<sub>USO</sub>: MSG/P<sub>S</sub>.

Foram realizadas análises de variância e correlações genotípicas para todas as características avaliadas com o auxílio do programa (SAS 1999). 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). Foi realizado o teste de multicolinearidade nas variáveis explicativas, com base no número de condições (NC) estabelecido por Montgomery and Peck (2001). Com o efeito da multicolinearidade detectado, realizou-se a análise de trilha pelo método de regressão em crista.

## Resultados e Discussão

As variáveis explicativas ou dependentes florescimento (FLOR), altura de planta (AP), teor de fósforo no grão (TPG), teor de P nas folhas (P FOLHA), teor de fósforo total nas plantas (PTOT), índice de colheita de fósforo (I<sub>CP</sub>) e quociente de utilização interna de fósforo (Q<sub>UTIL</sub>) 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 and 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. Os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>), observados no modelo de análise de trilha (Tabela 1), foram elevados (superiores a 0,80). O R<sup>2</sup> próximo ou igual à unidade 1, se aceita que todas as variáveis

explicativas: FLOR, AP, TPG, P FOLHA, PTOT,  $I_{CP}$  e  $Q_{UTIL}$  foram eficientes para elucidar as variações que ocorreram nas variáveis básicas: produtividade de grãos (PG), eficiência de aquisição de P ( $E_{AQ}$ ), eficiência de uso de P ( $E_{USO}$ ) e eficiência de utilização interna de P ( $E_{UTIL}$ ). 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.

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  $Q_{UTIL}$  com efeito direto em  $E_{UTIL}$  de 0,317 com coeficiente de determinação de 0,922, 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  $E_{UTIL}$ . 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.

Tabela 1. 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 de P ( $E_{AQ}$ ), eficiência de uso de P ( $E_{USO}$ ) e eficiência de utilização interna de P ( $E_{UTIL}$ ) em linhagens de sorgo avaliadas em ambiente com estresse de P obtidas pelo método regressão crista. Sete Lagoas – MG, 2011.

Variáveis Explicativas	Variáveis Básicas				
	PG	$E_{AQ}$	$E_{USO}$	$E_{UTIL}$	
<b>FLOR</b>	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>
<b>AP</b>	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>
<b>TPG</b>	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>
<b>P FOLHA</b>	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>
<b>PTOT</b>	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>
<b><math>I_{CP}</math></b>	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>
<b><math>Q_{UTIL}</math></b>	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
	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>

### Agradecimento

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

## Referências

- 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.
- Bezerra AA et al. (2001) Inter-relação entre caracteres de feijão-caupi de porte ereto e crescimento determinado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** **1**: 137-142.
- Coimbra JL et al. (2004) Análise de trilha dos componentes do rendimento de grãos em genótipos de canola. **Ciência Rural** **5**: 1421-1428.
- Cruz CD et al (2004) **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFV, 480p.
- Ezeaku IE and Mohammed SG (2006) Character association and path analysis in grain sorghum. **Africa Journal Biotechnology** **5**: 1337-1340.
- 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.
- Furtado MR et al (2002) Análise de trilha do rendimento do feijoeiro e seus componentes primários em monocultivo e em consorcio com a cultura do milho. **Ciência Rural** **2**: 217-220.
- Li CC (1975) **Path analysis: a primer**. Pacific Grove: Boxwood Press, 347p.
- Montgomery DC and Peck EA (2001) **Introduction to linear regression analysis**. New York: John Wiley & Sons, 504p.
- Rodrigues F (2010) **Fenotipagem e seleção de linhagens de sorgo quanto à eficiência reposta ao fósforo**. 95 f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- SAS, (1999) **Institute. SASonlineDoc<sup>R</sup>**: version 8. Cary.
- Wright S (1921) Correlation and causation. **Journal of Agricultural Research**, 557-585.