

Eficiência de Aquisição e Utilização Interna de Fósforo em Milho Tropical: Importância Relativa e Critérios de Seleção.

Sidney Netto Parentoni¹, Cláudio Lopes de Souza Júnior², Vera Maria C.Alves¹, Claudia Guimarães¹, Antonio Marcos Coelho¹, Cleso Antonio Patto Pacheco¹, Paulo Evaristo O. Guimarães¹, Walter F. Meirelles¹, Lauro José Moreira Guimarães¹, Adelmo Resende da Silva¹, Maria José Vasconcelos¹, Jurandir Vieira Magalhães¹, Antonio Carlos Oliveira¹, Robert Eugene Schaffert¹
¹Embrapa Milho e Sorgo, CP. 151, CEP 35701-970, Sete Lagoas-MG, sidney@cnpms.embrapa.br ,

Palavras-chave: *Zea mays*, aquisição de fósforo, eficiência de utilização interna de fósforo, eficiência de uso de fósforo, nutrição mineral de plantas.

Um dos principais responsáveis pela escalada de preços dos alimentos em todo o mundo nos últimos anos tem sido o alto custo dos fertilizantes, em especial daqueles contendo fósforo. Este é o segundo nutriente mais consumido pela agricultura mundial, sendo superado apenas pelo nitrogênio (Batten, 1992). As reservas mundiais de fósforo capazes de serem exploradas a valores de 40 dólares a tonelada devem se esgotar na segunda metade deste século (Murrel & Fixen, 2006), indicando que, pesquisas visando desenvolver genótipos mais eficientes no uso deste nutriente devem se tornar cada vez mais importantes nos próximos anos.

Os conceitos de eficiência de aquisição – utilizado no sentido de quantidade do nutriente adquirido pela planta por unidade do nutriente disponível no solo – e de eficiência de utilização interna – definida como habilidade da planta de produzir grãos por unidade de P na mesma – tem sido considerados os dois principais componentes da eficiência de uso de nutrientes (grãos produzidos por unidade de nutriente no solo).

Moll et al. (1982) propuseram uma metodologia para determinar a importância relativa de duas variáveis (A and B), sobre uma terceira variável (C), a qual é obtida pelo produto das duas outras ($C=A \times B$). Foi utilizada uma transformação logarítmica para se obter uma relação aditiva entre estas variáveis ($\log C = \log A + \log B$) e foi determinada a proporção da soma de quadrados de C que era devida a A e B. Estes autores utilizaram esta abordagem para investigar a importância relativa da aquisição e da utilização interna sobre a eficiência de uso de nitrogênio (N) em oito híbridos de milho avaliados sob alto e baixo N no solo. Foi verificado que, eficiência de uso de N foi função principalmente da eficiência de aquisição deste nutriente sob alto N no solo, enquanto sob baixo suprimento de N no solo, o principal componente da eficiência de uso de N foi a eficiência de utilização interna deste nutriente.

Gourley, Allan e Russele (1993) definiram conceitos para distinguir entre “genótipos superiores” e “genótipos eficientes” em estudos de eficiência nutricional em plantas. De acordo com estes autores, atividade metabólica superior em um dado genótipo deverá resultar em produções mais altas, independente da disponibilidade de nutriente no meio e, neste caso, um genótipo superior (e não um genótipo eficiente) estaria sendo identificado. A condição chave para classificar um par de genótipos como eficiente e ineficiente seria então que os mesmos atingissem produções semelhantes sob níveis adequados do nutriente, e que diferissem entre si nos ambientes sob baixo suprimento do mesmo.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a importância relativa da eficiência de aquisição e de utilização interna de P sobre a eficiência de uso deste nutriente em genótipos tropicais de milho cultivados em ambientes sob alto e baixo P no solo e verificar critérios de seleção adequados para estes caracteres.

Metodologia.

