

Avaliação e Caracterização de Variedades Locais de Milho para Eficiência na Absorção e na Utilização de Fósforo





*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Cerrados
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

ISSN 1676-918X

Dezembro, 2004

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 143

Avaliação e Caracterização de Variedades Locais de Milho para Eficiência na Absorção e na Utilização de Fósforo

Cynthia Torres de Toledo Machado
Altair Toledo Machado
Ângela Maria Cangiani Furlani
José Guilherme Marinho Guerra

Planaltina, DF
2004

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Cerrados

BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza

Caixa Postal 08223

CEP 73310-970 Planaltina - DF

Fone: (61) 3388-9898

Fax: (61) 3388-9879

<http://www.cpac.embrapa.br>

sac@cpac.embrapa.br

Comitê de Publicações

Presidente: *Dimas Vital Siqueira Resck*

Editor Técnico: *Carlos Roberto Spehar*

Secretária-Executiva: *Maria Edilva Nogueira*

Supervisão editorial: *Maria Helena Gonçalves Teixeira*

Revisão de texto: *Maria Helena Gonçalves Teixeira*

Normalização bibliográfica: *Hozana Álvares de Oliveira*

Capa: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Fotos: *Cynthia Torres de Toledo Machado*

Editoração eletrônica: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Impressão e acabamento: *Divino Batista de Souza*

Jaime Arbués Carneiro

Impresso no Serviço Gráfico da Embrapa Cerrados

1ª edição

1ª impressão (2004): tiragem 100 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

CIP-Brasil. Catalogação na publicação.
Embrapa Cerrados.

A94 Avaliação e caracterização de variedades locais de milho para eficiência na absorção e na utilização de fósforo / Cynthia Torres de Toledo Machado ... [et al.]. – Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2004.

72 p. — (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Cerrados, ISSN 1676-918X ; 143)

1. Nutrição fosfatada - milho - fósforo - absorção. I. Machado, Cynthia Torres de Toledo. II. Série.

631.85 - CDD 21

© Embrapa 2004

Sumário

| | |
|--|----|
| Resumo | 5 |
| Abstract | 6 |
| Introdução | 7 |
| Diversidade genética do milho e importância das variedades locais | 7 |
| Importância da variabilidade genética em milho para a eficiência em fósforo | 8 |
| Características morfológicas e fisiológicas do sistema radicular | 9 |
| Índices de eficiência | 12 |
| Material e Métodos | 14 |
| Genótipos utilizados | 14 |
| <i>Experimentos 1 e 2</i> | 14 |
| <i>Experimentos 3, 4, 5 e 6</i> | 14 |
| Metodologias | 14 |
| Resultados e Discussão | 22 |
| Avaliação da eficiência na utilização de P por genótipos de milho em solo, sob condições de casa de vegetação | 22 |
| Avaliação de variedades de milho para eficiência em fósforo em solução nutritiva | 31 |

| | |
|--|----|
| Índices de eficiência de variedades de milho cultivadas em campo, sob condição ideal de fornecimento de P | 38 |
| Determinação de parâmetros cinéticos de absorção de P de variedades de milho | 46 |
| Determinação da atividade de fosfatase ácida de raízes intactas de variedades de milho | 55 |
| Conclusões | 63 |
| Referências Bibliográficas | 64 |

Avaliação e Caracterização de Variedades Locais de Milho para Eficiência na Absorção e na Utilização de Fósforo

Cynthia Torres de Toledo Machado¹

Altair Toledo Machado²

Ângela Maria Cangiani Furlani³

José Guilherme Marinho Guerra⁴

Resumo – Experimentos de campo e sob condições controladas foram conduzidos para estudar a eficiência em fósforo (P) de variedades locais de milho. Em casa de vegetação, dezoito genótipos foram cultivados em solo, sob duas doses de P, com o objetivo de verificar diferenças quanto à produção de matéria seca e utilização de P. Detectou-se variabilidade entre variedades locais para utilização de P e respostas diferenciadas a doses aplicadas.

Posteriormente, índices de eficiência ao P foram estimados em dez variedades, em três concentrações de P, em solução nutritiva, e em uma dose ótima de P em campo. Confirmou-se o comportamento diferenciado das variedades para produção de matéria seca e de grãos, conteúdo de P e índices de eficiência.

Na última etapa, foram determinados os parâmetros cinéticos de absorção, morfologia do sistema radicular e atividade da fosfatase ácida de raízes intactas em seis variedades. As variedades diferiram quanto a V_{max} , K_m e comprimento de raízes. Os valores de K_m e C_{min} foram bons indicadores da capacidade de absorção de P das variedades. Houve diferença também quanto à atividade da fosfatase ácida, porém, não se observou relação consistente entre acumulação de massa e aquisição de P com a fosfatase secretada pelas raízes.

Termos para indexação: nutrição fosfatada, parâmetros cinéticos, atividade enzimática, variabilidade genética, eficiência de uso de P.

¹ Eng. Agrôn., Ph.D., Embrapa Cerrados, cynthia@cpac.embrapa.br

² Eng. Agrôn., Ph.D., Embrapa Cerrados, altair@cpac.embrapa.br

³ Eng. Agrôn., Ph.D., Instituto Agronômico, C.P. 21, Campinas, SP. afurlani@iac.sp.gov.br

⁴ Eng. Agrôn., Ph.D., Embrapa Agrobiologia, C.P. 74505, Seropédica, RJ. gmguerra@cpab.embrapa.br

Evaluation and Characterization of Local Varieties of Maize for Efficiency of Absorption and Utilization of Phosphorus

Abstract – *Field experiments and assays under controlled conditions were performed to evaluate maize local varieties to P use efficiency. At first one, performed under greenhouse conditions, eighteen genotypes were cultivated in soil at two P levels, with the objective to verify differences on phosphorus utilization and dry matter yield. Genetic variability was detected in local varieties to P utilization and different responses to P levels applied.*

At the subsequent stage, P efficiency indexes were estimated in ten varieties, at three P concentrations in nutrient solution, and at one optimum P level in field. Varieties distinct behaviour were confirmed for dry matter and grain yield, P content and efficiency indexes.

At the last stage of this study, six varieties were evaluated in terms of kinetics of P absorption, root morphology and phosphatase activity of intact roots. Differences among varieties were observed in V_{max} , K_m , and root length. The K_m and C_{min} values were better indicatives of P uptake ability of the varieties. Root phosphatase activity differed among varieties also, but not allowing to infer a clear association between root secreted phosphatase and dry matter production or P acquisition.

Index terms: phosphorus nutrition, kinetics parameters, enzymatic activity, local varieties, genetic variability, P use efficiency.

Introdução

Diversidade genética do milho e importância das variedades locais

A grande diversidade genética é um dos aspectos fundamentais da cultura do milho que possibilita o seu cultivo em diversas regiões ([MACHADO; MAGNAVACA, 1991](#)). O germoplasma de milho hoje disponível representa um enorme reservatório de variações genéticas naturais, provavelmente, maior do que qualquer outra espécie vegetal cultivada, sendo descritas aproximadamente 250 raças ([PATERNIANI; GOODMAN, 1978](#)).

No Brasil são encontradas cerca de quatro raças, denominadas indígenas, comerciais antigas, comerciais recentes e raças exóticas ([PATERNIANI; GOODMAN, 1978](#)). As raças indígenas constituem-se de milhos farináceos cultivados quase que apenas pelos índios e, presumivelmente, estão sendo mantidas desde o período Pré-Colombiano. São as raças Guarani, Moroti (Precoce e Guapi), Caingang, Lenha e Entrelaçado.

As raças comerciais antigas existiram no período Pré-Colombiano e foram adotadas pelos imigrantes europeus a partir dos índios. São raças originalmente indígenas que se modificaram através dos tempos como resultado do seu cultivo em larga escala até os dias atuais. São elas: Cristal Sulino, Cristal, Canário de Ocho, Cateto Sulino Precoce, Cateto Sulino Precoce, Cateto Sulino, Cateto Sulino Grosso, Cateto e Cateto Nortista ([PATERNIANI; GOODMAN, 1978](#)).

As raças comerciais recentes se estabeleceram e se disseminaram no período Pós-Colombiano. Foram introduzidas a partir de outros locais ou se originaram do cruzamento natural entre as raças existentes e/ou introduzidas. São milhos do tipo dentado, principalmente, ou semidentado. Os milhos dentados não são nativos da América do Sul, tendo sido introduzidos a partir dos Estados Unidos. Constituem as raças comerciais recentes: Dente Rio Grandense, Dente Paulista, Dente Branco, Semidentado e Cravo ([PATERNIANI; GOODMAN, 1978](#)).

Finalmente, as raças exóticas ou estrangeiras são aquelas originalmente encontradas em outras áreas e que foram introduzidas no Brasil nos tempos modernos. Das duas raças descritas, Hickory King tem sido cultivada por vários anos sendo a Tusón a mais recente. Outros germoplasmas exóticos tornaram-se populares, constituindo variedades sintéticas desenvolvidas e lançadas por

instituições oficiais: Asteca e Maia, variedades do germoplasma Tuxpeño, desenvolvidas pelo Instituto Agronômico, em Campinas; Piramex, desenvolvida pelo Instituto de Genética da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” em Piracicaba, entre outras ([PATERNIANI; GOODMAN, 1978](#)).

A preservação da variabilidade genética, representada pelo grande número de variedades locais e regionais de milho, é de grande importância para as pesquisas futuras e melhoramento da cultura. A manutenção dos genes existentes nas diversas raças se faz necessária e fundamental, já que, desde o início do processo de seleção da cultura, iniciado há mais de 4000 anos pelos nativos no México ([MACHADO; MAGNAVACA, 1991](#)), o milho vem sofrendo erosão genética.

Importância da variabilidade genética em milho para a eficiência a fósforo

O potencial para melhoramento genético visando à determinada característica é dependente, em parte, da magnitude e da natureza das diferenças entre os genótipos e da influência do meio ambiente sobre eles. São conhecidas grandes diferenças entre genótipos em relação ao uso dos elementos minerais e, apesar de muitas dessas diferenças estarem sob controle genético, sua expressão pode ser alterada quando as plantas são cultivadas em diferentes ambientes ([CLARK, 1983](#)).

Numerosos fatores de solo e do ambiente podem ser responsáveis pela expressão das diferenças entre as cultivares no que tange à absorção, translocação e/ou utilização de nutrientes e tolerância a altas concentrações de minerais ([FAWOLE et al., 1982](#)) e a detecção de tais diferenças sob condições nutricionais específicas, particularmente sob estresse, é objetivo da maioria das pesquisas em genética nutricional. A incorporação dessa variabilidade às cultivares pode ampliar a sua adaptabilidade pela alteração das respostas aos estresses minerais do ambiente, aumentando a produtividade vegetal em condições de baixa disponibilidade dos principais nutrientes ([BLISS, 1981](#)).

Os fatores determinantes das diferenças genotípicas na nutrição fosfatada compreendem reações e processos que ocorrem na interface solo-raiz, a morfologia do sistema radicular, características de absorção das raízes - incluindo associações simbióticas, transporte e partição do nutriente entre as partes da planta e uso do nutriente em processos fisiológicos que culminam no crescimento e produção.

A detecção e a possibilidade de exploração e de uso das diferenças genótípicas em milho para a eficiência em fósforo é considerada uma das estratégias viáveis para contornar o problema da deficiência desse elemento nas regiões tropicais e subtropicais, conseqüência dos teores naturalmente baixos e da alta capacidade de fixação dos solos nessas áreas, tornando limitada a disponibilidade do nutriente.

O fósforo é um dos macronutrientes essenciais e limitantes à produtividade das lavouras de milho no Brasil, sendo que respostas do milho à adubação fosfatada são comumente observadas. Variação inter e intrapopulacional para o milho quanto à absorção, translocação, distribuição e uso de fósforo já foram observadas por diversos pesquisadores ([BAKER et al., 1970](#); [CLARK; BROWN, 1974a, 1974b](#); [FOX, 1978](#); [SCHENK; BARBER, 1980](#); [FURLANI et al., 1985](#); [WALKER; RAINES, 1988](#); [ALVES et al., 1988](#); [SILVA et al., 1993](#); [SILVA; GABELMAN, 1993](#); [CIARELLI, 1998](#)).

Características morfológicas e fisiológicas do sistema radicular

Variações na morfologia e na fisiologia das raízes têm sido correlacionadas com as diferenças inter e intraespecíficas na capacidade de essas raízes utilizar o fósforo (P) do solo. A morfologia radicular refere-se ao comprimento e ao raio das raízes, à área da superfície total, à razão da superfície raiz/ parte aérea e à densidade de pêlos radiculares. Sistemas radiculares extensos e ramificados, com maior área superficial e menor diâmetro de raízes, são fundamentais na aquisição de P, permitindo uma exploração mais efetiva do solo. A cinética de absorção de P e a capacidade de manter a condição metabólica normal com menores reservas do nutriente nos tecidos, garantindo produção satisfatória de massa ou de grãos, são mecanismos fisiológicos que a planta dispõe para obter maior eficiência na utilização do P ([MARSCHNER, 1995](#)).

As variações existentes entre genótipos nas características morfológicas e na cinética de absorção de P das raízes derivam da ação condicionante do ambiente, sobretudo, dos fatores de solo. Essa variabilidade em genótipos de milho e de outras espécies vegetais tem sido considerada como uma alternativa de adaptação da planta à maior ou à menor disponibilidade de P, uma vez que esse nutriente possui características peculiares de movimento no solo por difusão o qual depende fortemente dos atributos físicos e químicos dos solos ([NIELSEN; BARBER, 1978](#); [BALIGAR; BARBER, 1979](#); [SCHENK; BARBER, 1979, 1980](#); [ANGHINONI et al., 1989](#); [ALVES et al., 1998](#); [CIARELLI et al., 1998](#)).

A absorção ativa dos nutrientes pelas plantas possui características da cinética de saturação de Michaelis-Menten, definida pelos parâmetros V_{max} , K_m e C_{min} , a mesma que descreve a atividade enzimática. A velocidade ou influxo máximo de absorção (V_{max} ou I_{max}) ocorre quando todos os sítios carreadores disponíveis estão ocupados. O K_m é a concentração externa do íon para a qual se obtém a metade da velocidade máxima de absorção e, quanto menor esse valor, maior a afinidade dos sítios carreadores pelo íon. C_{min} é a concentração mínima abaixo da qual o influxo líquido cessa e o seu valor reflete, portanto, a capacidade de as raízes de retirar o nutriente de soluções diluídas ([MARSCHNER, 1995](#)). Em resposta à baixa disponibilidade de P, as raízes podem alterar a cinética de absorção, aumentando V_{max} ([NIELSEN; BARBER, 1978](#); [SCHENK; BARBER, 1980](#); [JUNGK et al., 1990](#); [ALVES et al., 1998](#)). Porém, em estudos com espécies selvagens, [Chapin III \(1983\)](#) verificou que a menor velocidade de absorção pode ser uma característica de plantas adaptadas a solos inférteis, pois a difusão do P para as raízes seria a principal limitação nesses solos. Em estudo com linhagens de arroz, [Furlani \(1988\)](#) verificou que um dos genótipos eficientes sob baixo suprimento do nutriente apresentou uma combinação de menores valores de V_{max} e K_m . Em sorgo, [Furlani et al. \(1984b\)](#) observaram que os genótipos mais eficientes em baixo P apresentaram sistemas radiculares maiores, menores taxas de absorção de P e distribuíram mais P das partes mais velhas para os tecidos mais novos. [Ciarelli et al. \(1998\)](#) observaram uma relação inversa entre velocidade de absorção e extensão de sistema radicular em híbridos de milho e entre linhagens e suas progênies.

As diferenças na morfologia e na fisiologia das raízes de genótipos de milho tiveram efeito na quantidade de P acumulada pelas plantas em solução nutritiva e solo e os genótipos com maior comprimento de raízes tiveram também maior produção de matéria seca de parte aérea e de raízes ([SCHENK; BARBER, 1979](#); [BALIGAR; BARBER, 1979](#)). [Schenk e Barber \(1980\)](#) verificaram ainda diferenças significativas na área do sistema radicular de genótipos de milho cultivados em campo, positivamente, correlacionadas com a produção de parte aérea e raízes, na época do pendoamento. Em linhagens de milho e de sorgo e seus híbridos F_1 , também foi observada a relação positiva entre comprimento radicular e produção de matéria seca de parte aérea e raízes ([FURLANI et al., 1984b](#); [CIARELLI et al., 1998](#)). Esses resultados evidenciam que os parâmetros morfológicos e os cinéticos de absorção de P das raízes afetam a parte aérea e a produção da planta, em solo ou em solução nutritiva, e podem ser herdados, o que indica a possibilidade de seleção e melhoramento para esses caracteres.

As fosfatases, classificadas como ácidas e alcalinas, constituem uma classe de enzimas que catalisam a hidrólise de vários monoésteres fosfatados, sendo de ocorrência generalizada nos tecidos e órgãos vegetais ([JUMA; TABATABAI, 1988](#)). A atividade das fosfatases ácidas secretadas pelas raízes, denominadas extracelulares, está relacionada com a disponibilização de P do solo para absorção pelas plantas. Já as intracelulares ocorrem no citoplasma, plastídeos e vacúolos e atuam na hidrólise do P de compostos orgânicos, remobilização e translocação do P a partir de tecidos senescentes ([LEE, 1988](#); [LEFFBVRÉ et al., 1990](#); [DUFF et al., 1994](#)).

A atividade dessa enzima é uma característica fisiológica relacionada à eficiência de aquisição e utilização do P para a qual se tem demonstrado variabilidade genética ([TADANO et al., 1993](#)). A maior parte das plantas secreta fosfatases ácidas radiculares quando submetidas a condições de baixa disponibilidade de P, porém a capacidade de secreção, a excreção e a atividade da enzima variam entre as espécies vegetais ([DUFF et al., 1994](#); [FUKUDA et al., 2001](#); [YAN et al., 2001](#)).

Tem sido sugerido que plantas com menores atividades de fosfatase nas raízes ou nas folhas devem estar em condições mais adequadas de nutrição fosfatada, mesmo em condições de baixa disponibilidade de P, do que aquelas com maiores atividades dessa enzima ([MC LACHLAN, 1980a, 1980b](#); [SILBERBUSH et al., 1981](#); [FURLANI et al., 1984a](#); [HELAL, 1990](#); [TADANO et al., 1993](#)) e que, portanto, essa característica permite identificar espécies e cultivares com potencial para crescer em situações de baixo P. A menor atividade de fosfatase das plantas mais adaptadas às condições de pouca disponibilidade de P seria explicada pelo efeito inibitório do P na atividade da enzima ([MC LACHLAN; DE MARCO, 1982](#)). Assim, plantas mais adaptadas à deficiência de P estariam em melhor condição de nutrição fosfatada, independente da menor disponibilidade do nutriente, e esta quantidade satisfatória de P nos tecidos é que exerceria o efeito inibitório.