Com base em sua produção de grãos sob baixo P e em estudos prévios de capacidade combinatória nestes ambientes, seis linhagens de milho do programa de melhoramento da EMBRAPA foram classificadas quanto à sua eficiência no uso de P (L3 e L228-3 – eficientes; L36 medianamente eficiente e L53, L22 e Cateto - ineficientes no uso de P). Estas linhagens foram utilizadas para obter sete híbridos F₁ (L3x22, L3x36, L3x53, L3xCateto, L228-3xL22, L36xCateto e CatetoxL53). A partir destes materiais, foram então obtidos 47 genótipos (6 linhagens, 7F₁'s, 7F₂'s, 7RC₁P₁, 7RC₁P₂, 7RC₂P₁ e 6RC₂P₂ - um dos RC₂ não produziu semente suficiente), utilizados para um estudo de herança da eficiência ao P (dados não discutidos neste trabalho). Estes 47 genótipos foram avaliados em cinco ambientes, com diferente biodisponibilidade de P no solo (kg.ha⁻¹ de P de 0-60 cm) em Sete Lagoas, MG. Os valores de P disponível no solo (0-60cm) foram de 81,2 e 83,3 kg.ha⁻¹ de P nas áreas denominadas Alto P-01 e Alto P-02 e de 16,8 28,8 e 24,8 kg.ha⁻¹ de P nas áreas denominadas Baixo P-01, Baixo P-02 e Baixo P-03. Dois destes ensaios foram conduzidos no verão 2005/2006 (Alto P-01 e Baixo P-01) e os outros três no verão 2006/2007.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com três repetições por ensaio. Foram avaliados os caracteres peso de grãos, peso da palhada (colmos, folhas, sabugo e palha), teor de P nos grãos, teor de P na palhada, eficiência de aquisição de fósforo (P absorvido por unidade de P no solo), eficiência de utilização interna de fósforo (produção de grãos por unidade de P absorvido), eficiência de uso de P (produção de grãos por unidade de P no solo). Foram ainda obtidos os dois componentes da eficiência de utilização interna de P que são: o quociente de utilização de P (produção de grãos por unidade de P nos grãos) e o índice de colheita de P (P nos grãos por unidade de P absorvido).

A metodologia descrita por Moll et al. 1982 foi utilizada para determinar a importância relativa da eficiência de aquisição e de utilização interna de P sobre a eficiência de uso de P nos dois grupos de ambientes. A eficiência de utilização interna de P foi também decomposta em seus dois componentes (quociente de utilização de P e índice de colheita de P) e a importância relativa de cada um deles foi determinada. Para estes estudos não foram utilizados dados das linhagens e dos RC₂, devido à alta endogamia destes genótipos, totalizando então 28 tratamentos por ambiente (7F₁'s, 7F₂'s, 7RC₁P₁ e 7 RC₂P₂). Descrição detalhada da metodologia utilizada pode ser encontrada em Parentoni 2008.

Resultados

Uma redução média de 47% na produção de grãos foi observada entre níveis alto e baixo de P no solo (Tabela 1). Redução média de 43% na produção de genótipos de milho entre níveis de P foi reportada por Kliemann and Lima (2001). Diferenças significativas entre níveis de P foi também verificada para os caracteres peso da palhada, teor de P nos grãos, eficiência de aquisição de P (EFAQ), eficiência de utilização interna de P (EFUTIL) e quociente de utilização de P (QUTIL). O caráter índice de colheita de P (ICP) não diferiu entre níveis de P.

As médias de peso de grãos dos ambientes sob baixo e alto P no solo para os sete híbridos F₁ utilizados neste estudo permitiram classificar estes genótipos em quatro pares de materiais eficientes e ineficientes (sendo que dois destes pares tiveram um genótipo comum), baseado em sua produção semelhante sob alto P e distinta sob baixo P no solo (Figura 1-A). O primeiro par foi composto pelos híbridos L3x22 (eficiente ao P) e L3x53 (ineficiente ao P). O

segundo par incluiu os cruzamentos L3x36 (eficiente) e L36xCateto (ineficiente). Os híbridos L3xCateto e 228-3x22 foram classificados como eficientes ao P e o híbrido Catetox53 seria um cruzamento ineficiente a ser comparado a estes dois últimos híbridos.