Em relação à variabilidade inter e intra-específica das plantas para a atividade da fosfatase ácida, [Tadano et al. \(1993\)](#) comprovaram a capacidade diferencial de nove espécies vegetais, entre elas arroz, trigo, tremoço e tomate, quanto à secreção e atividade de fosfatase ácida de raízes, tendo verificado diferenças também na magnitude do aumento da atividade em resposta à deficiência de P. [Mc Lachlan \(1980a, 1980b\)](#) identificou essa variabilidade em raízes intactas de

espécies cultivadas de trigo e seus progenitores selvagens. Essas espécies apresentaram atividades enzimáticas menores do que as selvagens, sugerindo que tivesse ocorrido seleção inconsciente em trigo para maior capacidade de uso de P em situações de baixa fertilidade. [Furlani et al. \(1984a\)](#) trabalhando com sorgo e [Helal \(1990\)](#), com feijão, observaram diferenças entre genótipos tolerantes e sensíveis a baixas concentrações de P, sendo que os tolerantes apresentaram menores atividades da enzima.

Em milho, diferença intra-específica na atividade da fosfatase ácida de raízes foi observada entre híbridos, relacionada ao ciclo das plantas ([KUMMEROVÁ; BURESOVÁ, 1990](#)) e entre linhagens ([CLARK; BROWN, 1974b](#)). A influência do grau de deficiência de P na atividade da fosfatase foliar dessa espécie foi também descrita por [Elliott e Läuchli \(1986\)](#) e [Kummerová \(1986\)](#) que observaram aumento gradativo na atividade da enzima em folhas acompanhando o aumento na severidade da deficiência de P. [Elliott e Läuchli \(1986\)](#) verificaram essa relação já em fase de deficiência aguda do nutriente e não em estágios de deficiência leve a moderada. Já [Kummerová \(1986\)](#) observou que a deficiência de P refletiu, inicialmente, no aumento da atividade enzimática da folha mais velha do ponto de vista de desenvolvimento. Com a disseminação da deficiência, a atividade da fosfatase foi aumentando, sucessivamente, na segunda e terceira folhas, permitindo relacionar as alterações nos valores da atividade enzimática com a liberação de P dos ésteres fosfatados e com a translocação deste a partir das folhas mais velhas para as mais jovens.

Índices de eficiência

A eficiência é definida como a capacidade de determinado genótipo adquirir o nutriente para incorporá-lo e utilizá-lo na produção de biomassa ou material vegetal de rendimento econômico ([BLAIR, 1993](#)), como os grãos, no caso dos cereais. Os critérios e definições de eficiência são vários e dividem-se entre os que enfatizam a produtividade e os que destacam o requerimento interno do nutriente na planta ([GOURLEY et al., 1994](#)), dependentes das características morfológicas, bioquímicas e fisiológicas dos vegetais.

Em relação aos conceitos que enfocam parâmetros de produtividade, a eficiência nutricional pode ser definida como a capacidade de a planta produzir alto rendimento em um meio que possua características que afetem diretamente a produção padrão. O requerimento ou nível crítico externo, definido como a

quantidade necessária de nutriente no meio de cultivo para atingir determinada porcentagem do rendimento máximo (OZANNE, 1976, apud [BLAIR, 1993](#)), enquadra-se nos conceitos que enfatizam a produtividade. Outras definições de eficiência nutricional, também denominadas “eficiência agronômica”, incluem a produção da parte aérea ou do produto colhido por unidade do nutriente aplicado ([GOURLEY et al., 1994](#)).

A eficiência nutricional, enfatizando a capacidade de utilização de um nutriente, é geralmente definida como a biomassa total produzida pela planta por unidade de nutriente absorvido, medida equivalente ao inverso da concentração do nutriente na planta inteira. Essa relação é denominada, freqüentemente, “relação de eficiência nutricional” ([GOURLEY et al., 1994](#)) e tem sido usada para descrever o requerimento interno de nutrientes de várias espécies. [Siddiqi e Glass \(1981\)](#) postularam que o inverso da concentração de nutrientes não expressa o crescimento ou rendimento da planta e propuseram que uma medida mais apropriada de eficiência nutricional fosse o produto do rendimento pelo inverso da concentração de nutrientes, o que foi denominado “eficiência de utilização”. Quando se relacionam os parâmetros de concentração com a massa produzida, além da determinação dos componentes da eficiência de utilização, podem ser deduzidos os níveis de deficiência, os ótimos e os de consumo de luxo, desde que se relacionem os aumentos nas quantidades de nutriente acumulados com aqueles no crescimento e rendimento das plantas ([ISRAEL; RUFTY JR., 1988](#)).

Índices que variam basicamente na denominação dos componentes têm sido propostos para caracterizar genótipos quanto à eficiência nutricional, quantificando a absorção, translocação e utilização dos nutrientes e, também, o uso do adubo aplicado ([FOX, 1978; MOLL et al., 1982; BLAIR, 1993; GOURLEY et al., 1993, 1994; BALIGAR; FAGERIA, 1997](#)). A determinação de tais índices para o P é interessante em genótipos de milho, fazendo-se útil para a elucidação dos mecanismos determinantes da eficiência nesse nutriente, podendo também ser utilizados como critério de seleção.

O presente trabalho apresenta resultados de pesquisas desenvolvidas sobre a eficiência de utilização de P de variedades locais de milho. Esses estudos tiveram por objetivo de verificar diferenças quanto à produção de matéria seca e utilização de P.

Material e Métodos

Genótipos utilizados

Experimentos 1 e 2

As variedades locais, utilizadas nos dois primeiros ensaios, possuem ciclo normal e porte alto de planta e espiga. Quarentão e Catetão possuem grãos do tipo duro; Caiano de Sobrália, Caiano de Alegre e Carioca, grãos semidentados; Argentino, Amarelão, Cravinho, Asteca e Palha Roxa são de grãos dentados. Descrição detalhada desses materiais pode ser encontrada em [Machado \(1998\)](#).

As variedades melhoradas utilizadas foram a variedade experimental Eldorado (anteriormente denominada Nitrodente) e as comerciais Sol da Manhã, BR 105, BR 106 e BR 107. Eldorado e Sol da Manhã, ambas selecionadas para eficiência de utilização de nitrogênio (N), apresentam, respectivamente, grãos dentados, com predomínio da raça Tuxpeño, e grãos duros, com predomínio das raças Cateto, Eto e Duros do Caribe ([MACHADO et al., 1992](#)). Eldorado também está sendo selecionada para a eficiência de utilização de P. BR 105 e BR 107 são variedades de grãos duros e BR 106 possui grãos dentados. IAC Taiúba é uma variedade obtida no Instituto Agrônômico, em Campinas, possuindo grãos dentados e foi selecionada para tolerância à toxidez de alumínio no solo ([FURLANI et al., 1986](#)). Os híbridos duplos comerciais utilizados, XL 560 e P 6875, foram produzidos, respectivamente, pela Braskalb e Pioneer.

Experimentos 3, 4, 5 e 6

Nesses experimentos, foram utilizadas as variedades locais Caiano de Sobrália, Carioca, Antigo Maya, Catetão e Pedra Dourada. Antigo Maya e Pedra Dourada possuem, respectivamente, grãos dentados e semidentados. As variedades melhoradas foram Eldorado, Sol da Manhã, BR 105, BR 106 e BR 107.

Metodologias

a) Experimento 1: Avaliação da eficiência na utilização de P por genótipos de milho, em solo, sob condições de casa de vegetação

Este experimento foi conduzido em casa de vegetação na Embrapa Agrobiologia, em Seropédica, RJ. Utilizaram-se vasos contendo 11 kg de terra secada ao ar e peneirada em malha de 0,5 cm. A coleta do solo foi realizada na profundidade de 20 a 40 cm de um Argissolo Vermelho-Amarelo ([EMBRAPA, 1999](#)). O solo apresentou as seguintes características físicas e químicas: 300, 460, 110 e

130 g/kg de solo, de respectivamente, argila, areia grossa, areia fina e silte; pH (em água) de 5,4; teores de Al^{+++} , $Ca^{++} + Mg^{++}$ e K^+ de 0, 17 e 2,03 $mmol_c/dm^3$ de solo, respectivamente, e teor de P disponível de 4 mg/kg de solo ([EMBRAPA, 1997](#)).

O delineamento experimental foi o látice 6 x 6 simples duplicado, com quatro repetições. Os tratamentos constaram dos dezoito genótipos citados anteriormente e de duas doses de fósforo, 10 e 100 mg P/kg de solo, aplicadas na forma de solução de KH_2PO_4 , que corresponderam, respectivamente, a níveis de P disponível no solo de 6,1 e 45,5 mg P/kg por ocasião da sementeira.

O nitrogênio (N), na forma de solução de NH_4NO_3 , foi aplicado em doses seqüenciais correspondendo a 0, 5, 10, 10, 15, 20 e 20 mg/kg de solo, por sete semanas consecutivas, totalizando de 80 mg/kg de solo. O potássio (K) foi adicionado como solução de KCl nas parcelas que receberam a menor dose de P a fim de complementar o nível de K fornecido com a maior dose de KH_2PO_4 . Como fonte de micronutrientes, utilizou-se a solução de Hoagland, aplicada na dose de 1 mL/kg de solo. O conteúdo de água no solo foi mantido a 65% da capacidade máxima de retenção. Foram semeadas oito sementes por vaso e após a emergência das plântulas foi feito o desbaste, deixando quatro plantas por vaso.

As plantas foram colhidas aos 48 dias após a sementeira. Determinou-se a massa seca das raízes e da parte aérea e teor de P das raízes e da parte aérea ([BATAGLIA et al., 1983](#)). Com base nestes dados, estimou-se a eficiência na utilização de P pelo critério proposto por [Siddiqi e Glass \(1981\)](#) que relaciona a produção de massa seca total (raízes e parte aérea) com as quantidades do nutriente nessas partes, pelo índice de eficiência (IE) = $(MS)^2$ / conteúdo total de P.

Os procedimentos estatísticos aplicados aos dados, compreendendo análises de variância, testes de médias (Duncan) e correlações simples foram realizados com o uso do programa MSTAT-C (Michigan State University), versão 1989.

b) Experimento 2: Avaliação de variedades de milho para eficiência em fósforo em solução nutritiva

Este ensaio foi realizado em casa de vegetação, no Centro Experimental do Instituto Agrônomo, em Campinas (SP), utilizando-se a técnica de seleção de

plantas jovens em solução nutritiva, proposta por [Furlani e Furlani \(1988\)](#). O delineamento experimental adotado foi o de blocos ao acaso em fatorial 3×10 com cinco repetições. Os tratamentos constituíram-se de três concentrações de P na solução nutritiva adicionados na forma de KH_2PO_4 : 2, 4 e 8 mg L^{-1} de P (equivalentes a 0,0645; 0,129 e 0,258 mmol L^{-1}) e de dez variedades de milho, a saber: Caiano de Sobrália, Carioca, Antigo Maya, Catetão e Pedra Dourada (variedades locais); Eldorado, Sol da Manhã, BR 105, BR 106 e BR 107 (variedades melhoradas).

As sementes foram germinadas em rolos de papel de germinação, e as plântulas, com 10 dias de idade, foram transplantadas em número de três por vaso. Procedeu-se à determinação do conteúdo de P em amostras das sementes cujos valores médios (por 100 sementes) foram 133, 133, 187, 160, 147, 227, 107, 133, 187 e 213 mg, respectivamente, para Caiano de Sobrália, Carioca, Antigo Maya, Catetão, Pedra Dourada, Eldorado, Sol da Manhã, BR 105, BR 106 e BR 107.

Os vasos com capacidade de 3 L receberam solução cuja composição, descrita em [Furlani e Furlani \(1988\)](#), constituiu-se em mg L^{-1} de $\text{Ca} = 151$; $\text{K} = 141$; $\text{Mg} = 17$; $\text{N-NO}_3 = 138$, $\text{N-NH}_4 = 20$; $\text{S} = 56$; $\text{Cl} = 33$; $\text{Fe} = 3,6$; $\text{Mn} = 0,5$; $\text{B} = 0,27$; $\text{Zn} = 0,15$, $\text{Cu} = 0,04$; $\text{Mo} = 0,08$, nas formas de: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; NH_4NO_3 ; KCl ; K_2SO_4 ; KNO_3 ; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; Fe-HEDTA (preparado com HEDTA e $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$); $\text{MnCl} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; H_3BO_3 ; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ e $\text{Na}_2\text{Mo}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. O pH inicial da solução foi 5,0. A solução foi continuamente arejada durante o experimento, não sendo renovada, e o volume do vaso foi completado com água destilada em dias alternados.

Durante o período de crescimento das plantas, as médias das temperaturas máxima e mínima na casa de vegetação foram, respectivamente 36 ± 5 °C e 19 ± 1 °C. As plantas foram colhidas com 25 dias de idade (15 dias em solução nutritiva), lavadas em água destilada e separadas em parte aérea (folhas e colmos mais bainhas) e raízes. A seguir, foram secadas em estufa, pesadas para a determinação da massa de matéria seca (MS) e submetidas à análise química de P pelo método do vanado-molibdato de amônio ([BATAGLIA et al., 1983](#)). Calcularam-se também as seguintes variáveis: (1) relação raiz/parte aérea de MS; (2) conteúdo de P na MS da parte aérea e das raízes; (3) relação parte aérea/raízes do conteúdo de P; (4) índice de eficiência de utilização (IE), de acordo com [Siddiqi e Glass \(1981\)](#).

As análises de variância, testes de médias (Duncan) e correlações simples foram realizados com o uso do programa MSTAT-C (Michigan State University), versão 1989.

c) Experimento 3: Índices de eficiência em variedades de milho cultivadas no campo, sob condição ideal de fornecimento de P

Este experimento foi instalado em condições de campo, em Argissolo Vermelho-Amarelo ([EMBRAPA, 1999](#)) na área experimental da Embrapa Agrobiologia, em Seropédica, RJ. A análise química do solo, realizada de acordo com o método da [Embrapa \(1997\)](#), revelou as seguintes características: pH (água) = 4,5; P ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) = 10; Al, Ca, Mg e K ($\text{mmolc}\cdot\text{dm}^{-3}$) = 3,0; 31,0; 9,0 e 1,51 respectivamente. A dose de P, aplicada na forma de superfosfato simples, foi de $44 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ($100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de P_2O_5), definida em função do teor disponível no solos, da produtividade esperada e da resposta de produção de grãos de alguns desses materiais quando submetidos a doses crescentes de adubação fosfatada ([MACHADO, 1995](#)). A correção do solo e a adubação foram feitas com base nos resultados da análise de solo e na recomendação para a cultura do milho no Estado do Rio de Janeiro ([ALMEIDA et al., 1988](#)). Na calagem, aplicou-se a dose de $600 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de calcário dolomítico e na adubação nitrogenada, $100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N, na forma de uréia, sendo essa dose parcelada (1/3 no desbaste e o restante aplicado 10 dias depois). No plantio, foram aplicados $40 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de K_2O , na forma de KCl.

O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, com 6 repetições, e a parcela experimental constituiu-se de 1 linha de 5 m, com 1 m de espaçamento entre as linhas. O estande de $50.000 \text{ plantas}\cdot\text{ha}^{-1}$ foi estabelecido por desbaste realizado aos 27 dias após a semeadura. Ao final do ciclo, por ocasião da colheita (aproximadamente aos 130 dias após o plantio), determinou-se a produção de massa seca (MS) da parte aérea, compreendida pela MS de folhas e colmos (palha), MS de sabugos, produção de grãos, teores ([BATAGLIA et al., 1983](#)) e conteúdos de P nessas partes.

Foram determinados os seguintes índices de eficiência, calculados de acordo com [Moll et al. \(1982\)](#): **Pg/Ns** (avalia o uso eficiente do fertilizante aplicado para produção de grãos = $\text{kg de grãos}\cdot\text{kg}^{-1}$ de P aplicado); **Np/Ns** (avalia a eficiência de absorção do nutriente pela planta = $\text{kg de P acumulado na planta}\cdot\text{kg}^{-1}$ de P aplicado); **Pg/Np** (avalia a eficiência de utilização do nutriente para a produção de grãos = $\text{kg de grãos}\cdot\text{kg}^{-1}$ de P acumulado na planta); **Pg/Ng** (avalia a produção

de grãos por unidade do nutriente nos grãos = kg de grãos.kg⁻¹ de P acumulado nos grãos); **Ng/Np** (avalia a fração do total do nutriente na planta que é translocado para os grãos = kg de P acumulado nos grãos.kg⁻¹ de P acumulado na planta inteira), onde Pg = produção de grãos; Ns = quantidade de P suprido a partir do fertilizante fosfatado aplicado; Np = quantidade total de P na planta; Ng = quantidade de P nos grãos.

Os procedimentos estatísticos aplicados aos dados, compreendendo análise de variância, testes de médias (Duncan) e correlações simples foram realizados com o uso do programa MSTAT-C (Michigan State University), versão 1989.

d) Experimento 4: Determinação de parâmetros cinéticos de absorção de P de variedades de milho

O experimento foi conduzido em casa de vegetação e câmara de crescimento, no Instituto Agrônomo, em Campinas. Utilizou-se a técnica de seleção de plantas jovens em solução nutritiva proposta por [Furlani e Furlani \(1988\)](#). O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso, com cinco repetições. Foram utilizadas seis variedades de milho contrastantes quanto aos parâmetros de eficiência no uso de P, avaliadas nos ensaios anteriores, sendo três variedades locais (Caiano de Sobrália, Carioca e Catetão) e três melhoradas (Eldorado, Sol da Manhã e BR 106).

As sementes foram tratadas com fungicida e germinadas em rolos de papel de germinação, em água destilada, sob arejamento. As plântulas foram transplantadas com sete dias de idade diretamente para os vasos com solução nutritiva, mantendo-se três plantas por vaso.

Os vasos consistiram de caixas plásticas com tampas, com capacidade para 3,0 litros de solução. A solução nutritiva utilizada para o crescimento das plantas, descrita em [Furlani e Furlani \(1988\)](#), tinha a mesma composição daquela descrita no experimento 3, sendo que o fósforo foi adicionado na forma de KH₂PO₄, em uma única dose de 4 mg L⁻¹ de P (12 mg P vaso⁻¹). O pH inicial da solução foi de 5,2. A solução foi continuamente arejada no decorrer do experimento, não tendo sido renovada, e o volume do vaso foi completado com água destilada em dias alternados. Durante o período de crescimento das plantas, até 24 dias de idade, as médias das temperaturas máximas e mínimas foram de, respectivamente, 36 ± 6 °C e 24 ± 1 °C.