Tabela 1 – Média geral de 47 genótipos e diferença mínima significativa entre ambientes, médias e percentual de redução entre grupos de ambientes (alto e baixo P no solo) para diversos caracteres¹

Ambientes ²	PG kg ha^{-1}	PP kg ha^{-1}	TPG g kg^{-1}	EFAQ kg $kg^{-1} \times 10^2$	EFUTIL kg kg^{-1}	QUTIL kg kg^{-1}	ICP kg $kg^{-1} \times 10^2$
Alto P-1	4,39	8,94	2,22	16,52	284	538	60,46
Alto P-2	5,65	7,30	2,94	22,62	261	396	74,86
Baixo P-1	2,29	4,31	1,93	33,26	333	620	58,65
Baixo P-2	2,82	2,99	2,64	32,12	283	433	72,49
Baixo P-3	2,86	3,75	2,61	35,09	278	446	68,49
DMS (0.01)	0,65	0,68	0,16	4,52	34	46	4,91
Médias Alto P	5,02 a ³	8,12 a	2,58 a	19,57 b	273 b	467 b	67,66 a
Médias Baixo P	2,66 b	3,68 b	2,39 b	33,82 a	298 a	500 a	66,54 a
% Redução	47,1%	54,7%	7,4%	-72,8%	-9,3%	-7,1%	-

¹ PG - peso de grãos; PP – peso de palhada (colmos, folhas, sabugo, palhas); TPG - teor de P nos grãos; EFABS - eficiência de aquisição de P; EFUTIL - eficiência de utilização de P; QUTIL - quociente de utilização de P; ICP - índice de colheita de P; ² Biodisponibilidade de P no solo (kg ha^{-1} de P de 0-60 cm) para cada ambiente foi: Alto P-01(81.2), Alto P-02 (83.3), BaixoP-01 (16.8), Baixo P-02 (25.8), Baixo P-03 (24.8). ³ Médias de grupos de ambientes (alto e baixo P no solo) seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 1%.

A produção média de grãos, sob baixo e alto P no solo para os quatro híbridos eficientes, foi de 5088 e 8167 kg ha^{-1} respectivamente e para os três híbridos ineficientes estes valores foram de 3612 e 8393 kg ha^{-1} respectivamente. Estes dados mostram que, as médias de peso de grãos dos cruzamentos F₁ classificados como eficientes e ineficientes ao P diferiram nos ambientes sob baixo P no solo, mas não nos ambientes sob alto P no solo, indicando que estes cruzamentos compreenderam um grupo balanceado de genótipos eficientes e ineficientes ao P, concordando com os conceitos propostos por Gourley, Allan e Russele (1993).

A eficiência de aquisição de P (EFAQ) dos híbridos simples e de suas seis linhagens parentais mostrou que, quando se considera separadamente o grupo de híbridos e de linhagens, a EFAQ nos ambientes sob baixo P no solo (eixo x) permitiu discriminar de forma razoável os genótipos eficientes e ineficientes ao P tanto entre híbridos quanto entre linhagens, o que não ocorreu nos ambientes sob alto P, principalmente entre as linhagens (Figura 1-B).

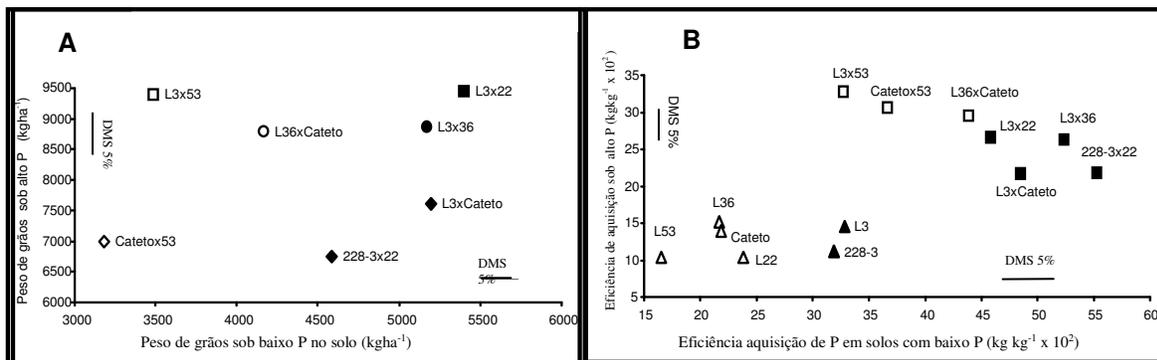


Figura 1- Peso de grãos (kg ha^{-1}) de sete híbridos F₁'s na média de três ambientes sob baixo P e dois ambientes sob alto P no solo. Híbridos de uma mesma figura geométrica correspondem a pares de genótipos eficientes e ineficientes (Figura 1-A). Eficiência de aquisição de P para seis linhagens (triângulos) e sete híbridos (quadrados) de milho em ambientes sob baixo e alto P no solo (Figura 1-B). Símbolos sólidos indicam genótipos eficientes ao P e símbolos abertos indicam genótipos ineficientes.

A metodologia de Moll et al. (1982) permitiu verificar que, nos genótipos e ambientes estudados, a eficiência de aquisição de P (EFAQ), correspondeu a 64,5% da variabilidade observada para eficiência de uso de P (EUP) nos ambientes sob baixo P e 74,0% nos ambientes sob alto P (Tabela 2). O valor 0,645 observado sob baixo P, foi função do produto de um coeficiente de correlação entre EFAQ e eficiência de uso de P de 0,862 por uma relação de desvios padrões entre estas duas variáveis de 0,748 ($0,645=0,862*0,748$). Programas de melhoramento de milho visando aumentar a eficiência de uso de P nestes ambientes deveriam utilizar índices de seleção dando peso maior à eficiência de aquisição de P do que à eficiência de utilização interna deste nutriente. Estes pesos poderiam ser determinados com base na proporção da soma de quadrados de eficiência de uso de P correspondente aos componentes de eficiência de aquisição e de eficiência de utilização interna de P. Com base nos dados obtidos neste estudo, valores sugeridos para estes pesos seriam respectivamente de 0,7 e 0,3.

Tabela 2. Contribuição da soma de quadrados de genótipos (SQ) de eficiência de aquisição de P (X_1) e eficiência de utilização interna de P (X_2) para a SQ de eficiência de uso de P (Y), coeficiente de correlação entre X_i e Y (r_{x_iy}) e relação de desvios padrões entre X_i e Y (S_{x_i} / S_y), em três ambientes sob baixo P e dois ambientes sob alto P.

Caráter avaliado	SQ de genótipos ⁽¹⁾	Contribuição de X_i para a SQ de eficiência de uso de P (Y) ⁽²⁾	r_{x_iy}	(S_{x_i} / S_y)
Três ambientes sob baixo P				
Eficiência de aquisição de P (X_1)	1.742	0.645	0.862	0.748
Eficiência de utilização de P (X_2)	0.957	0.355	0.683	0.519
Eficiência de uso de P (Y)	2.699			
Dois ambientes sob alto P				
Eficiência de aquisição de P (X_1)	0.658	0.740	0.813	0.910
Eficiência de utilização de P (X_2)	0.231	0.260	0.441	0.591
Eficiência de uso de P (Y)	0.889			

⁽¹⁾Determinada por $\Sigma(x_iy)/\Sigma y^2$ onde, $i=1$ para eficiência de aquisição de P e $i=2$ para eficiência de utilização de P.

⁽²⁾Obtido pela multiplicação de r_{x_iy} por S_{x_i} / S_y .

Estudos de morfologia de raiz conduzidos nas linhagens L3 (eficiente) e L22 (ineficiente ao P) utilizadas como parentais neste estudo, indicaram que a linhagem eficiente (L3) apresentava sistema radicular maior e mais profundo que a linhagem L22 (Brasil et al. 2003). Oliveira et al. (2008) isolaram microorganismos solubilizadores de fosfato da rizosfera destas duas linhagens e de outros híbridos de milho. Foi observado que, o microorganismo com maior capacidade de solubilizar fosfato (*Bulkoderia sp*), foi isolado da rizosfera da linhagem L3, sendo capaz de solubilizar 70% do P insolúvel ligado a Ca, suprido no meio de cultura. Estes dados indicam que, a alta eficiência no uso de P em genótipos derivados da linhagem L3, pode estar relacionada tanto à características de morfologia de raiz (Brazil 2003) quanto à sua alta capacidade de associação com microorganismos rizosféricos solubilizadores de fosfato (Oliveira et al., 2008).

Corrales et al. (2007), verificaram que o híbrido simples obtido do cruzamento das duas linhagens eficientes ao P utilizadas neste trabalho (L3x228-3) mostrou alta eficiência no uso de P em um meio com areia e fosfato de rocha insolúvel. Isto foi atribuído principalmente à maior capacidade deste genótipo de adquirir P do meio, do que a uma maior eficiência de utilização interna de P pelo mesmo, o que concorda com os dados obtidos neste trabalho.

A metodologia de Moll et al. (1982) foi também utilizada para determinar a importância relativa do quociente de utilização de P (QUTIL) e do índice de colheita de P (ICP) sobre a variabilidade observada para a eficiência de utilização interna de P (EFUTIL).