Junto das parcelas experimentais, instalou-se um ensaio adicional a fim de testar concentrações de P cuja absorção total pelas plantas ocorresse num período de até 24 horas, para definição da concentração de P a ser empregada no ensaio de cinética. Nesse teste prévio com três repetições, foram usadas três concentrações de P (4, 8 e 12 mg L⁻¹ de P ou 12, 24 e 36 mg vaso⁻¹), em duas variedades de milho, BR 106 e Catetão, que se apresentaram contrastantes em ensaios anteriores, ficando estabelecida a concentração de 8 mg L⁻¹ para o ensaio definitivo.

Para a determinação dos parâmetros cinéticos e morfologia das raízes, aos 24 dias de idade (17 dias em solução nutritiva), as plantas foram transferidas para a câmara de crescimento, em vasos contendo novas soluções nutritivas de mesma formulação, porém isentas de P. Após 24 horas nesta solução, as plantas foram retiradas da solução nutritiva e adicionaram-se aos vasos 8 mg P L⁻¹ (ou 258 µmol P L⁻¹). A solução foi homogeneizada rapidamente, e uma alíquota de 10 mL foi retirada e transferida para frasco de vidro para determinação da concentração inicial de P em cada vaso. A seguir, as plantas foram recolocadas nos vasos, e a contagem de tempo para a retirada das alíquotas de 10 mL foi iniciada em intervalos regulares de 90 minutos. Foram feitas sete amostragens, mantendo o intervalo de 90 minutos e, uma última, 24 horas após o início do teste de cinética. A temperatura média na câmara de crescimento, durante esse período de retirada das alíquotas foi de 30 ± 1 °C, com umidade relativa média de 55%.

O fósforo nas alíquotas foi determinado pelo método de [Murphy e Riley \(1962\)](#). Após a última amostragem, as plantas foram lavadas em água destilada e separadas em parte aérea e raízes. Nas raízes frescas, determinaram-se o comprimento e área média do sistema radicular pelo Sistema Integrado para Análise de Raízes e Cobertura de Solo (SIARCS) desenvolvido pela Embrapa Instrumentação Agropecuária ([JORGE, 1996](#)). A estimativa do raio médio radicular foi feita conforme descrito em [Rossiello et al. \(1995\)](#). As plantas foram, então, secadas em estufa, pesadas, moídas, e o P foi analisado pelo método do vanado-molibdato de amônio descrito por [Bataglia et al. \(1983\)](#). A eficiência de utilização de P das variedades de milho foi determinada pelo índice (IE) proposto por [Siddiqi e Glass \(1981\)](#).

A estimativa dos parâmetros cinéticos foi feita pela aproximação gráfico-matemática proposta por [Ruiz \(1985\)](#), utilizando-se do programa de

computador *Cinética*, versão 1.2 na qual a curva da quantidade de P na solução (Q), em função do tempo (t), é inicialmente representada graficamente e, a seguir, calculada por duas equações matemáticas. A primeira é uma equação de regressão linear na região inicial da curva cuja declividade permite o cálculo de V_{max} , e a segunda é uma equação de regressão de modelo potencial, exponencial ou exponencial-recíproco que melhor se ajuste aos dados, para a região curva do gráfico. O valor de K_m é determinado com o auxílio das duas equações (RUIZ, 1985). O valor de C_{min} foi estimado a partir da equação de regressão ajustada aos dados do esgotamento de P no último ponto do intervalo experimental. Os valores dos parâmetros cinéticos foram determinados para cada repetição, e os dados foram submetidos a análises de variância e testes de comparação de médias (Duncan) e correlações simples.

e) Experimento 5: Determinação de atividade de fosfatase ácida de raízes intactas de variedades de milho

Para determinar a atividade da fosfatase ácida em raízes intactas de variedades de milho foi instalado um experimento em casa de vegetação e câmara de crescimento, no Instituto Agrônomo em Campinas, SP.

O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso, com seis repetições. Os tratamentos constaram de seis variedades de milho contrastantes quanto às características de eficiência de uso de P dos ensaios anteriores (produção de massa e grãos e eficiência de utilização de P). Foram utilizadas variedades locais e melhoradas, mantendo a proporção de três variedades de cada grupo, a saber: Caiano de Sobrália, Carioca, Catetão (locais), Eldorado, Sol da Manhã e BR 106 (melhoradas).

As sementes, tratadas com fungicida, foram germinadas em rolos de papel de germinação em água destilada, sob aeração. Aos sete dias de idade, as plântulas foram transferidas diretamente para os vasos com solução nutritiva, mantendo-se três plantas por vaso.

Os vasos consistiram de caixas plásticas com tampas, com capacidade para 3,0 litros de solução. A solução nutritiva utilizada para o crescimento das plantas foi descrita por Furlani e Furlani (1988), e o fósforo foi adicionado na forma de KH_2PO_4 , em uma única dose de 4 mg L^{-1} de P (12 mg P vaso $^{-1}$).

O pH inicial da solução foi de 5,2. A solução foi continuamente arejada no decorrer do experimento, não tendo sido renovada, e o volume do vaso foi completado com água destilada em dias alternados. Durante o período de crescimento das plantas na casa de vegetação, as médias das temperaturas máximas e mínimas foram de, respectivamente, 36 ± 6 °C e 24 ± 1 °C.

Para o ensaio de atividade de fosfatase ácida, as plantas foram transferidas para a câmara de crescimento com 17 dias de idade (após 10 dias na solução nutritiva), quando foram colocadas em vasos contendo água destilada, com arejamento, onde permaneceram durante 12 horas (uma noite).

Depois desse período em água destilada, as plantas foram transferidas para recipientes plásticos revestidos com papel alumínio contendo 500 mL da solução nutritiva diluída (1/5 da solução original) e o substrato p-nitrofenilfosfato ($74,2 \mu\text{g p-NPP mL}^{-1}$) a ser utilizado pela enzima, com o pH ajustado para 4,0. As plantas ficaram em contato com o substrato por um período de tempo fixo, sendo que duas alíquotas foram retiradas, mantendo-se um intervalo de 15 minutos entre as amostragens. Um vaso sem plantas foi submetido às mesmas condições e foi amostrado para avaliar a hidrólise espontânea do substrato cuja leitura foi utilizada como prova em branco para a leitura das demais amostras. As condições na câmara de crescimento durante a determinação da atividade enzimática das variedades foram: temperatura média de 25°C e radiação fotossinteticamente ativa (FFF) de $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

A atividade da fosfatase ácida foi determinada pela leitura espectrofotométrica (em 420 nm) da quantidade de p-nitrofenol (p-NP) produzido no intervalo de tempo considerado (15 minutos). Esse procedimento para a determinação da atividade da fosfatase em raízes intactas foi baseado em [Clark \(1975a\)](#). Posteriormente, as plantas foram colhidas, lavadas em água destilada e separadas em parte aérea e raízes. A seguir, foram secadas em estufa a 70 °C para determinação da massa, moídas e submetidas à análise química de P pelo método do vanado-molibdato de amônio, descrito por [Bataglia et al. \(1983\)](#). A eficiência de utilização de P foi determinada pelo índice (IE) proposto por [Siddiqi e Glass \(1981\)](#). Os dados experimentais foram submetidos a análises de variância, testes de comparação de médias (Duncan) e correlações simples.

Resultados e Discussão

Avaliação da eficiência na utilização de P por genótipos de milho em solo, sob condições de casa de vegetação

Neste primeiro experimento, foi verificada a existência de diferenças entre variedades locais de milho tradicionalmente cultivadas e conservadas por pequenos agricultores, variedades melhoradas e híbridos quanto à eficiência no uso de P. Foram avaliados dezoito genótipos, em relação à produção de matéria seca e acumulação de P, e os resultados serviram de ponto de partida para estudos mais específicos com menor número de variedades.

A produção de matéria seca da parte aérea das raízes e o total dos genótipos de milho, avaliados nas duas doses de P, encontram-se na [Tabela 1](#). A matéria seca da parte aérea foi semelhante para todos os genótipos, exceto para o híbrido duplo XL 560, de produção inferior à média dos outros materiais. Este híbrido apresentou, desde o início do experimento, plantas raquíticas e de aspecto anormal. Portanto, quaisquer resultados relativos a ele devem ser considerados com ressalvas, por refletirem um aspecto particular do lote de sementes utilizado.

Observou-se que as variedades locais Asteca, Amarelão, Caiano de Sobrália, Cravinho, Carioca, Quarentão e Argentino, as variedades melhoradas BR 107 e IAC Taiúba e o híbrido duplo P 6875 alcançaram, na menor dose de P, produções superiores à média dos genótipos (4,19 g/planta). Na maior dose de P, as variedades locais Asteca, Amarelão, Caiano de Sobrália, Caiano de Alegre, Carioca, Catetão e Argentino, bem como todas as variedades melhoradas, à exceção de Sol da Manhã e do híbrido P 6875, tiveram valores de produção superiores à média dos genótipos (8,14 g/planta).

O sistema radicular ([Tabela 1](#)) exibiu maior variabilidade na produção de matéria seca, em relação à parte aérea, expressa pelo coeficiente de variação das médias, de forma análoga ao observado por [Furlani et al. \(1985\)](#). Portanto, houve maior separação dos genótipos pela produção de raízes, destacando-se, na média, as variedades locais Argentino, Amarelão, Caiano de Sobrália, Quarentão, Caiano de Alegre e Carioca que alcançaram produção semelhante ao híbrido duplo P 6875, de melhor desempenho. Entre as variedades locais, observaram-se diferenças na massa de raízes da ordem de 60%, quando se comparou a produção de Amarelão e Caiano de Sobrália com a produção de Palha Roxa e Catetão.

Tabela 1. Produção de matéria seca da parte aérea, raízes e total dos genótipos de milho cultivados em duas doses de fósforo, 10 (P10) e 100 (P100) mg.kg⁻¹ de P no solo. Média de quatro repetições⁽¹⁾.

| Genótipos | Produção de matéria seca | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------------------------|------------------|-------|-----------------|------------------|---------|-----------------|------------------|---------|
| | Parte aérea | | | Raízes | | | Total | | |
| | P ₁₀ | P ₁₀₀ | Média | P ₁₀ | P ₁₀₀ | Média | P ₁₀ | P ₁₀₀ | Média |
| | g.planta ¹ | | | | | | | | |
| Asteca | 4,40 | 8,86 | 6,63a | 2,29 | 3,91 | 3,10b-d | 6,69 | 12,77 | 9,73a-c |
| Amarelão | 4,92 | 8,18 | 6,55a | 2,71 | 4,00 | 3,34a-c | 7,63 | 12,18 | 9,91 ab |
| Caiano Sobrália | 4,35 | 8,79 | 6,56a | 2,30 | 4,35 | 3,32a-c | 6,65 | 13,13 | 9,89ab |
| Caiano Alegre | 4,00 | 8,35 | 6,17a | 2,13 | 4,45 | 3,29a-c | 6,13 | 12,80 | 9,46a-c |
| Cravinho | 4,39 | 7,27 | 5,83a | 2,04 | 4,07 | 3,05bc | 6,43 | 11,34 | 8,88a-d |
| Carioca | 4,77 | 8,55 | 6,66a | 2,37 | 4,15 | 3,26a-c | 7,14 | 12,70 | 9,92ab |
| Palha Roxa | 4,16 | 7,65 | 5,91a | 1,75 | 3,56 | 2,65c-f | 5,91 | 11,21 | 8,56b-d |
| Gatetão | 3,25 | 8,56 | 5,90a | 1,32 | 2,84 | 2,08fg | 4,57 | 11,40 | 7,98d |
| Quarentão | 4,45 | 7,87 | 6,16a | 2,55 | 4,06 | 3,30a-c | 7,00 | 11,93 | 9,46a-c |
| Argentino | 4,64 | 8,45 | 6,55a | 2,76 | 4,05 | 3,41ab | 7,40 | 12,50 | 9,95ab |
| Sol da Manhã | 3,96 | 7,73 | 5,84a | 1,86 | 3,19 | 2,53d-f | 5,82 | 10,92 | 8,37cd |
| Eldorado | 3,68 | 8,53 | 6,10a | 1,60 | 3,11 | 2,34ef | 5,29 | 11,63 | 8,46cd |
| BR 105 | 4,11 | 8,15 | 6,13a | 2,95 | 3,48 | 3,21a-d | 7,05 | 11,63 | 9,34a-d |
| BR 106 | 4,01 | 8,40 | 6,20a | 2,31 | 3,78 | 3,04b-e | 6,32 | 12,18 | 9,25a-d |
| BR 107 | 4,32 | 9,08 | 6,70a | 2,23 | 3,82 | 3,03b-e | 6,55 | 12,90 | 9,73a-c |

Continua...

Tabela 1. continuação.

| Genótipos | Produção de matéria seca | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------------------|--------------------|-------|-----------------|--------------------|---------|-----------------|--------------------|---------|
| | Parte aérea | | | Raízes | | | Total | | |
| | P ₁₀ | P ₁₀₀ | Média | P ₁₀ | P ₁₀₀ | Média | P ₁₀ | P ₁₀₀ | Média |
| | g.planta ⁻¹ | | | | | | | | |
| IAC Taiúba | 4,65 | 8,54 | 6,59a | 1,82 | 3,56 | 2,69b-f | 6,46 | 12,10 | 9,28a-d |
| P 6875 | 4,95 | 7,73 | 6,34a | 3,76 | 4,03 | 3,89a | 8,71 | 11,75 | 10,23a |
| XL 560 | 2,47 | 5,85 | 4,16b | 0,95 | 2,03 | 1,49g | 3,42 | 7,88 | 5,65e |
| Médias | 4,19B | 8,14A | 6,17 | 2,20B | 3,69A | 2,95 | 6,40B | 11,83A | 9,12 |
| Fg ⁽²⁾ | | 4,23** | | | 6,59** | | | 6,30** | |
| Fd ⁽³⁾ | | 868,16** | | | 205,07** | | | 727,30** | |
| Fgxd ⁽⁴⁾ | | 1,47 ^{ns} | | | 1,29 ^{ns} | | | 1,28 ^{ns} | |
| CV (%) ⁽⁵⁾ | | 13,03 | | | 21,14 | | | 13,26 | |

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si, a 5%, pelo teste de Duncan. ⁽²⁾Valor de F para os genótipos de milho. ⁽³⁾Valor de F para as doses de P. ⁽⁴⁾Valor de F para a interação entre os genótipos e as doses. ⁽⁵⁾Coeficiente de variação. ^{ns} Não significativo. **Significativo a 1% pelo teste F.

Quando se aplicou a maior dose do nutriente, verificou-se aumento médio na produção de massa da parte aérea de aproximadamente 50%. Para as raízes este aumento foi de cerca de 40%. Tal observação sugere que a produção de matéria seca da parte aérea seja mais sensível à deficiência de P em relação à produção de matéria seca de raízes, confirmando as observações de [Fageria et al. \(1988\)](#) para arroz, e [Alves et al. \(1988\)](#) e [Silva e Gabelman \(1993\)](#) para milho. Esses autores ressaltam a facilidade na determinação de massa seca de parte aérea e a validade de seu uso para estudos de avaliação de resposta à nutrição fosfatada de cereais sob condições de casa de vegetação.

Nesse sentido, e de acordo com o esquema usado por [Alves et al. \(1988\)](#), com base no critério de eficiência proposto por [Fox \(1978\)](#), em que plantas eficientes são aquelas capazes de apresentar alta produção em um meio contém teor de P disponível abaixo do necessário para se atingir a produção máxima, as produções de matéria seca nas doses 10 e 100 mg.kg⁻¹ solo encontram-se representadas, respectivamente, nos eixos x e y do sistema de coordenadas cartesianas (Figura 1). Foram calculadas as médias gerais da produção da parte aérea no nível de baixo P e de alto P, e estas corresponderam, respectivamente, a 4,19 e 8,14 g. planta⁻¹. O diagrama foi dividido em quadrantes que permitiram a separação dos genótipos em quatro grupos de produção de matéria seca e, principalmente, caracterizá-los em termos de resposta à adição de P.

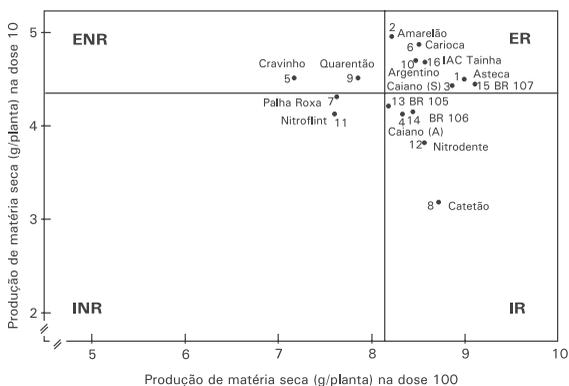


Figura 1. Classificação da eficiência das variedades com base na produção de matéria seca da parte aérea em duas doses de fósforo.

Fonte: Adaptado de [Machado \(1995\)](#).

Os genótipos que se encontram no quadrante superior à direita são considerados eficientes e responsivos (ER), pois foram os que mais produziram em condições

de baixo nível de fósforo e também responderam bem ao incremento desse elemento no solo. São eles: Asteca (1), Amarelão (2), Caiano de Sobrália (3), Carioca (6), Argentino (10), BR 107 (15) e IAC Taiúba (16).

Os genótipos do quadrante superior esquerdo são classificados como eficientes e não responsivos (ENR), uma vez que produziram bem na dose baixa de fósforo e tiveram menor resposta ao aumento de P aplicado ao solo. São eles as variedades locais Cravinho (5) e Quarentão (9) e o híbrido P 6875 (17).

Os genótipos do quadrante inferior direito são os ineficientes e responsivos (IR), que produzem pouco sob condições de baixo fósforo, mas respondem bem ao nutriente. Os materiais enquadrados nesta classe - Caiano de Alegre (4), Catetão (8), Eldorado (12), BR 105 (13) e BR 106 (14) - embora tenham respondido bem ao aumento de fósforo, não alcançaram a produção de matéria seca dos ENR e ER em baixa dose do elemento no solo.

Finalmente, os genótipos do quadrante inferior esquerdo são os ineficientes e não responsivos (INR), visto que tiveram produção inferior em ambas as situações. São eles a variedade local Palha Roxa (7), a variedade Sol da Manhã (11) e o híbrido XL 560 (18).