Foi verificado que, tanto nos ambientes sob baixo P quanto nos ambientes sob alto P, cerca de 80,8% e 92,5% da variabilidade observada para EFUTIL foi devida ao QUTIL (Tabela 3). Estes dados são explicados principalmente pelo alto coeficiente de correlação entre QUTIL e EFUTIL nos dois níveis de P no solo ($r=0,793^{**}$ e $r=0,788^{**}$) e ainda por uma maior relação entre desvios padrões de QUTIL e EFUTIL do que ICP e EFUTIL tanto sob baixo P (1,019 e 0,650) quanto sob alto P no solo (1,175 e 0,728).

Tabela 3. Contribuição da soma de quadrados de genótipos (SQ) de quociente de utilização de P (X_1) e índice de colheita de P (X_2) para a SQ de eficiência de utilização interna de P (Y), coeficiente de correlação entre X_i e Y (r_{x_iy}) e relação de desvios padrões entre X_i e Y (S_{x_i}/S_y), em três ambientes sob baixo P e dois ambientes sob alto P.

Caráter avaliado	SQ de genótipos ⁽¹⁾	Contribuição de X_i para a SQ de eficiência de uso de P (Y) ⁽²⁾	r_{x_iy}	(S_{x_i}/S_y)
Três ambientes sob baixo P				
Quociente de utilização de P (X_1)	0.577	0.808	0.793	1.019
Índice de colheita de P (X_2)	0.137	0.192	0.296	0.650
Eficiência de utilização interna de P (Y)	0.714			
Dois ambientes sob alto P				
Quociente de utilização de P (X_1)	0.305	0.925	0.788	1.175
Índice de colheita de P (X_2)	0.025	0.075	0.103	0.728
Eficiência de utilização interna de P (Y)	0.330			

⁽¹⁾Determinada por $\Sigma(x_iy)/\Sigma y^2$ onde, $i=1$ para quociente de utilização de P e $i=2$ para índice de colheita de P.

⁽²⁾Obtido pela multiplicação de r_{x_iy} por S_{x_i}/S_y .

Como o QUTIL é calculado dividindo-se o peso de grãos pela quantidade de P nos grãos (que é igual à % de P no grão multiplicada pelo peso de grãos), ele, de fato, corresponde exatamente ao inverso da % de P nos grãos. Neste caso, quanto menor for a concentração de P nos grãos, maior será o QUTIL e conseqüentemente, mais alta será a eficiência de utilização interna de P. Programas de melhoramento de milho visando aumentar a EFUTIL em Latossolos semelhantes aos deste estudo, deveriam buscar reduzir o teor de P nos grãos, já que o índice de colheita de P parece ter pouca importância sobre a EFUTIL nestes ambientes.

Dados de eficiência de utilização interna de P (EFUTIL) dos sete híbridos simples e de suas seis linhagens parentais obtidos nos ambientes sob baixo e alto P no solo (Figura 2-A) e valores do principal componente da EFUTIL que é o teor de P nos grãos (TPG) obtidos sob baixo e alto P no solo (Figura 2-B) indicaram que, com respeito aos critérios de seleção EFUTIL e TPG, principalmente no caso dos híbridos, uma melhor discriminação entre genótipos previamente classificados como eficientes e ineficientes ao P foi verificada nos ambientes sob alto P no solo, onde híbridos e linhagens eficientes mostraram menor TPG.

O coeficiente de correlação entre EFUTIL avaliada nos ambientes sob baixo e sob alto P no solo foi de grande magnitude ($r=0,84^{**}$), enquanto para EFAQ não foi verificada correlação entre ambientes sob alto e baixo P no solo ($r=0,26$). Sob este aspecto, o caráter EFUTIL poderia então ser avaliado em qualquer um dos dois níveis de P, enquanto EFAQ (em programas de adaptação a baixo P no solo) deverá ser avaliada sob baixo nível de P no solo.