Essas observações, feitas quanto à produção de massa, necessitam confirmações com dados de produção de grãos, uma vez que refletem apenas os resultados obtidos para as condições experimentais específicas empregadas.

Na [Tabela 2](#), são apresentados os dados de conteúdo de P na parte aérea, nas raízes e na planta inteira (total) que fornecem indícios da capacidade de absorção e translocação de P dos genótipos. Os maiores valores para essas variáveis foram observados na dose mais elevada.

Entre os genótipos, observou-se que o conteúdo de P na parte aérea diferiu dentro de cada dose aplicada. Na menor dose, o híbrido P 6875 apresentou maior acumulação, não diferindo significativamente da maioria dos genótipos avaliados. Por sua vez, na maior dose de P aplicada, a maior acumulação de P na parte aérea foi observada pela variedade melhorada BR 107 e pelas variedades locais Catetão e Palha Roxa. Cravinho foi o genótipo que acumulou menor quantidade de P na maior dose. Na média, a variedade melhorada BR 107 e a variedade local Palha Roxa acumularam mais P na parte aérea.

Quanto às raízes, também foram verificadas diferenças no conteúdo de P entre os genótipos e as doses de P. O sistema radicular acumulou menores quantidades de P que a parte aérea.

Tabela 2. Conteúdo de fósforo na parte aérea e raízes e total dos genótipos de milho cultivados em duas doses de fósforo, 10 (P10) e 100 (P100) mg.kg⁻¹ de P no solo. Média de quatro repetições⁽¹⁾.

| Genótipos | Conteúdo de P | | | | | | | | |
|-----------------|---------------------------------------|------------------|----------|-----------------|------------------|--------|-----------------|------------------|----------|
| | Parte aérea | | | Raízes | | | Total | | |
| | P ₁₀ | P ₁₀₀ | Média | P ₁₀ | P ₁₀₀ | Média | P ₁₀ | P ₁₀₀ | Média |
| | mg P.planta ⁻¹ | | | | | | | | |
| Asteca | 9,88a-cB | 20,14c-eA | 15,01b-d | 2,23 | 5,89 | 4,06ab | 12,05 | 26,01 | 19,03a-c |
| Amarelão | 10,64a-cB | 18,89d-fA | 14,77b-d | 2,32 | 5,72 | 4,02ab | 12,93 | 24,71 | 18,82a-c |
| Caiano Sobrália | 10,11a-cB | 20,43b-eA | 15,27bc | 2,17 | 5,14 | 3,66ab | 12,20 | 25,60 | 18,90a-c |
| Caiano Alegre | 9,57bcB | 21,02b-dA | 15,29bc | 2,16 | 6,47 | 4,31a | 11,75 | 27,49 | 19,62a-c |
| Cravinho | 10,67a-cB | 17,40fA | 14,03cd | 2,06 | 5,73 | 3,90ab | 12,68 | 23,09 | 17,89bc |
| Carioca | 10,19a-cB | 19,88c-eA | 15,04b-d | 2,49 | 5,82 | 4,16ab | 12,69 | 25,76 | 19,22a-c |
| Palha Roxa | 11,08abB | 22,44abA | 16,76ab | 1,69 | 5,28 | 3,48ab | 12,72 | 27,65 | 20,19ab |
| Catetão | 8,74cB | 22,52abA | 15,63a-c | 1,51 | 4,47 | 2,99b | 10,30 | 26,96 | 18,63a-c |
| Quarentão | 9,13bcB | 19,47c-fA | 14,30cd | 2,51 | 5,08 | 3,79ab | 11,72 | 24,55 | 18,13bc |
| Argentino | 10,10a-cB | 19,59c-eA | 14,85b-d | 2,94 | 5,39 | 4,17ab | 13,07 | 24,98 | 19,02a-c |
| Sol da Manhã | 10,17a-cB | 18,42efA | 14,29cd | 1,90 | 4,45 | 3,17ab | 12,12 | 22,90 | 17,51c |
| Eldorado | 9,62a-cB | 21,54bcA | 15,58a-c | 1,69 | 4,44 | 3,07b | 11,32 | 25,97 | 18,65a-c |
| BR 105 | 9,90a-cB | 20,95b-dA | 15,42a-c | 2,84 | 4,68 | 3,76ab | 12,71 | 25,66 | 19,18a-c |
| BR 106 | 9,94a-cB | 19,45c-fA | 14,70b-d | 2,16 | 5,08 | 3,62ab | 12,06 | 24,57 | 18,31bc |

Continua...

Tabela 2. Continuação.

| Genótipos | Conteúdo de P | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------------------------|------------------|----------|-----------------|--------------------|--------|-----------------|--------------------|----------|
| | Parte aérea | | | Raízes | | | Total | | |
| | P ₁₀ | P ₁₀₀ | Média | P ₁₀ | P ₁₀₀ | Média | P ₁₀ | P ₁₀₀ | Média |
| | mg P.planta ⁻¹ | | | | | | | | |
| BR 107 | 11,08abB | 24,04aA | 17,56a | 2,23 | 4,54 | 3,38ab | 13,28 | 28,55 | 20,19a |
| IAC Taiúba | 11,13abB | 20,68b-dA | 15,91a-c | 1,85 | 5,01 | 3,43ab | 12,91 | 25,69 | 19,31a-c |
| P 6875 | 11,90aB | 19,79c-eA | 15,85a-c | 2,72 | 5,52 | 4,12ab | 14,60 | 25,32 | 19,96a-c |
| XL 560 | 6,69dB | 19,36c-fA | 13,02d | 1,18 | 3,28 | 2,23c | 7,97 | 22,63 | 15,30d |
| Médias | 10,03B | 20,33A | 15,18 | 2,15B | 5,11A | 3,63 | 12,17B | 25,45A | 18,81 |
| Fg ⁽²⁾ | | 2,29** | | | 4,17** | | | 2,62** | |
| Fd ⁽³⁾ | | 1053,92** | | | 669,34** | | | 1434,55** | |
| Fgxd ⁽⁴⁾ | | 1,93* | | | 1,65 ^{ns} | | | 1,45 ^{ns} | |
| CV (%) ⁽⁵⁾ | | 12,55 | | | 18,94 | | | 11,18 | |

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si, a 5%, pelo teste de Duncan. ⁽²⁾Valor de F para os genótipos de milho. ⁽³⁾Valor de F para as doses de P. ⁽⁴⁾Valor de F para a interação entre os genótipos e as doses. ⁽⁵⁾Coeficiente de variação. ^{ns}Não significativo. *Significativo a 5% pelo teste F. **Significativo a 1% pelo teste F.

Observou-se, de maneira geral, maior eficiência no nível mais alto de P no solo ([Tabela 3](#)). A exceção foi verificada para o híbrido P 6875 cuja capacidade de utilizar o P, para produção de matéria seca, não se alterou em função da maior disponibilidade do nutriente.

Na menor dose de P, o genótipo mais eficiente foi o híbrido duplo P 6875 e os menos eficientes foram a variedade local Catetão e o híbrido XL 560. Para a maior dose de P as variedades Caiano de Sobrália, Argentino, Asteca, Carioca, BR 106, Amarelão e Caiano de Alegre foram mais eficientes, enquanto o híbrido XL 560 manteve-se na condição de material inferior. As variedades locais Amarelão, Carioca, Quarentão, Argentino, Asteca, Caiano de Sobrália e a selecionada BR 105 destacaram-se pelos elevados valores de eficiência, acima da média dos genótipos, em ambos os níveis de P ([Tabela 3](#)). Esses genótipos foram mais eficientes em utilizar o P mesmo em concentrações moderadamente baixas nos tecidos. Isso demonstra uma possível adaptação deles tanto a ambientes com deficiência como a ambientes em que os níveis de disponibilidade de P sejam ideais.

As variedades Caiano de Alegre, Cravinho, Eldorado, BR 106, BR 107 e IAC Taiúba foram menos eficientes na menor dose de P, porém responderam positivamente com o incremento de P, uma vez que, na maior dose, apresentaram valores de eficiência próximos aos dos materiais mais eficientes. Estas variedades tiveram a necessidade ou o requerimento de uma concentração de P no tecido mais alta para que fosse possível utilizá-lo tão efetivamente. À exceção da variedade local Cravinho, todos esses genótipos classificaram-se como responsivos (eficientes ou não) conforme proposta de [Fox \(1978\)](#) e apresentada na [Figura 1](#).

Os genótipos que, na média, destacaram-se por terem atingido os maiores valores de eficiência, ou seja, converteram melhor o nutriente absorvido em massa seca, estão entre os que foram enquadrados como eficientes (responsivos ou não) pela classificação apresentada na [Figura 1](#). Foram eles: o híbrido P 6875, as variedades locais Argentino, Amarelão, Caiano de Sobrália, Carioca, Asteca, Quarentão e Caiano de Alegre e as variedades melhoradas BR 106 e BR 107.

Considerando os valores médios de eficiência dos genótipos e enfocando o aspecto de origem, aqueles derivados dos Tuxpeños foram 13% mais eficientes que os originados dos Catetos. Enfocando cada dose, observou-se que, na menor, entre Tuxpeños e Catetos, os primeiros foram superiores em cerca de 14%. Na maior dose de P aplicada, também os Tuxpeños foram mais eficientes, dessa vez em 13%.

Tabela 3. Índice de eficiência (IE) na utilização de fósforo dos genótipos de milho cultivados em duas doses de fósforo, 10 (P10) e 100 (P100) mg. kg⁻¹ de P no solo. Média de quatro repetições⁽¹⁾.

| Genótipos | Índice de eficiência na utilização (IE) | | |
|-----------------------|--|------------------|---------|
| | P ₁₀ | P ₁₀₀ | Média |
| | g ² matéria seca. mg P ¹ | | |
| Asteca | 3,80b-eB | 6,28abA | 5,04ab |
| Amarelão | 4,61bB | 5,97a-eA | 5,29ab |
| Caiano Sobrália | 3,81b-eB | 6,70aA | 5,26ab |
| Caiano Alegre | 3,15efB | 5,95a-eA | 4,55a-d |
| Cravinho | 3,27d-fB | 5,63 b-fA | 4,45b-d |
| Carioca | 4,11b-dB | 6,22 a-cA | 5,17ab |
| Palha Roxa | 2,89fgB | 4,61 gA | 3,75de |
| Catetão | 2,09ghB | 4,83 fgA | 3,46e |
| Quarentão | 4,18bcB | 5,81 b-eA | 4,99ab |
| Argentino | 4,33bB | 6,30 abA | 5,31ab |
| Sol da Manhã | 2,77fgB | 5,08 e-gA | 3,92c-e |
| Eldorado | 2,59fgB | 5,33 c-gA | 3,96c-e |
| BR 105 | 3,81b-eB | 5,28 d-gA | 4,55a-d |
| BR 106 | 3,35c-fB | 6,07 a-dA | 4,71a-c |
| BR 107 | 3,08e-fB | 5,79 b-eA | 4,43b-d |
| IAC Taiúba | 3,35c-fB | 5,63 b-fA | 4,49a-d |
| P 6875 | 5,39aA | 5,36 c-gA | 5,37a |
| XL 560 | 1,53hB | 2,95 hA | 2,24f |
| Médias | 3,45B | 5,54A | 4,50 |
| Fg ⁽²⁾ | | 8,71 ** | |
| Fd ⁽³⁾ | | 263,83 ** | |
| Fgxd ⁽⁴⁾ | | 1,87* | |
| CV (%) ⁽⁵⁾ | | 17,17 | |

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas, não diferem entre si, a 5%, pelo teste de Duncan. ⁽²⁾Valor de F para os genótipos de milho. ⁽³⁾Valor de F para as doses de P.

⁽⁴⁾Valor de F para a interação entre os genótipos e as doses. ⁽⁵⁾Coeficiente de variação. *Significativo a 5% pelo teste F. **Significativo a 1% pelo teste F.

Os resultados de eficiência refletem a capacidade de os genótipos utilizar o P absorvido para a produção de massa nas condições e período de tempo em que o experimento foi realizado, o que pode não necessariamente refletir na produção de grãos. Isto foi verificado por alguns autores ([FOX, 1978](#); [ALVES et al., 1988](#)), fato este que sugeriu a contestação desse tipo de estudo para a predição da eficiência na produção econômica de grãos, em função da grande complexidade de fatores genéticos e ambientais a que a produção final está sujeita e à influência do vigor das sementes no desenvolvimento inicial das plantas em experimentos de curta duração conduzidos sob condições de casa de vegetação. Vale ressaltar que esse experimento teve duração superior em cerca de duas e três vezes aos ensaios realizados, respectivamente, por [Fox \(1978\)](#) e [Alves et al. \(1988\)](#). Convém destacar, ainda, o desempenho semelhante das variedades locais ao dos materiais já selecionados e melhorados, justificando seu emprego e ressaltando seu potencial como fonte de características favoráveis para o parâmetro em questão.

Avaliação de variedades de milho para eficiência em fósforo em solução nutritiva

Neste segundo experimento, algumas das variedades testadas no ensaio anterior foram avaliadas em solução nutritiva, com o objetivo de comparar o desempenho delas neste meio de crescimento com o apresentado no solo em casa de vegetação (ensaio anterior) e no campo (próximo ensaio). Tal comparação é importante porque as metodologias utilizadas para os estudos de mecanismos de eficiência de absorção (cinética e atividade de fosfatase) preconizam a utilização de solução nutritiva e uma correspondência satisfatória do comportamento dos genótipos se faz necessária.

O aumento na concentração de P na solução promoveu acréscimos na produção de matéria seca da parte aérea até a dose de 8 mg.L⁻¹ de P ([Tabela 4](#)). A variedade Eldorado foi superior em todas as doses, e a Carioca, inferior. Verificaram-se diferenças estatísticas entre e dentro dos grupos de variedades locais e melhoradas; estas produziram quantidades significativamente maiores quando comparadas àquelas. Entre as melhoradas, a que apresentou melhor desempenho foi Eldorado e entre as locais, Antigo Maya.

Para a produção média de raízes, a variedade Antigo Maya, seguida de Pedra Dourada, BR 106, BR 105 e Eldorado foram superiores; verificaram-se, contudo, diferenças menores que as observadas para a parte aérea. Na dose mais baixa de P,

Antigo Maya e Eldorado apresentaram os maiores sistemas radiculares, e a variedade local Carioca, o menor. Nas médias de grupos, não houve diferença entre as variedades locais e as melhoradas nem dentro do grupo das melhoradas. Entre as locais, Antigo Maya e Pedra Dourada produziram mais matéria seca de raízes.

As proporções de matéria seca e de P distribuídas entre as raízes e a parte aérea são fatores importantes na eficiência na absorção e utilização do P. Observou-se que, para todos os genótipos, a relação raiz/parte aérea de matéria seca foi maior na menor dose de P, diminuindo à medida que houve acréscimo do nutriente na solução nutritiva. A relação raiz/parte aérea foi reduzida, em média, aproximadamente em 41 % quando se aumentou a dose de P de 2 para 8 mg P.L⁻¹ ([Tabela 4](#)). Este fato tem sido verificado freqüentemente ([ALVES et al., 1988](#); [FÖHSE et al., 1988](#)) para várias espécies vegetais e sugere que as raízes se tornam os drenos preferenciais de fotoassimilados quando alguns nutrientes limitam o crescimento das plantas, principalmente o P e o N, o que pode ser uma estratégia de adaptação desenvolvida para aumentar a eficiência na absorção quando há limitação de P ([FÖHSE et al., 1988](#); [HORST et al., 1993](#)).

Destacaram-se as variedades Eldorado e Antigo Maya que apresentaram os valores extremos – inferior e superior, respectivamente – para essa relação. Isso sugere que a variedade Eldorado, com a menor relação raiz/parte aérea, seja a mais eficiente em P, pois mostrou melhor desenvolvimento da parte aérea nas três concentrações de P na solução e sua produção de raízes situou-a entre as melhores variedades. Na média, as variedades melhoradas, principalmente, devido ao comportamento da Eldorado, apresentaram valores da relação raiz/parte aérea significativamente menores que as locais. Sendo o aumento na relação raiz/parte aérea um sinal de sensibilidade à deficiência de P nas plantas, deduz-se que as variedades locais foram mais sensíveis às concentrações de P na solução nutritiva para as condições desse experimento. Entre as variedades locais, a Carioca apresentou a menor relação raiz/parte aérea e Antigo Maya e Pedra Dourada, as maiores. Entre as melhoradas, Sol da Manhã, BR 105, BR 106 e BR 107 tiveram relações raiz/parte aérea maiores que Eldorado ([Tabela 4](#)). Algumas dessas variedades, quando avaliadas no solo, mostraram valores da relação raiz/parte aérea semelhantes aos do experimento em solução nutritiva ([MACHADO, 1995](#)).

Tabela 4. Produção de matéria seca da parte aérea e de raízes e relação raiz/parte aérea (R/PA) de matéria seca de variedades de milho cultivadas em solução nutritiva com três concentrações de P. Vasos com três plantas. Média de cinco repetições¹.

| Variedades | Matéria seca da parte aérea (g.vaso ⁻¹) | | | | Matéria seca de raízes (g.vaso ⁻¹) | | | | Relação raiz/parte aérea | | | |
|-----------------------|---|--------------------|-------|---------|--|--------------------|-------|--------|--------------------------------|--------------------|-------|---------|
| | P (mg.L ⁻¹ solução) | | | Médias | P (mg.L ⁻¹ solução) | | | Médias | P (mg.L ⁻¹ solução) | | | Médias |
| | 2 | 4 | 8 | | 2 | 4 | 8 | | 2 | 4 | 8 | |
| Caiano de Sobrália | 3,15 | 4,40 | 5,26 | 4,27CDE | 1,96 | 2,49 | 2,05 | 2,17B | 0,63 | 0,57 | 0,39 | 0,53ABC |
| Carioca | 2,86 | 4,18 | 4,12 | 3,72E | 1,84 | 1,97 | 1,50 | 1,77C | 0,64 | 0,48 | 0,36 | 0,49C |
| Antigo Maya | 3,72 | 4,80 | 6,25 | 4,92B | 2,76 | 2,56 | 2,91 | 2,74A | 0,75 | 0,54 | 0,46 | 0,58A |
| Catetão | 3,59 | 4,03 | 5,04 | 4,22DE | 2,26 | 1,85 | 2,03 | 2,04BC | 0,67 | 0,46 | 0,40 | 0,51ABC |
| Pedra Dourada | 3,45 | 4,99 | 5,97 | 4,81BC | 2,52 | 2,77 | 2,45 | 2,58A | 0,74 | 0,55 | 0,41 | 0,57AB |
| Eldorado | 5,72 | 6,31 | 7,34 | 6,46A | 2,75 | 2,39 | 2,00 | 2,38AB | 0,48 | 0,38 | 0,28 | 0,38D |
| Sol da Manhã | 3,03 | 4,14 | 5,43 | 4,20DE | 2,09 | 2,25 | 2,08 | 2,14B | 0,70 | 0,54 | 0,38 | 0,54ABC |
| BR 105 | 3,30 | 4,68 | 6,18 | 4,72BCD | 2,43 | 2,37 | 2,44 | 2,41AB | 0,74 | 0,51 | 0,39 | 0,54ABC |
| BR 106 | 3,56 | 5,46 | 5,87 | 4,96B | 2,30 | 2,97 | 2,41 | 2,56A | 0,65 | 0,54 | 0,41 | 0,53ABC |
| BR 107 | 3,16 | 4,43 | 6,15 | 4,58BCD | 1,94 | 2,19 | 2,41 | 2,18B | 0,63 | 0,50 | 0,39 | 0,50BC |
| Médias | 3,55c | 4,74b | 5,76a | | 2,29a | 2,38a | 2,23a | | 0,66a | 0,50b | 0,39c | |
| Fv ⁽²⁾ | | 16,13** | | | | 6,06** | | | | 6,14** | | |
| Fi ⁽²⁾ | | 7,10** | | | | 11,24** | | | | 2,80* | | |
| Fm ⁽²⁾ | | 22,56** | | | | 2,13 ^{ns} | | | | 9,19** | | |
| Fg ⁽²⁾ | | 26,54** | | | | 0,92 ^{ns} | | | | 6,50* | | |
| Fd ⁽³⁾ | | 121,87** | | | | 1,46 ^{ns} | | | | 120,35** | | |
| Fvxd ⁽⁴⁾ | | 1,35 ^{ns} | | | | 1,37 ^{ns} | | | | 0,75 ^{ns} | | |
| CV (%) ⁽⁵⁾ | | 15,10 | | | | 19,97 | | | | 17,13 | | |

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem a 5%, pelo teste de Duncan. ⁽²⁾Valor de F para as variedades (Fv), para as variedades locais (Fi), para as variedades melhoradas (Fm) e para os grupos (Fg). ⁽³⁾Valor de F para as doses. ⁽⁴⁾Valor de F para a interação entre os tratamentos (Fvxd). ⁽⁵⁾Coeficiente de variação. **Significativo a 1% pelo teste F. *, **Significativo a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.

^{ns}Não significativo.

O conteúdo de P na parte aérea das raízes diferiu para variedades e doses ([Tabela 5](#)). O aumento de P na solução promoveu acréscimos no P acumulado em todas as partes das plantas. Entre as variedades, destacou-se a Eldorado pelo maior conteúdo de P na parte aérea. Para as raízes, destacou-se a variedade local Antigo Maya. As variedades melhoradas acumularam, em média, maiores quantidades de P na parte aérea que as locais, com destaque para Eldorado. Já para as raízes, os grupos de variedades locais e melhoradas não se diferenciaram, porém, em cada grupo, destacaram-se Antigo Maya e Eldorado respectivamente ([Tabela 5](#)).

As plantas extraíram praticamente todo o P colocado na solução, da mesma forma que observaram [Furlani et al. \(1985\)](#) em milho crescido em condições semelhantes de permanência na solução nutritiva e de composição desta. É importante considerar que as sementes não foram removidas quando as plântulas foram transferidas do papel de germinação para os vasos com solução nutritiva. Alguns pesquisadores removem o endosperma em estudos dessa natureza. [Alves et al. \(1988\)](#) atribuíram as diferenças na produção de matéria seca de híbridos de milho ao conteúdo de P da semente, mas constataram, também, que a prática da remoção das sementes remanescentes após a germinação completa das plântulas, para minimizar a influência das sementes em ensaios de curta duração, não reduziu o efeito.

Neste experimento, as plantas se valeram do P originário da semente no período inicial do desenvolvimento; isso explica os conteúdos de P acumulados nas plantas, por vezes, superiores aos fornecidos na solução nutritiva. Ao final do experimento, porém, observou-se a quase completa exaustão do P da solução e respostas diferenciadas na acumulação do nutriente entre as doses aplicadas, demonstrando a exigência do suprimento externo e a importância relativa do P das sementes nas determinações feitas por ocasião da colheita.

Por essa razão, uma avaliação adequada das plantas em solução nutritiva para eficiência na absorção e uso de P requer plantas com cerca de 20 a 30 dias de idade, período em que a velocidade de absorção de P pelas raízes é máxima ([CLARK, 1975a](#)), o que permite melhor distinção entre genótipos para essa característica. Além disso, nessa fase, é possível observar diferenças significativas na translocação de P e no tamanho de sistema radicular e parte aérea das plântulas ([Figura 2](#)).



Figura 2. Avaliação de variedades de milho em solução nutritiva sob doses crescentes de fósforo.

Eldorado foi a variedade que proporcionalmente absorveu e translocou mais P para a parte aérea, diferindo significativamente das demais. As plantas alocaram, proporcionalmente, mais P nas raízes e menos na parte aérea na menor dose do nutriente na solução ([Tabela 5](#)). À medida que a concentração de P no meio aumentou, a proporção de P acumulada na parte aérea também se elevou, fato igualmente observado por [Gill et al. \(1992\)](#) e [Alves et al. \(1998\)](#) em plantas de milho. [Schjørring e Jensén \(1987\)](#), entre outros demonstraram que plantas deficientes retêm mais P nas raízes que plantas bem nutridas em P.

Entre os grupos, as variedades melhoradas apresentaram maiores valores para a relação parte aérea/raízes de conteúdo de P. Dentre as locais, Catetão foi a variedade que proporcionalmente transferiu mais P para a parte aérea em detrimento às raízes. Eldorado foi a variedade que apresentou maior capacidade de absorver e transportar o nutriente para as folhas sob condições de baixo P, aumentando a produção de matéria seca. [Marschner \(1995\)](#) explicou que as plantas deficientes aumentam a redistribuição de P da parte aérea para as raízes com conseqüente aumento na relação raiz/parte aérea de conteúdo de P. Segundo esse autor, sob condições de deficiência de P, ocorre maior retenção de P nas raízes e também uma redistribuição via floema, trazendo P adicional a elas. Essa fração ciclada não só pode influenciar, mas também alterar a força do dreno dos fotossintetizados para as raízes às expensas da parte aérea.

Tabela 5. Conteúdo de P na parte aérea e nas raízes e relação parte aérea/raízes de conteúdo de P de variedades de milho cultivadas em solução nutritiva com três concentrações de P. Vasos com três plantas. Média de cinco repetições¹.

| Variedades | Conteúdo de P da parte aérea (g.vaso ⁻¹) | | | | Conteúdo de P das raízes (g.vaso ⁻¹) | | | | Relação parte aérea/raiz | | | |
|-----------------------|--|--------------------|--------|---------|--|--------------------|-------|--------|--------------------------------|--------------------|-------|--------|
| | P (mg.L ⁻¹ solução) | | | Médias | P (mg.L ⁻¹ solução) | | | Médias | P (mg.L ⁻¹ solução) | | | Médias |
| | 2 | 4 | 8 | | 2 | 4 | 8 | | 2 | 4 | 8 | |
| Caiano de Sobrália | 4,68 | 9,42 | 19,40 | 11,17BC | 3,00 | 4,68 | 5,42 | 4,37BC | 1,57 | 2,03 | 3,61 | 2,40BC |
| Carioca | 4,51 | 9,90 | 18,16 | 10,82BC | 3,28 | 4,14 | 5,30 | 4,24BC | 1,38 | 2,36 | 3,46 | 2,40BC |
| Antigo Maya | 5,26 | 9,99 | 18,91 | 11,39BC | 4,23 | 4,56 | 6,25 | 5,01A | 1,28 | 2,19 | 3,03 | 2,17C |
| Catetão | 6,92 | 9,74 | 17,07 | 11,25BC | 3,51 | 3,37 | 4,82 | 3,90C | 1,87 | 2,98 | 3,63 | 2,83B |
| Pedra Dourada | 4,60 | 9,40 | 17,06 | 10,36C | 3,22 | 3,33 | 5,30 | 4,28BC | 1,47 | 2,21 | 3,27 | 2,32C |
| Eldorado | 8,72 | 13,49 | 22,72 | 14,98A | 3,91 | 4,35 | 5,07 | 4,44B | 2,26 | 3,13 | 4,63 | 3,34A |
| Sol da Manhã | 4,91 | 8,59 | 19,58 | 11,03BC | 3,17 | 4,01 | 5,05 | 4,08BC | 1,55 | 2,18 | 3,91 | 2,55BC |
| BR 105 | 4,62 | 9,08 | 20,51 | 11,40BC | 3,78 | 4,29 | 5,40 | 4,49B | 1,22 | 2,15 | 4,02 | 2,46BC |
| BR 106 | 5,45 | 10,62 | 19,05 | 11,71B | 3,53 | 4,32 | 5,11 | 4,32BC | 1,55 | 2,50 | 3,83 | 2,63BC |
| BR 107 | 5,21 | 9,60 | 18,44 | 11,08BC | 2,87 | 3,89 | 4,99 | 3,92C | 1,88 | 2,54 | 3,96 | 2,79B |
| Médias | 5,49c | 9,97b | 19,09a | | 3,45c | 4,19b | 5,27a | | 1,60c | 2,43b | 3,73a | |
| Fv ⁽²⁾ | | 9,61** | | | | 4,08** | | | | 5,48** | | |
| Fj ⁽²⁾ | | 1,02 ^{ns} | | | | 6,52** | | | | 2,95* | | |
| Fm ⁽²⁾ | | 16,53** | | | | 2,35* | | | | 6,00** | | |
| Fg ⁽²⁾ | | 16,28** | | | | 1,24 ^{ns} | | | | 13,53** | | |
| Fd ⁽³⁾ | | 955,06** | | | | 110,46** | | | | 189,78** | | |
| Fvxd ⁽⁴⁾ | | 1,54 ^{ns} | | | | 1,10 ^{ns} | | | | 0,82 ^{ns} | | |
| CV (%) ⁽⁵⁾ | | 13,77 | | | | 14,30 | | | | 21,32 | | |

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem a 5%, pelo teste de Duncan. ⁽²⁾Valor de F para as variedades (Fv), para as variedades locais (Fj), para as variedades melhoradas (Fm) e para os grupos (Fg). ⁽³⁾Valor de F para as doses. ⁽⁴⁾Valor de F para a interação entre os tratamentos (Fvxd). ⁽⁵⁾Coefficiente de variação. **Significativo a 1% pelo teste F. *, **Significativo a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F. ^{ns}Não significativo.

Para a eficiência de utilização de P, avaliada pelo índice (IE) proposto por [Siddiqi e Glass \(1981\)](#), que mede a produção de massa em relação ao conteúdo do nutriente nos tecidos, observaram-se diferenças entre as variedades testadas e entre as concentrações de P na solução ([Tabela 6](#)).

De modo geral, à medida que aumentou a concentração de P na solução e nas plantas, diminuiu o índice de eficiência na utilização de P para a produção de matéria seca. Os maiores índices foram obtidos em 2 e 4 mg.L⁻¹ de P na solução. A menor eficiência na utilização no nível mais alto de P na solução resultou do acúmulo de quantidade crescente de P proporcionalmente superior à matéria seca das plantas.

Entre as variedades avaliadas, Eldorado mostrou-se mais eficiente na utilização de P para a produção de matéria seca, inclusive na menor dose, dando indícios do progresso de sua seleção para eficiência em P. A ela, seguiram-se as variedades Pedra Dourada, Antigo Maya e BR 106. As menos eficientes foram Carioca, Catetão e Sol da Manhã. Na comparação entre grupos, verificou-se que as melhoradas foram, em média, mais eficientes que as locais, com diferenças significativas dentro dos grupos ([Tabela 6](#)).

A superioridade de Eldorado para a eficiência na utilização de P reflete seu desempenho nos demais parâmetros avaliados: foi a variedade que mais produziu massa de parte aérea e uma das que mais produziram raízes ([Tabela 4](#)); alocou preferencialmente a matéria seca produzida na parte aérea, bem como o P absorvido ([Tabelas 4 e 5](#)). Pedra Dourada, Antigo Maya e BR 106 destacaram-se quanto às características relacionadas ao sistema radicular, apresentando os maiores valores de matéria seca, da razão raiz/parte aérea e conteúdo de P nas raízes ([Tabelas 4 e 5](#)). Caiano, Catetão e Carioca, menos eficientes na utilização de P, produziram menos matéria seca de parte aérea e estiveram entre os materiais de maior razão raiz/parte aérea ([Tabela 4](#)). Tal variabilidade genotípica em milho para a eficiência a P tem sido relatada com freqüência na literatura ([FURLANI et al., 1985](#); [ALVES et al., 1988](#); [SILVA; GABELMAN, 1993](#); [FAGERIA; BALIGAR, 1997](#)).

Tabela 6. Índices de eficiência na utilização de fósforo de variedades de milho crescidas até 25 dias de idade em solução nutritiva com três concentrações de P. Vasos com três plantas. Média de cinco repetições¹.

| Variedades | Índice de eficiência na utilização de P | | | Médias |
|---------------------------------|---|--------------------|-------|---------|
| | P (mg.L ⁻¹ solução) | | | |
| | 2 | 4 | 8 | |
| | g ² .mg P ¹ | | | |
| Caiano | 3,43 | 3,39 | 2,17 | 3,00DEF |
| Carioca | 2,90 | 2,77 | 1,35 | 2,34F |
| Antigo Maya | 4,46 | 3,77 | 3,41 | 3,88ABC |
| Catetão | 3,39 | 2,66 | 2,30 | 2,78EF |
| Pedra Dourada | 4,60 | 4,52 | 3,21 | 4,11AB |
| Eldorado | 5,82 | 4,32 | 3,17 | 4,44A |
| Sol da Manhã | 3,25 | 3,31 | 2,33 | 2,96DEF |
| BR 105 | 3,97 | 3,87 | 2,94 | 3,59BCD |
| BR 106 | 3,87 | 4,84 | 2,85 | 3,85ABC |
| BR 107 | 3,29 | 3,28 | 3,20 | 3,25CDE |
| Médias | 3,90a | 3,67a | 2,69b | |
| F _v ⁽²⁾ | | 8,61** | | |
| F _d ⁽³⁾ | | 27,07** | | |
| F _{vxd} ⁽⁴⁾ | | 1,27 ^{ns} | | |
| CV (%) ⁽⁵⁾ | | 25,48 | | |

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas na linha e maiúsculas na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Duncan a 5%. ⁽²⁾Valor de F para as variedades. ⁽³⁾Valor de F para as doses de P. ⁽⁴⁾Valor de F para a interação entre os tratamentos. ⁽⁵⁾Coefficiente de variação. **Significativo a 1% pelo teste F. ^{ns}Não significativo.

Índices de eficiência de variedades de milho cultivadas no campo, sob condição ideal de fornecimento de P

As mesmas variedades do ensaio anterior foram avaliadas em uma condição ótima de suprimento de P, estimando-se os diferentes índices de eficiência e comparando o desempenho delas nos dois meios de cultivo – solução nutritiva e solo.

Quanto à produção de matéria seca pelas partes da planta, observou-se que as variedades produziram quantidade semelhante de palha. A variação foi maior para a produção de sabugos e de grãos, na qual se diferenciaram os materiais ([Tabela 7](#)).

Tabela 7. Produção de palha, sabugos e grãos e índice de colheita (IC) de variedades de milho em condições de campo. Média de seis repetições¹.

| Variedades | Palha | Sabugos | Grãos | IC |
|-----------------------|---------------------|---------|--------------------|--------------------|
| | kg.ha ⁻¹ | | | |
| Caiano de Sobrália | 3721 | 1319A | 7527AB | 0,60ABC |
| Carioca | 3867 | 1204AB | 7590AB | 0,60ABC |
| Antigo Maya | 3746 | 1214AB | 7010BC | 0,58ABC |
| Catetão | 3719 | 919C | 5893C | 0,56C |
| Pedra Dourada | 3984 | 1339A | 7140BC | 0,57BC |
| Eldorado | 3437 | 1387A | 8463A | 0,64A |
| Sol da Manhã | 3525 | 1395A | 7807AB | 0,61ABC |
| BR 105 | 3214 | 1107B | 7567AB | 0,63AB |
| BR 106 | 3575 | 1292AB | 8480A | 0,64A |
| BR 107 | 3145 | 1276AB | 7450AB | 0,63AB |
| Médias | 3593 | 1245 | 7502 | 0,61 |
| Fv ⁽²⁾ | 1,51 ^{ns} | 5,73** | 3,15** | 2,92** |
| Fl ⁽²⁾ | 0,28 ^{ns} | 7,69** | 2,53* | 1,00 ^{ns} |
| Fm ⁽²⁾ | 0,75 ^{ns} | 3,74* | 1,46 ^{ns} | 0,27 ^{ns} |
| Fg ⁽²⁾ | 9,44** | 5,88** | 12,39** | 14,27** |
| CV (%) ⁽³⁾ | 15,01 | 11,87 | 13,25 | 6,91 |

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5%.

⁽²⁾Valor de F para as variedades (Fv), variedades locais (Fl), variedades melhoradas (Fm) e grupos (Fg).

⁽³⁾Coefficiente de variação. **Significativo a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F. ^{ns}Não significativo.

As variedades melhoradas BR 106 e Eldorado tiveram os maiores rendimentos. Entretanto, apenas as variedades locais Antigo Maya, Pedra Dourada e Catetão foram inferiores. As variedades locais Caiano e Carioca alcançaram valores de produção de grãos semelhantes aos das melhoradas Sol da Manhã, BR 105 e BR 107, enquanto Catetão foi a que produziu menos. Houve diferença estatística para a produção de grãos entre grupos de variedades locais e melhoradas e, em média, as variedades melhoradas produziram 7953 kg grãos.ha⁻¹ contra 7032 kg grãos.ha⁻¹ das locais.

As variedades locais produziram, em média, mais palha (3807 kg.ha⁻¹) que as melhoradas (3379 kg.ha⁻¹), porém, dentro dos grupos, as variedades não foram significativamente diferentes. Na produção de sabugos, destacou-se a variedade

local Catetão, bem rústica, com sabugos finos e compridos característicos de menor massa. A produção de sabugos das variedades locais foi significativamente menor que a das melhoradas ([Tabela 7](#)).