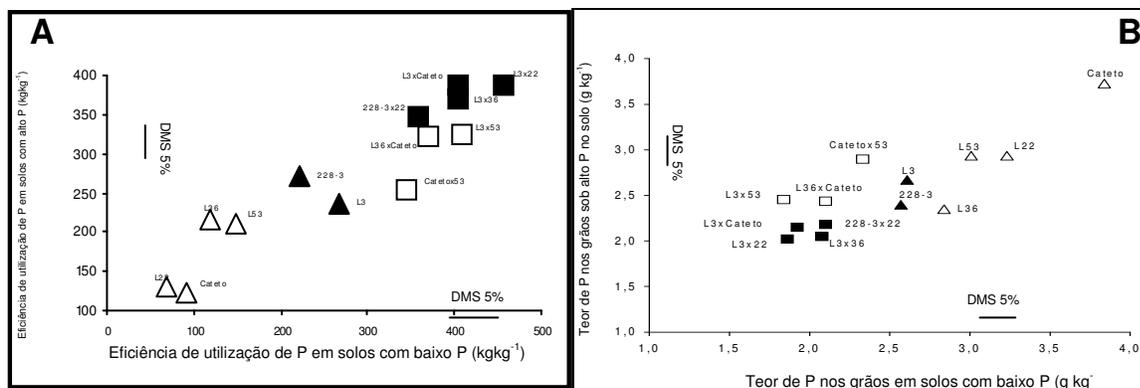


Figura 2- Eficiência de utilização interna de P (kg kg⁻¹) de seis linhagens e sete híbridos F₁'s na média de três ambientes sob baixo P e dois ambientes sob alto P no solo. (Figura A). Teor de P nos grãos (g kg⁻¹) sob baixo e alto P no solo (Figura B). Símbolos sólidos indicam genótipos eficientes ao P e símbolos abertos indicam genótipos ineficientes.

Estes dados indicam que, para eficiência de utilização interna de P (EFUTIL), mecanismos semelhantes devem atuar nos dois níveis de P no solo. Já para eficiência de aquisição de P (EFAQ), diferentes mecanismos devem ocorrer sob baixo e alto P no solo. Não foi verificada correlação entre EFABS e EFUTIL em nenhum dos níveis de P (Parentoni, 2008), indicando que estes caracteres são independentes.

Crítérios de seleção sugeridos para os componentes de eficiência no uso de P seriam: peso de grãos sob baixo P no solo para determinar a EFAQ de P nestes ambientes; baixo teor de P nos grãos (TPG), obtido sob alto P no solo, para determinar a eficiência de utilização interna de P. Seleção de baixa intensidade para baixo TPG sob alto P no solo, seguida de avaliação em larga escala da EFAQ sob baixo P pode ser uma estratégia adequada de seleção.

Literatura citada

- Batten, G.D. A review of phosphorus efficiency in wheat. *Plant and Soil* v.146, p.163-168, 1992.
- Brasil, E.C. Mecanismos envolvidos na eficiência de aquisição de fósforo em genótipos de milho. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Lavras (UFLA), 2003, 161 p.
- Corrales, I.; Amenos, M.; Poschenrieder, C.; Barceló J. Phosphorous efficiency and root exudates in two contrasting maize varieties. *Journal of Plant Nutrition*, v. 30, n. 6, p. 887-900, 2007.
- Gourley, C. J. P; Allan, D. L.; Russelle, M. P. Defining phosphorus efficiency in plants. *Plant and Soil*, The Hague, v. 155/156, p. 289-292, 1993.
- Kliemann, H.J.; Lima, D.V. Agronomic efficiency of natural phosphates and their influence on soil available phosphorus on two cerrado soils. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 31, v.2, p. 111-119, 2001.
- Moll, R.H.; Kamprath, E.J.; Jackson, W.A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agronomy Journal*, v. 74, p. 562-564, 1982.
- Murrel, T.S.; Fixen, P.E. Improving fertilizer P effectiveness: challenges for the future. In: *Proceedings of 3rd International Symposium on Phosphorus Dynamics in the Soil-Plant Continuum*, Uberlândia, Minas Gerais, Brazil, May 14-19 2006. -Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, p. 150-151, 2006.
- Oliveira, C.A.; Alves, V.M.C.; Marriel, I.E.; Gomes, E.A.; Scotti, M.R.; Carneiro, N.P.; Guimarães, C.T.; Schaffert, R.E.; Sá, N.M.H.; Phosphate solubilizing microorganisms isolated from rhizosphere of maize cultivated in Brazilian cerrado oxisols. *Soil Biology and Biochemistry* 2008), doi:10.1016/j.soilbio.2008.01.012.
- Parentoni, S.N. Estimativas de efeitos gênicos de diversos caracteres relacionados à eficiência e resposta ao fósforo em milho tropical. Tese de Doutorado. ESALQ-USP, Piracicaba, 2008 207 pg