Eldorado e BR 106 diferenciaram-se da variedade local Catetão, respectivamente, com os maiores e o menor índice de colheita (produção de grãos/biomassa total). O crescimento vegetativo vigoroso é característico da variedade local Catetão. Observou-se que as variedades melhoradas apresentaram valores médios superiores aos das variedades locais, apesar das pequenas diferenças para o índice de colheita ([Tabela 7](#)). As variedades melhoradas foram, em média, mais produtivas que as locais, apresentaram maiores índices de colheita e os menores portes e produção de palha, indicando a prioridade dada ao rendimento de grãos em relação à produção de material vegetativo.

As condições de fertilidade do solo e de disponibilidade adequada de nutrientes e água no ambiente deste experimento maximizaram o potencial produtivo das variedades avaliadas que alcançaram excelentes níveis de produtividade, sendo que o rendimento das variedades locais foi comparável ao das melhoradas. Tal comportamento produtivo vem sendo verificado para essas variedades locais em várias regiões e em diferentes situações ambientais ([MACHADO et al., 1998a, 1998b](#)).

Houve diferenças quanto aos teores de P na palha, sabugo e grãos ([Tabela 8](#)). Nos grãos, Catetão e Eldorado apresentaram, respectivamente, a maior e menor concentração de P. Os sabugos apresentaram maiores concentrações de P em relação à palha, diferente do observado por [Clark \(1975b\)](#), quando os sabugos tiveram a menor concentração entre as partes da planta. Por sua vez, estão de acordo com o que foi verificado por [Gorsline et al. \(1965\)](#), quando a palha (colmo e folhas) apresentou concentração de P menor que a dos sabugos e dos grãos. Neste experimento, evidenciaram-se diferenças para o teor de P nos grãos entre e dentro dos grupos de variedades locais e melhoradas; as locais apresentaram, em média, teor superior ao das melhoradas.

As variedades não se diferenciaram significativamente quanto ao conteúdo de P na palha, nos grãos e sabugos ([Tabela 8](#)). A quantidade de P acumulada nos grãos por estas variedades é semelhante ao que se obteve para algumas delas quando cultivadas no mesmo solo e nível de P em estudo anterior ([MACHADO, 1995](#)), o que mais uma vez sugere o controle genético da acumulação de nutrientes e o efeito exercido pelas condições ambientais, sobretudo, de fertilidade do solo na quantidade acumulada.

Concentrações e conteúdos de P semelhantes nos grãos de milho de germoplasma tropical foram verificados por [Feil et al. \(1992\)](#), em cujo trabalho havia elevado teor de P disponível no solo, e o nível de adubação nitrogenada foi o mesmo empregado neste experimento. No estudo de [Feil et al. \(1992\)](#), os sabugos também apresentaram o menor conteúdo de P e, segundo [Gorsline et al. \(1965\)](#) e [CLARK \(1975b\)](#) a remobilização a partir deles, bem como a do colmo e palha da espiga, precede à das folhas.

Os resultados deste experimento evidenciaram, em função do conteúdo de P nas partes da planta, a intensa remobilização do P das partes vegetativas para os grãos que constituíram os principais órgãos de armazenamento do P ao final do ciclo. O enriquecimento em P das partes superiores das plantas, principalmente nos grãos, mostra o comportamento típico dos cereais na translocação de nutrientes do material vegetativo para os grãos ([GORSLINE et al., 1965](#); [CLARK, 1975b](#); [SCHULTHESS et al., 1997](#)).

Tabela 8. Teor e conteúdo de P na palha, sabugos e grãos de variedades de milho em condições de campo. Média de seis repetições⁽¹⁾.

| Variedades | Teores de P | | | Conteúdo de P | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------|---------|---------------------|--------------------|--------------------|
| | Palha | Sabugos | Grãos | Palha | Sabugos | Grãos |
| | g.kg ⁻¹ | | | kg.ha ⁻¹ | | |
| Caiano de Sobrália | 0,24 | 0,43 | 4,13CD | 0,96 | 0,57 | 31,07 |
| Carioca | 0,28 | 0,45 | 4,29BCD | 1,04 | 0,55 | 32,52 |
| Antigo Maya | 0,27 | 0,45 | 4,30BCD | 1,01 | 0,55 | 29,82 |
| Catetão | 0,21 | 0,38 | 5,35A | 0,80 | 0,34 | 31,96 |
| Pedra Dourada | 0,21 | 0,40 | 4,38BC | 0,86 | 0,55 | 31,27 |
| Eldorado | 0,22 | 0,49 | 3,70D | 0,75 | 0,68 | 31,35 |
| Sol da Manhã | 0,23 | 0,42 | 4,86AB | 0,82 | 0,59 | 37,91 |
| BR 105 | 0,23 | 0,41 | 3,98CD | 0,73 | 0,47 | 30,82 |
| BR 106 | 0,19 | 0,36 | 3,92CD | 0,69 | 0,47 | 33,24 |
| BR 107 | 0,24 | 0,39 | 4,47BC | 0,76 | 0,51 | 33,05 |
| Médias | 0,23 | 0,42 | 4,34 | 0,84 | 0,53 | 32,30 |
| Fv ⁽²⁾ | 0,54 ^{ns} | 0,66 ^{ns} | 6,63** | 0,61 ^{ns} | 1,77 ^{ns} | 1,01 ^{ns} |
| Fl ⁽²⁾ | 0,70 ^{ns} | 0,51 ^{ns} | 6,86** | 0,42 ^{ns} | 2,10 ^{ns} | 0,21 ^{ns} |
| Fm ⁽²⁾ | 0,30 ^{ns} | 0,92 ^{ns} | 6,39** | 0,09 ^{ns} | 1,82 ^{ns} | 1,58 ^{ns} |
| Fg ⁽²⁾ | 0,50 ^{ns} | 0,08 ^{ns} | 6,59* | 3,42 ^{ns} | 0,36 ^{ns} | 1,92 ^{ns} |
| CV (%) ⁽³⁾ | 37,38 | 26,98 | 10,53 | 45,94 | 31,97 | 16,88 |

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5%.

⁽²⁾Valor de F para as variedades de milho (Fv), variedades locais (Fl), variedades melhoradas (Fm) e para os grupos (Fg). ⁽³⁾Coeficiente de variação. *, **: Significativo a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.

^{ns}Não significativo.

As diferentes fases da ontogenia vegetal estão relacionadas a exigências ou demandas diferenciadas em P ([BLAIR, 1993](#)). O P absorvido depois da polinização é necessário para a síntese de carboidratos que irão assegurar o potencial de rendimento das plantas, sendo ambos transportados para os grãos ([JONES et al., 1992](#)). Além do envolvimento no metabolismo do carbono, o P está ligado ao metabolismo dos lipídeos e das proteínas ([MARSCHNER, 1995](#)) que são armazenados nos grãos, e a falta do nutriente provoca a formação de espigas defeituosas, tortas e com falhas nas fileiras de grãos, bem como o processo de maturação é retardado e desuniforme. O fluxo de P entre as partes da planta depende da demanda dos órgãos que constituem os drenos e da capacidade de suprimento daqueles que representam as fontes. Mudanças nessa relação fonte/dreno, refletidas pelos conteúdos de P nas partes das plantas podem relacionar-se com a eficiência de absorção e utilização de P. Neste experimento, as variedades avaliadas não apresentaram diferenças quanto ao conteúdo de P nas partes, não permitindo a diferenciação delas pela força das fontes e dos drenos.

Os índices de eficiência das variedades de milho foram calculados com o objetivo de identificar a contribuição relativa dos vários processos de aquisição e distribuição do P na variação total da eficiência do uso de P ([Tabela 9](#)). Esses índices foram descritos por [Moll et al. \(1982\)](#) para caracterizar eficiência em N. Entretanto, vêm sendo aplicados, com bastante propriedade e sucesso na discriminação de eficiência em P em cereais ([JONES et al., 1992](#); [BATTEN, 1993](#); [BLAIR, 1993](#)).

O índice P_g/N_s mede o uso eficiente do fertilizante fosfatado. As variedades que atingiram os maiores valores para essa relação foram (em ordem decrescente): BR 106, Eldorado, Sol da Manhã, Carioca, BR 105 e Caiano. Comportamento semelhante foi observado em relação ao índice de colheita.

O índice N_p/N_s mede a eficiência de absorção do nutriente, relacionando o conteúdo dele na planta inteira (N_p) à quantidade fornecida pela adubação (N_s). Sob este aspecto, as variedades testadas não diferiram significativamente, sugerindo que a absorção pode não ter sido o fator determinante para diferenciá-las quanto à maior ou à menor eficiência a P.

A relação P_g/N_p , também denominada razão de eficiência em P ([JONES et al., 1992](#)), mede a produção de grãos (P_g) por unidade do nutriente contido na planta (N_p); Eldorado apresentou o maior valor para esse índice, indicando metabolismo mais eficiente na assimilação e na conversão do nutriente

absorvido, o que pode explicar a maior produtividade alcançada por esta variedade, seguida de BR 105 e Caiano. Os menores valores para esse índice foram de Sol da Manhã e Catetão.

A variedade Eldorado foi mais eficiente também quanto ao índice Pg/Ng, outro índice de eficiência na utilização, que relaciona os grãos produzidos (Pg) por unidade do nutriente nos grãos (Ng).

Por último, o índice Ng/Np ou índice de colheita de P ([JONES et al., 1992](#)) descreve a fração total do nutriente na planta (Np) que é transportada para o grão (Ng). Não houve, para este índice, diferença entre os materiais que translocaram uniformemente quase todo o P absorvido para os grãos.

Foram verificados contrastes estatísticos entre e dentro de grupos de variedades locais e melhoradas para os índices Pg/Ns (entre locais e melhoradas), Pg/Np e Pg/Ng (entre e dentro dos grupos de locais e melhoradas). As variedades melhoradas foram significativamente mais eficientes no uso (Pg/Ns) e na utilização (Pg/Np e Pg/Ng) que as variedades locais. Dentro dos grupos, para a razão de eficiência Pg/Np, Caiano foi a variedade superior entre as locais, enquanto Eldorado, BR 105 e BR 106 foram as superiores entre as melhoradas. Para o índice de eficiência de utilização Pg/Ng, Carioca e Caiano destacaram-se entre as variedades locais e, da mesma forma que para o índice anterior, Eldorado, BR 105 e BR 106 foram as superiores entre as melhoradas.

Estudando as correlações entre os índices de eficiência e as demais variáveis obtidas para as variedades, verificou-se que a produção de grãos, o índice de colheita, o teor e o conteúdo de P dos grãos foram as variáveis determinantes dos índices de eficiência em P para as condições de disponibilidade do nutriente deste experimento. A produção de grãos apresentou correlação positiva e altamente significativa com a eficiência de uso do fertilizante fosfatado (índice Pg/Ns), sendo para todas as variedades o coeficiente de correlação (r) entre estes parâmetros igual a 1,00**. Correlações altamente significativas entre produção e eficiência de absorção (índice Np/Ns) foram observadas para Caiano ($r = 0,97^{**}$), Antigo Maya ($r = 0,98^{**}$) e BR 105 ($r = 0,95^{**}$). O índice de colheita também se relacionou de forma positiva com a eficiência de uso das variedades Caiano ($r = 0,83^*$), BR 105 ($r = 0,81^*$), Eldorado ($r = 0,87^*$), Carioca ($r = 0,95^{**}$), Antigo Maya ($r = 0,99^{**}$) e Catetão ($r = 0,91^{**}$).

Tabela 9. Índices de eficiência em P de variedades de milho. Média de seis repetições.

| Variedades | Pg/Ns (kg grãos/kg P aplicado) | Np/Ns (kg P planta/kg P aplicado) | Pg/Np (kg grãos/kg P planta) | Pg/Ng (kg grãos/kg P grãos) | Ng/Np (kg P grãos/kg P planta) |
|-----------------------|--------------------------------------|--|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Caiano | 171,06AB | 0,74 | 231,30ABC | 243,07ABC | 0,96 |
| Carioca | 172,50AB | 0,78 | 224,99BC | 236,23ABC | 0,95 |
| Antigo Maya | 159,32BC | 0,71 | 221,73BC | 233,59 BC | 0,96 |
| Catetão | 135,99C | 0,75 | 181,33D | 187,93D | 0,97 |
| P. Dourada | 162,27BC | 0,74 | 220,58BC | 230,43BC | 0,96 |
| Eldorado | 192,35A | 0,75 | 260,99A | 272,95A | 0,96 |
| Sol da Manhã | 177,42AB | 0,89 | 199,34CD | 206,89CD | 0,96 |
| BR 105 | 171,97AB | 0,73 | 249,53AB | 260,78AB | 0,96 |
| BR 106 | 192,73A | 0,78 | 247,32AB | 255,92AB | 0,97 |
| BR 107 | 169,32AB | 0,78 | 217,72BC | 226,18BC | 0,96 |
| Fv ⁽²⁾ | 3,15** | 0,99 ^{ns} | 4,84** | 4,59** | 1,05 ^{ns} |
| Fl ⁽²⁾ | 2,53 ^{ns} | 0,21 ^{ns} | 3,37* | 3,48* | 0,63 ^{ns} |
| Fm ⁽²⁾ | 1,46 ^{ns} | 1,67 ^{ns} | 5,59** | 5,34** | 0,63 ^{ns} |
| Fg ⁽²⁾ | 12,39** | 1,67 ^{ns} | 7,73** | 6,05* | 0,001 ^{ns} |
| CV (%) ⁽³⁾ | 13,25 | 16,20 | 11,73 | 12,24 | 1,51 |

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5%.

⁽²⁾Valor de F para as variedades de milho (Fv), variedades locais (Fl), variedades melhoradas (Fm) e para os grupos (Fg). ⁽³⁾Coefficiente de variação. *, **: Significativo a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.

^{ns}Não significativo.

Todas as variedades apresentaram correlação inversa altamente significativa entre o teor de P nos grãos e os índices de eficiência de utilização de P (Pg/Np e Pg/Ng). Também, em todas as variedades, observou-se correlação altamente significativa, porém positiva, entre o conteúdo de P dos grãos e o índice de eficiência de absorção Np/Ns ($r = 0,99^{**}$ para Caiano e $1,00^{**}$ para as demais). Em Pedra Dourada, Eldorado, BR 105 e BR 106 o conteúdo de P dos grãos se relacionou inversamente, porém de forma significativa, com os índices de eficiência de utilização Pg/Np e Pg/Ng. Os valores variaram de $-0,85^*$ a $-0,98^{**}$. A correlação entre conteúdo de P dos grãos e Pg/Ns (eficiência de uso do fertilizante aplicado) foi positiva e altamente significativa para Caiano ($r = 0,96^{**}$), Antigo Maya ($r = 0,98^{**}$) e BR 105 ($r = 0,95^{**}$).

Os índices forneceram medidas estáticas da eficiência em P, por não terem sido utilizados diferentes níveis de fertilização fosfatada ou realizadas amostragens em

diferentes estágios do desenvolvimento da planta, dada a importância da demanda pelo nutriente em função do estágio ontogenético. Apesar disso, sugeriram que a capacidade de obter o P do solo ou a de translocá-lo para os grãos pode não ter sido o que determinou a eficiência no uso do fertilizante fosfatado e sim os mecanismos que conferem utilização mais eficiente do P para a produção de grãos. Esses índices foram úteis também na caracterização das variedades, sobretudo, os índices Pg/Np e Pg/Ng que sugeriram que o fator determinante das diferenças encontradas está relacionado com as atividades metabólicas delas.

Deve-se considerar, entretanto, que a avaliação das variedades em experimento de campo, no qual se aplicou a dose recomendada, reduz a possibilidade de encontrar diferenças decorrentes de outros fatores que não os de utilização do P, já que a aquisição não foi limitada pela disponibilidade do nutriente. No experimento em solução nutritiva, em que as doses de P eram mais limitantes, embora a produção de massa tenha sido o principal determinante da eficiência na utilização de P, observaram-se variações consideráveis na absorção e transporte do P para a parte aérea pelas variedades (Tabela 5). Isso foi particularmente evidente na concentração de 2 mg.L^{-1} de P, em que as plantas apresentaram sintomas visuais de deficiência de P, como a coloração arroxeadada e a senescência de folhas inferiores. É conhecido, na literatura, que as variações na absorção e no transporte de P são menos marcantes quando o P está em níveis mais abundantes ([LOUGHMAN et al., 1983](#)).

Concentrações de P muito baixas ou muito altas em solução nutritiva podem inibir o crescimento radicular de milho e do sorgo. Algumas espécies vegetais toleram mais P na solução nutritiva que outras; experiências com milho e com sorgo indicam que a maior parte das soluções nutritivas contém quantidades excessivas de P, incluindo aqui a de Hoagland (31 mg.L^{-1} de P) ([CLARK, 1982](#)). Para estudos de eficiência em P, no milho, em condições de estresse, alguns autores têm utilizado concentrações de 5 a $100 \text{ } \mu\text{mol.L}^{-1}$ ([GILL et al., 1992](#); [ALVES et al., 1998](#)). Deve-se considerar, contudo, o sistema em que o experimento é realizado, o tamanho do recipiente, o volume de solução disponível para cada planta (número de plantas por recipiente) e os materiais genéticos com os quais se está trabalhando (variedades, híbridos ou linhagens), que podem ter diferentes demandas ou exigências nutricionais.

[Furlani e Furlani \(1988\)](#), ao definirem a técnica para seleção de plantas de arroz, milho ou sorgo em solução nutritiva, em experimentos de curta duração (20 a 30 dias), sugeriram que, nessa situação, para se obter o estresse de P, a concentração

na solução nutritiva deveria estar entre 2 e 4 mg.L⁻¹ de P (ou 64 a 130 µmol.L⁻¹) para recipientes de 3 L e sem renovação da solução, a fim de detectar diferenças entre os genótipos quanto à eficiência na absorção e utilização de P. Esses autores têm utilizado concentrações de P próximas a esses limites para avaliação e diferenciação de genótipos de milho, arroz e sorgo em estudos de eficiência na absorção e na utilização do nutriente e herança de caracteres relacionados à eficiência ao P ([FURLANI et al., 1985, 1987, 1998](#); [CIARELLI et al., 1998](#)).

As variedades que acumularam maior massa na parte aérea em solução nutritiva ([Tabela 4](#)) Eldorado e BR 106 foram as mesmas que no campo atingiram as maiores produções de grãos ([Tabela 7](#)). A variedade Carioca revelou-se o pior material em solução nutritiva; porém, classificou-se entre as mais produtivas no campo. Catetão, a menos produtiva no campo, teve desempenho inferior tanto na produção de matéria seca de parte aérea quanto de raízes em solução nutritiva. Eldorado, a segunda variedade mais produtiva, foi considerada a mais eficiente no ensaio de campo num suprimento adequado de P ([Tabela 9](#)), dentro dos critérios de eficiência em utilização empregados, confirmando a tendência apresentada em solução nutritiva.

Os resultados para Catetão, BR 105, BR 106, BR 107, Antigo Maya e Sol da Manhã também são comparáveis entre os experimentos no campo e em casa de vegetação. Para as variedades locais Caiano e Carioca, o desempenho foi bastante diferentes nas duas condições.

Determinação de parâmetros cinéticos de absorção de P de variedades de milho

Dando continuidade aos experimentos anteriores, em que foram verificadas diferenças quanto à eficiência de utilização e resposta ao P entre as variedades, identificando-se fontes genéticas para os parâmetros avaliados e variabilidade entre as raças de origem dos genótipos testados, os experimentos subseqüentes (determinação de parâmetros cinéticos e atividade de fosfatase) constituem estudos mais detalhados. Ambos os ensaios (experimentos 4 e 5) objetivaram o conhecimento de mecanismos responsáveis por essas diferenças, bem como a contribuição relativa deles nos processos envolvidos com a eficiência em P, a fim de que as características favoráveis dos genótipos de milho fossem identificadas e aproveitadas, posteriormente, tanto em programas de seleção e melhoramento quanto nos próprios sistemas de cultivo desses materiais.

No presente estudo, determinaram-se os parâmetros cinéticos e as dimensões radiculares das seis variedades de milho, apresentados na [Tabela 10](#). Foram observadas diferenças entre as variedades para V_{max} , K_m e para o comprimento de raízes.

As variedades Sol da Manhã e BR 106 apresentaram, respectivamente, a maior e a menor velocidade máxima (V_{max}) de absorção de P. As demais obtiveram valores de V_{max} intermediários, não tendo diferido estatisticamente entre si. Os valores de V_{max} obtidos para as variedades deste estudo foram próximos aos observados por [Ciarelli et al. \(1998\)](#) para híbridos de milho crescidos em solução nutritiva em condições semelhantes às deste ensaio, inclusive, quanto ao fornecimento de P.

A variedade BR 106 apresentou o menor valor para a constante de Michaelis-Menten (K_m), seguida de Eldorado e Caiano ([Tabela 10](#)). O grupo das variedades melhoradas apresentou, na média, K_m menor ($29,38 \mu\text{mol L}^{-1}$) que o das variedades locais ($37,92 \mu\text{mol L}^{-1}$). Para V_{max} e C_{min} não se observou contraste estatístico significativo entre os grupos de variedades locais e melhoradas. Dentro dos grupos, variações foram obtidas para V_{max} e K_m somente entre as variedades melhoradas, evidenciado pelo comportamento contrastante de Sol da Manhã e BR 106 ([Tabela 10](#)).

Para a concentração mínima (C_{min}), abaixo da qual as raízes não mais retiram o P da solução, foi verificada grande desuniformidade entre as repetições, o que resultou em coeficiente de variação elevado, não havendo diferença entre as variedades ([Tabela 10](#)).

Para as características morfológicas do sistema radicular, as variedades diferiram apenas no comprimento das raízes. Eldorado foi a variedade que apresentou o sistema radicular mais extenso, diferenciando-se da variedade local Carioca e da melhorada Sol da Manhã, com menores comprimentos de raízes. As variedades melhoradas apresentaram comprimento de raízes maior que as locais (médias de 139 m para as melhoradas e 127 m para as locais). Não houve diferença entre os grupos de locais e melhoradas quanto à área do sistema radicular e ao raio médio. Dentro dos grupos, apenas entre as variedades melhoradas foi observada variação na área do sistema radicular, em que contrastaram Eldorado, com a maior área, e Sol da Manhã com a menor área de sistema radicular ([Tabela 10](#)).

Tabela 10. Parâmetros cinéticos de absorção de P e características morfológicas do sistema radicular de variedades de milho cultivadas até 24 dias de idade em solução nutritiva. Vasos com três plantas. Média de cinco repetições¹.

| Variedades | Vmax $\mu\text{mol.g}^{-1}\text{h}^{-1}$ | Km $\mu\text{mol.L}^{-1}$ | Cmin $\mu\text{mol.L}^{-1}$ | Área cm^2 | Comprimento m | Raio médio mm |
|-----------------------|---|------------------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| Caiano | 41,93bc | 33,66ab | 6,02 | 831 | 133abc | 0,10 |
| Carioca | 50,48ab | 38,64a | 2,26 | 715 | 117bc | 0,10 |
| Catetão | 47,47abc | 41,47a | 2,14 | 805 | 132abc | 0,10 |
| Sol da Manhã | 56,55a | 40,77a | 2,47 | 681 | 106c | 0,10 |
| Eldorado | 39,82bc | 26,88ab | 1,97 | 978 | 160a | 0,10 |
| BR 106 | 37,40c | 20,49b | 1,52 | 900 | 151ab | 0,10 |
| Fv ⁽²⁾ | 4,06* | 2,77* | 1,09 ^{ns} | 1,99 ^{ns} | 2,86* | 1,37 ^{ns} |
| Fl ⁽²⁾ | 1,46 ^{ns} | 0,61 ^{ns} | 1,96 ^{ns} | 0,59 ^{ns} | 0,01 ^{ns} | 1,00 ^{ns} |
| Fm ⁽²⁾ | 8,45** | 4,19* | 0,09 ^{ns} | 3,80* | 0,06 ^{ns} | 1,00 ^{ns} |
| Fg ⁽²⁾ | 0,48 ^{ns} | 4,27* | 1,34 ^{ns} | 1,18 ^{ns} | 14,19** | 1,00 ^{ns} |
| CV (%) ⁽³⁾ | 17,59 | 33,66 | 128,93 | 21,56 | 19,83 | 4,92 |

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas na coluna, não diferem a 5%, pelo teste de Duncan. ⁽²⁾Valor de F para as variedades (Fv), para as variedades locais (Fl), para as variedades melhoradas (Fm) e para os grupos (Fg). ⁽³⁾Coefficiente de variação. **Significativo a 1% pelo teste F. *Significativo a 5% pelo teste F. ^{ns}Não significativo. Vmax (velocidade máxima de absorção de P), Km (constante de Michaelis-Menten) e Cmin (concentração mínima). Valores de Vmax expressos por unidade de massa seca de raiz.

Os dados relativos à produção de matéria seca e de acumulação e eficiência na utilização de P são apresentados na [Tabela 11](#). Diferenças significativas entre as variedades foram observadas para a produção e partição da matéria seca e, também, quanto ao índice de eficiência na utilização de P.

BR 106 e Sol da Manhã apresentaram, respectivamente, a maior e a menor massa de parte aérea e raízes. Variedades locais e melhoradas produziram, em média, quantidades semelhantes de matéria seca de parte aérea e de raízes, não sendo observadas diferenças entre os grupos para esses parâmetros nem para a produção total de matéria seca e relação raiz/parte aérea. As diferenças dentro dos grupos ocorreram apenas entre as variedades melhoradas, evidenciadas pelo contraste apresentado por BR 106 e Sol da Manhã para essas características relacionadas à produção e à partição da matéria seca ([Tabela 11](#)). Esses resultados foram semelhantes aos obtidos anteriormente com as mesmas variedades.

A relação de massa radicular/massa de parte aérea é uma das características que descrevem a morfologia do sistema radicular ([SCHENK; BARBER, 1979](#)). A maior relação raiz/parte aérea é considerada como sinal da sensibilidade das plantas à deficiência em P. Valores mais elevados para essa relação têm sido observados em diversos genótipos de diferentes espécies vegetais crescidos em condições de deficiência de P quando comparadas a situações de suprimento satisfatório do nutriente ([FÖHSE et al., 1988](#); [FAGERIA; BALIGAR, 1989](#); [GILL et al., 1992](#)). As variedades de milho, utilizadas no presente estudo, também têm apresentado esse comportamento que pode ser atribuído à inibição do crescimento da planta e do aumento relativo no sistema radicular em condições de deficiência em P, já que a redução no desenvolvimento da parte aérea acontece antes da diminuição no crescimento das raízes. É, em parte, uma resposta fenotípica à menor disponibilidade do nutriente, constituindo uma forma de adaptação que pode proporcionar incrementos na eficiência de absorção ([FÖHSE et al., 1988](#)). Neste ensaio, no entanto, as maiores relações raiz/parte aérea das variedades BR 106, Caiano e Eldorado podem não significar que elas tenham sido mais sensíveis que as demais à concentração de P da solução nutritiva, uma vez que elas também apresentaram maior desenvolvimento da parte aérea, além de terem sido superiores na produção de raízes. Situação inversa é observada para Sol da Manhã, Carioca e Catetão ([Tabela 11](#)). Esses resultados corroboraram aqueles obtidos anteriormente, quando a variedade Eldorado foi submetida a concentrações crescentes de P e apresentou relação raiz/parte aérea significativamente inferior e produção de matéria seca bastante superior às demais variedades avaliadas, entre as quais se incluíam BR 106 e Caiano.

Não houve diferença entre as variedades para o conteúdo de P da parte aérea, raízes e na planta inteira, bem como para a partição do P absorvido, indicando que as plantas possuíam estado nutricional semelhante em relação ao P nas condições deste experimento (Tabela 11).

Foram verificadas diferenças entre as variedades nos índices de eficiência na utilização de P, e a variação deles acompanhou a da produção de matéria seca. BR 106, Eldorado e Caiano foram as variedades que utilizaram mais eficientemente o P absorvido. O menor índice foi observado para a variedade Sol da Manhã (Tabela 11). Esses resultados confirmaram aqueles obtidos para Eldorado e BR 106, quando as plantas foram cultivadas em três concentrações de P em solução nutritiva, e apresentaram índices de eficiência superiores aos das demais variedades. No presente experimento, não houve contraste estatístico significativo para esse parâmetro entre os grupos, e as variedades locais foram tão eficientes quanto as melhoradas. As variedades locais também não diferiram entre si e, entre as melhoradas, a variação mais evidente ocorreu entre BR 106 e Sol da Manhã (Tabela 11).

Tabela 11. Produção de matéria seca e razão raiz/parte aérea (R/PA) de matéria seca; conteúdo de P e relação parte aérea/raiz (PA/R) do conteúdo de P; e índice de eficiência na utilização (IEU) de P de variedades de milho com 24 dias de idade, em solução nutritiva. Vasos com três plantas. Média de cinco repetições¹.

| Variedades | Matéria seca | | | Conteúdo de P | | | IEU de P |
|-----------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|
| | Parte aérea | Raízes | R/PA | Parte aérea | Raízes | PA/R | |
| | g.vaso ¹ | | | mg.vaso ¹ | | | .. g ² .mg ¹ .. |
| Caiano de Sobrália | 4,22ab | 1,64ab | 0,39ab | 18,34 | 1,24 | 18,09 | 1,81ab |
| Carioca | 4,07b | 1,35bc | 0,33c | 19,40 | 0,87 | 24,50 | 1,47bc |
| Catetão | 4,20ab | 1,47b | 0,35bc | 19,83 | 0,80 | 25,06 | 1,59b |
| Sol da Manhã | 3,39c | 1,10c | 0,32c | 18,81 | 0,90 | 22,12 | 1,03c |
| Eldorado | 4,43ab | 1,63ab | 0,37abc | 18,78 | 0,93 | 20,51 | 1,90ab |
| BR 106 | 4,63a | 1,87a | 0,40a | 19,02 | 1,03 | 18,97 | 2,14a |
| Fv ⁽²⁾ | 6,83** | 6,62** | 3,40* | 0,36 ^{ns} | 1,35 ^{ns} | 1,40 ^{ns} | 5,37** |
| Fl ⁽²⁾ | 0,25 ^{ns} | 2,06 ^{ns} | 3,67* | 0,78 ^{ns} | 3,12 ^{ns} | 2,56 ^{ns} | 1,10 ^{ns} |
| Fm ⁽²⁾ | 16,83** | 14,50** | 8,00** | 0,02 ^{ns} | 0,23 ^{ns} | 0,42 ^{ns} | 12,17** |
| Fg ⁽²⁾ | 0,002 ^{ns} | 0,29 ^{ns} | 0,26 ^{ns} | 0,001 ^{ns} | 0,01 ^{ns} | 1,05 ^{ns} | 0,26 ^{ns} |
| CV (%) ⁽³⁾ | 8,78 | 15,32 | 10,30 | 10,24 | 31,15 | 25,12 | 22,57 |

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a nível de 5%.

⁽²⁾Valor de F para as variedades de milho (Fv), variedades locais (Fl), variedades melhoradas (Fm) e para os grupos (Fg). ⁽³⁾Coefficiente de variação. *, **: Significativo a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F.

^{ns}Não significativo.

Os coeficientes de correlação entre os parâmetros cinéticos V_{max} , K_m e C_{min} e as demais características avaliadas são apresentadas na [Tabela 12](#). BR 106 apresentou correlação negativa entre V_{max} e K_m , confirmando que, para esta variedade, pode haver adaptação da cinética de absorção determinada pela disponibilidade de P do meio. [Schenk e Barber \(1979\)](#) verificaram correlação positiva de V_{max} com K_m e C_{min} para cinco genótipos de milho que apresentaram variações nos parâmetros morfológicos e fisiológicos das raízes. Neste caso, os genótipos apresentaram combinações de elevados V_{max} , K_m e C_{min} e se comportaram como superiores em condições de alta disponibilidade de P ou apresentaram combinações de baixos V_{max} , K_m e C_{min} e foram eficientes em condições de baixa disponibilidade, não combinando ambas as propriedades.

Carioca e Sol da Manhã apresentaram correlações positivas entre K_m e C_{min} , indicando que a menor afinidade dos sítios de absorção de P, representada pelo K_m elevado, está associada a concentrações mínimas também elevadas nessas variedades ([Tabela 12](#)). Para algumas variedades, observou-se correlação negativa entre K_m e a produção de matéria seca de parte aérea e total e o índice de eficiência de utilização de P ([Tabela 12](#)).

[Baligar e Barber \(1979\)](#), estudando uma série de genótipos de milho, observaram que aquele de maior V_{max} e K_m foi o que apresentou menores C_{min} e comprimento de raízes. As relações entre os parâmetros cinéticos de absorção de P e as características morfológicas de raízes não foram uniformes para todos os genótipos avaliados naquele trabalho, da mesma forma que para o presente experimento. Avaliando a morfologia das raízes e a cinética de absorção de P de quatro genótipos de milho (Save 342, Agrocerec 28, Pioneer Px301 e Caçador), [Anghinoni et al. \(1989\)](#) concluíram que a cultivar Caçador, por sua elevada V_{max} e baixa C_{min} , apresentava características favoráveis à absorção do P. Já a alta C_{min} observada para o híbrido Pioneer Px301 indicou sua ineficiência para a absorção desse nutriente quando em baixas concentrações na solução do solo. Entre os genótipos testados, Save 342 apresentou, por sua vez, tendência à formação de um sistema radicular mais restrito.

A variedade Sol da Manhã apresentou correlações positivas entre área e comprimento de sistema radicular e a produção de matéria seca e eficiência na utilização de P. Para 'Caiano', observou-se correlação positiva apenas entre o comprimento de raízes e a produção de matéria seca e eficiência na utilização de P ([Tabela 13](#)).

Tabela 12. Coeficientes de correlação (r) entre os parâmetros cinéticos e os demais parâmetros avaliados para as variedades de milho com 24 dias de idade, em solução nutritiva. Vasos com três plantas. Média de cinco repetições.

| Variedades | | MSPA | MSRA | MST | R/PA | CPA | CPR | CPT | PA/R | EUP | ASR | CSR | RMR | Vmax | Km | Cmin |
|-------------|------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|-------------------|--------------------|--------|--------------------|--------|--------------------|-------|-------|--------------------|-------|
| Caiano | Vmax | 0,16 | 0,01 | 0,09 | -0,09 | -0,42 | -0,05 | -0,47 | 0,29 | 0,19 | 0,17 | 0,17 | -0,11 | - | -0,61 | 0,15 |
| | Km | -0,64 | -0,69 | -0,67 | -0,66 | 0,91* | -0,55 | 0,73 | 0,53 | -0,72 | -0,88* | -0,88* | 0,47 | -0,61 | - | -0,54 |
| | Cmin | 0,08 | 0,24 | 0,16 | 0,34 | -0,22 | 0,95** | 0,16 | -0,69 | 0,02 | 0,67 | 0,51 | 0,21 | 0,15 | -0,54 | - |
| Carioca | Vmax | 0,33 | -0,38 | 0,20 | -0,72 | 0,98** | -0,37 | 0,99** | 0,52 | -0,12 | -0,04 | -0,17 | 0,27 | - | -0,07 | -0,52 |
| | Km | -0,92* | -0,73 | -0,96** | 0,25 | -0,14 | 0,74 | -0,02 | -0,75 | -0,95** | -0,71 | -0,77 | -0,02 | -0,07 | - | 0,88* |
| | Cmin | -0,94** | -0,49 | -0,92* | 0,52 | -0,57 | 0,81 ⁺ | -0,47 | -0,90* | -0,78 ⁺ | -0,56 | -0,60 | -0,06 | -0,52 | 0,88* | - |
| Catetão | Vmax | -0,81 ⁺ | -0,99** | -0,91* | -0,71 | -0,21 | 0,47 | -0,20 | -0,41 | -0,60 | -0,65 | -0,76 | 0,02 | - | 0,63 | 0,51 |
| | Km | -0,84 ⁺ | -0,65 | -0,80 ⁺ | -0,75 | 0,06 | -0,37 | 0,05 | 0,18 | -0,69 | -0,16 | -0,26 | 0,18 | 0,63 | - | 0,15 |
| | Cmin | -0,17 | -0,49 | -0,29 | -0,69 | 0,08 | 0,58 | 0,10 | -0,20 | -0,29 | -0,75 | -0,81 ⁺ | -0,24 | 0,51 | 0,15 | - |
| S. Manhã NF | Vmax | -0,71 | -0,66 | -0,70 | -0,47 | 0,29 | -0,23 | 0,22 | 0,24 | -0,80 ⁺ | -0,75 | -0,72 | -0,41 | - | 0,09 | -0,07 |
| | Km | 0,09 | -0,18 | -0,02 | -0,34 | 0,34 | 0,16 | 0,33 | -0,10 | -0,15 | -0,16 | -0,25 | 0,75 | 0,09 | - | 0,86* |
| | Cmin | -0,15 | -0,42 | -0,26 | -0,62 | -0,06 | -0,28 | -0,11 | 0,28 | -0,29 | -0,35 | -0,43 | 0,74 | -0,07 | 0,86* | - |
| Eldorado | Vmax | 0,35 | -0,10 | 0,20 | -0,57 | -0,65 | 0,58 | -0,63 | -0,86* | 0,64 | 0,36 | 0,35 | 0,33 | - | -0,54 | -0,33 |
| | Km | -0,92* | -0,49 | -0,81 ⁺ | 0,22 | -0,21 | -0,68 | -0,24 | 0,31 | -0,45 | 0,45 | 0,47 | 0,50 | -0,54 | - | 0,76 |
| | Cmin | -0,68 | -0,37 | -0,60 | 0,17 | -0,19 | -0,11 | -0,20 | 0,00 | -0,29 | 0,21 | 0,20 | 0,33 | -0,33 | 0,76 | - |
| BR 106 | Vmax | 0,57 | 0,06 | 0,32 | -0,18 | -0,82 ⁺ | -0,03 | -0,82 ⁺ | -0,43 | 0,71 | -0,52 | -0,45 | -0,66 | - | -0,78 ⁺ | -0,45 |
| | Km | -0,93* | -0,61 | -0,81 ⁺ | -0,35 | 0,54 | -0,42 | 0,51 | 0,66 | -0,94** | 0,04 | -0,07 | 0,87* | -0,78 | - | 0,72 |
| | Cmin | -0,80 ⁺ | -0,82 ⁺ | -0,87* | -0,70 | 0,14 | -0,69 | 0,10 | 0,65 | -0,73 | 0,27 | 0,18 | 0,87* | -0,45 | 0,72 | - |

Vmax (velocidade máxima de absorção de P); Km (constante de Michaelis-Menten) e Cmin (concentração mínima); MSPA, MSR e MST: massa seca de parte aérea, raízes e total; CPA, CPR e CPT: conteúdo de P na parte aérea, raízes e total; PA/R: relação entre P na parte aérea e raízes; ASR, CSR e RMR: área, comprimento e raio radicular, EUP: eficiência na utilização de P.

+ , * , ** : significativo, respectivamente, a 10, 5 e 1% pelo teste T de Student. Os demais valores não foram significativos.

Tabela 13. Coeficientes de correlação (r) entre as características morfológicas do sistema radicular (área, comprimento e raio médio) e os demais parâmetros avaliados para as variedades de milho com 24 dias de idade, em solução nutritiva. Vasos com três plantas. Média de cinco repetições.

| Variedades | | MSPA ⁽¹⁾ | MSR | MST | R/PA | CPPA | CPR | CPT | PA/R | EUP |
|------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Caiano | ASR ⁽¹⁾ | 0,63 | 0,80 ⁺ | 0,72 | 0,83 ⁺ | -0,84 ⁺ | 0,79 ⁺ | -0,56 | -0,87 [*] | 0,70 |
| | CSR | 0,79 ⁺ | 0,91 [*] | 0,86 [*] | 0,92 [*] | -0,90 [*] | 0,64 | -0,68 | -0,78 ⁺ | 0,85 ⁺ |
| | RMR | -0,96 ^{**} | -0,87 [*] | -0,93 [*] | -0,79 ⁺ | 0,67 | 0,09 | 0,74 | 0,13 | -0,93 [*] |
| Carioca | ASR | 0,41 | 0,62 | 0,50 | 0,25 | -0,13 | -0,07 | -0,16 | 0,17 | 0,56 |
| | CSR | 0,50 | 0,90 [*] | 0,64 | 0,36 | -0,21 | -0,20 | -0,27 | 0,25 | 0,75 |
| | RMR | -0,09 | -0,44 | -0,18 | -0,20 | 0,16 | 0,23 | 0,22 | -0,12 | -0,28 |
| Catetão | ASR | 0,52 | 0,65 | 0,58 | 0,48 | -0,39 | -0,62 | -0,42 | 0,00 | 0,67 |
| | CSR | 0,56 | 0,75 | 0,65 | 0,61 | -0,25 | -0,65 | -0,27 | 0,13 | 0,65 |
| | RMR | 0,16 | 0,01 | 0,11 | -0,21 | -0,82 ⁺ | -0,23 | -0,83 ⁺ | -0,50 | 0,52 |
| S. Manhã | ASR | 0,96 ^{**} | 0,97 ^{**} | 0,98 ^{**} | 0,89 [*] | 0,23 | 0,76 | 0,35 | -0,68 | 0,96 ^{**} |
| | CSR | 0,93 ⁺ | 0,97 ^{**} | 0,96 ^{**} | 0,90 [*] | 0,24 | 0,73 | 0,35 | 0,65 | 0,95 ^{**} |
| | RMR | 0,39 | 0,19 | 0,31 | 0,02 | -0,19 | 0,26 | -0,12 | -0,37 | 0,32 |
| Eldorado | ASR | -0,43 | -0,24 | -0,38 | 0,03 | -0,92 [*] | -0,18 | -0,93 [*] | -0,55 | 0,44 |
| | CSR | -0,45 | -0,26 | -0,40 | 0,01 | -0,91 [*] | -0,21 | -0,93 [*] | -0,52 | 0,41 |
| | RMR | -0,44 | -0,21 | -0,38 | 0,09 | -0,93 [*] | -0,11 | -0,94 [*] | -0,58 | 0,46 |
| BR 106 | ASR | 0,05 | 0,32 | 0,20 | 0,36 | 0,30 | 0,31 | 0,33 | -0,10 | 0,02 |
| | CSR | 0,17 | 0,40 | 0,31 | 0,41 | 0,29 | 0,36 | 0,31 | -0,15 | 0,11 |
| | RMR | -0,94 ^{**} | -0,62 | -0,82 | -0,37 | 0,20 | -0,34 | 0,18 | 0,42 | -0,73 |

⁽¹⁾MSPA, MSR e MST: matéria seca de parte aérea, raízes e total; R/PA: relação raiz/parte aérea; ASR, CSR e RMR: área, comprimento e raio médio das raízes; CPPA, CPR e CPT: conteúdo de P da parte aérea, raízes e total; PA/R: relação entre o conteúdo de P na parte aérea e raízes; EUP: índice de eficiência na utilização de P.

⁺, ^{*}, ^{**}: significativo, respectivamente a 10, 5 e 1% pelo teste T de Student. Os demais valores de "r" não foram significativos.

Alguns autores sugerem que as plantas devam possuir um Vmax elevado a fim de absorver o nutriente eficientemente quando este se encontra em concentrações elevadas e valores baixos para Km e Cmin para que sejam capazes de recuperar o nutriente de soluções diluídas, como é o caso de solos pouco férteis (SCHENK; BARBER, 1979, 1980). Sistema radicular extenso é

também uma característica desejável em genótipos selecionados para a eficiência de absorção de P ([NIELSEN; BARBER, 1978](#); [SCHENK; BARBER, 1979](#)).

Neste trabalho, as variedades Eldorado e BR 106 estão entre as que apresentaram os menores valores para V_{max} e K_m , além de sistemas radiculares mais extensos tanto em comprimento como em área, características de plantas adaptadas à baixa disponibilidade de P, corroborando os resultados de [Chapin III \(1980, 1983\)](#) e de [Furlani \(1988\)](#) que postulam que a menor velocidade de absorção, descrita por valores mais baixos de V_{max} , pode ser uma característica de plantas adaptadas a solos de baixa fertilidade. A variedade Sol da Manhã, entretanto, apresentou menor comprimento em área de raízes e elevados valores de K_m e V_{max} , sugerindo que possa ser eficiente na aquisição do nutriente em condições de adequada e/ou elevada disponibilidade de P. Uma vez que o conteúdo de P não foi diferente entre as variedades nesse experimento ([Tabela 11](#)), entende-se que a quantidade absorvida foi semelhante e, portanto, para a variedade Sol da Manhã o maior valor de V_{max} pode ter compensado o menor sistema radicular e o alto valor de K_m (significando sítios de absorção com menor afinidade pelo P).

Em estudos anteriores, a variedade Sol da Manhã, quando cultivada em solução nutritiva em concentrações crescentes de P, esteve entre as que absorveram menos P, produziu menor quantidade de matéria seca e apresentou menor índice de eficiência na utilização de P na menor dose do nutriente aplicada à solução. Essa variedade respondeu às maiores doses de P incrementando esses parâmetros, o que confirma a hipótese de que seja eficiente na aquisição de P quando não há limitação do nutriente no meio externo. No campo, quando cultivada na dose recomendada de adubo fosfatado, Sol da Manhã apresentou o maior índice de eficiência de absorção de P calculado pela razão entre P da planta (parte aérea e grãos) e P aplicado como fertilizante, entre todas as variedades usadas neste trabalho. Em outro estudo, Sol da Manhã foi a variedade de menor produção de grãos quando submetida à ausência de adubação fosfatada entre sete genótipos avaliados, entre os quais Caiano, Catetão e Carioca. Entretanto, apresentou incrementos relativos significativos quando as doses de P aplicadas aumentaram desde 8,7 a 140 kg.ha⁻¹ de P ([MACHADO et al., 1999](#)).

BR 106 e Eldorado apresentaram comportamento inverso ao de Sol da Manhã, quando cultivadas em doses crescentes de P na solução nutritiva: produziram maior quantidade de matéria seca, absorveram mais P e obtiveram os maiores

Índices de eficiência na utilização na concentração mais baixa de P utilizada, respondendo também ao aumento na disponibilidade do nutriente e se mostrando eficiente tanto em condições de deficiência quanto de suficiência de P. Os índices de absorção de P dessas variedades, quando cultivadas no campo, na dose de adubo fosfatado recomendada, foram inferiores ao de Sol da Manhã, porém BR 106 e Eldorado foram superiores na utilização do P absorvido para produção, confirmando a hipótese de que essas variedades são adaptadas a condições de baixa disponibilidade de P.

Variações mais uniformes entre parâmetros cinéticos de absorção de P e os outros atributos relacionados à eficiência em P têm sido verificadas no milho e em outras espécies, porém, em materiais geneticamente mais estáveis, como linhagens e híbridos. Diferenças nos parâmetros de absorção de P refletiram na quantidade do nutriente absorvido em 12 genótipos de milho (híbridos e linhagens), bem como na produção de matéria seca e raízes destes ([NIELSEN; BARBER, 1978](#)). [Nielsen e Schjørring \(1983\)](#) também verificaram grande influência de características como comprimento de raízes, V_{max} , K_m e C_{min} na eficiência de absorção de P em vários genótipos de cevada e consideraram tais atributos como fundamentais para a obtenção de plantas mais adaptadas a baixas concentrações de P no solo. [Machado \(2000\)](#), trabalhando com famílias endogâmicas de milho, caracterizou duas subpopulações bastante distintas quanto aos parâmetros cinéticos de absorção de P e morfologia do sistema radicular, e essas características se relacionaram não só a produção de grãos desses genótipos, como também com a produção de matéria seca e eficiência na utilização de P em solução nutritiva.

Determinação da atividade de fosfatase ácida de raízes intactas de variedades de milho

As variedades de milho diferiram quanto às atividades da fosfatase ácida das raízes, e a maior atividade enzimática foi verificada para as variedades Catetão, Caiano, Sol da Manhã, Eldorado e BR 106 ([Tabela 14](#)). Carioca foi a variedade de menor atividade de fosfatase nas raízes. Não foram verificados contrastes estatísticos entre grupos de variedades locais e melhoradas ([Tabela 14](#)). A atividade enzimática média dos grupos foi praticamente idêntica (38,83 mg pNP g⁻¹ h⁻¹ para as locais e 38,73 mg pNP g⁻¹ h⁻¹ para as melhoradas). Entre as variedades melhoradas, não houve diferença para essa característica, porém, entre as locais, 'Carioca' se destacou pela menor atividade da enzima.

Tabela 14. Atividade da fosfatase ácida de raízes intactas de genótipos de milho em solução nutritiva. Vasos com três plantas. Média de seis repetições. Valores expressos por unidade de massa seca de raiz.

| Variedades | Atividades de fosfatase (mg pNP.g ⁻¹ .h ⁻¹) |
|----------------------|---|
| Caiano | 43,65a |
| Carioca | 28,34b |
| Catetão | 44,51a |
| Sol da Manhã | 41,87a |
| Eldorado | 38,42a |
| BR 106 | 35,90ab |
| Fv ⁽¹⁾ | 4,30** |
| Fl ⁽¹⁾ | 9,64** |
| Fm ⁽¹⁾ | 1,05 ^{ns} |
| Fg ⁽¹⁾ | 0,002 ^{ns} |
| CV(%) ⁽²⁾ | 18,45 |

Comparação de médias das variedades, representadas pelas letras minúsculas, feita pelo teste de Duncan a 5%. Comparação de médias das subpopulações, representadas pelas letras maiúsculas, feita pelo teste F. ⁽¹⁾Valor de F para as variedades (Fv), para as variedades locais (Fl), para as variedades melhoradas (Fm), para os grupos (Fg) e para as subpopulações (Fs). ⁽²⁾Coefficiente de variação. **Significativo a 1% pelo teste F. ^{ns}Não significativo.

Foram utilizadas plantas com 17 dias de idade e com apenas 10 dias em solução nutritiva. Embora a metodologia proposta por [Clark \(1975a\)](#) se destine à determinação da atividade da enzima em raízes intactas de plantas jovens, talvez o tempo tenha sido insuficiente para causar uma situação de estresse interno nas variedades na concentração de P de 4 mg L⁻¹ e permitir melhor distinção entre os materiais. Os valores de atividade enzimática de algumas variedades são semelhantes aos obtidos por [Clark \(1975a\)](#) em plantas de milho da mesma idade, porém, este autor observou que atividades da fosfatase ácida de raízes intactas são maiores em raízes com 21 dias de idade quando comparadas à atividade em raízes mais velhas ou mais novas. Assim, a dose de P em que as plantas foram cultivadas (4 mg L⁻¹) é a concentração intermediária entre as aplicadas nos estudos anteriores para plantas jovens, sendo considerada por [Clark \(1975a\)](#) como o limite de P a partir do qual o nutriente já seria estocado nos vacúolos, e a atividade da enzima decresceria drasticamente em plantas dessa faixa de idade, perdendo-se a oportunidade de detectar diferenças entre genótipos. Nessa dose, as variedades alcançaram maior massa de raízes e acima dela ainda houve resposta em produção de massa de parte aérea, o que indica que ainda havia uma condição de estresse do nutriente ([Figura 3](#)).



Figura 3. Plantas de milho em recipientes com o substrato para determinação da atividade enzimática.

Além da variabilidade genética, outros fatores existentes entre os genótipos e que os diferenciam quanto à produção de massa, eficiência na utilização de P e outras, podem ter sido, portanto, determinantes da diferença observada na magnitude da atividade da fosfatase das variedades. Entre esses fatores, podem-se considerar as temperaturas em que se realizaram as determinações das atividades. [Clark \(1975a\)](#) verificou que a atividade da fosfatase de raízes intactas aumenta com a temperatura até atingir equilíbrio entre 30 e 40 °C (faixa considerada ideal para a determinação). Esse autor observou que ocorre, posteriormente, maior atividade enzimática em 50 °C, porém, nessa temperatura, observou que as raízes apresentavam injúrias extensas que poderiam ter provocado a liberação da enzima dos compartimentos celulares.

Na produção de matéria seca da parte aérea e de raízes, destacaram-se as variedades melhoradas BR 106 e Sol da Manhã com massa superior e inferior, respectivamente, à das demais variedades testadas. Os grupos de variedades locais e melhoradas produziram quantidade semelhante de massa e não se diferenciaram na média de produção de matéria seca de parte aérea, raízes e total. Apenas dentro do grupo das melhoradas é que foram detectados contrastes estatísticos entre os genótipos, com a variedade BR 106 destacando-se como a mais produtiva tanto na matéria seca de parte aérea quanto de raízes e total ([Tabela 15](#)). Para a relação raiz/parte aérea, as variedades não apresentaram diferenças, nem mesmo entre ou dentro dos grupos de locais e melhoradas. Entretanto, as variedades que cresceram melhor e acumularam mais massa

(BR 106, Eldorado e Catetão) direcionaram ligeiramente mais massa para a parte aérea do que as demais.

Tabela 15. Produção de matéria seca e razão raiz/parte aérea (R/PA) de matéria seca; conteúdo de P e relação parte aérea/raiz (PA/R) do conteúdo de P; e índice de eficiência na utilização (IEU) de P de variedades de milho em solução nutritiva. Vasos com três plantas. Média de seis repetições¹.

| Variedades | Matéria seca | | | Conteúdo de P | | | IEU de P |
|-----------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|---|
| | Parte aérea | Raízes | R/PA | Parte aérea | Raízes | PA/R | |
| | g.vaso ⁻¹ | | |mg.vaso ⁻¹ | | | ... g ² .mg ⁻¹ |
| Caiano de Sobrália | 1,14bc | 0,36b | 0,37 | 6,62b | 0,46 | 16,19 | 0,32b |
| Carioca | 1,00bc | 0,32bc | 0,34 | 6,55b | 0,55 | 14,84 | 0,25bc |
| Catetão | 1,21b | 0,34bc | 0,29 | 7,83ab | 0,42 | 20,06 | 0,29b |
| Sol da Manhã | 0,80c | 0,28c | 0,36 | 7,09b | 0,34 | 21,27 | 0,16c |
| Eldorado | 1,28b | 0,36b | 0,28 | 7,77ab | 0,42 | 19,91 | 0,33b |
| BR 106 | 1,65a | 0,46a | 0,28 | 9,09a | 0,44 | 20,78 | 0,47a |
| Fv ⁽²⁾ | 5,62** | 5,71** | 1,41 ^{ns} | 3,50* | 1,35 ^{ns} | 1,23 ^{ns} | 6,71** |
| Fl ⁽²⁾ | 0,74 ^{ns} | 0,88 ^{ns} | 1,50 ^{ns} | 1,97 ^{ns} | 1,39 ^{ns} | 1,28 ^{ns} | 0,74 ^{ns} |
| Fm ⁽²⁾ | 12,49** | 12,25** | 1,50 ^{ns} | 2,47 ^{ns} | 0,84 ^{ns} | 0,08 ^{ns} | 16,38** |
| Fg ⁽²⁾ | 1,69 ^{ns} | 1,25 ^{ns} | 0,63 ^{ns} | 8,61** | 2,32 ^{ns} | 3,42 ^{ns} | 0,89 ^{ns} |
| CV (%) ⁽³⁾ | 25,17 | 17,49 | 27,20 | 16,68 | 31,47 | 31,20 | 31,88 |

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5%. ⁽²⁾Valor de F para as variedades de milho (Fv), variedades locais (Fl), variedades melhoradas (Fm) e para os grupos (Fg). ⁽³⁾Coefficiente de variação. *, **: Significativo a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F. ^{ns}Não significativo.

Os valores de P acumulado nas partes da planta foram diferentes entre as variedades para a parte aérea (Tabela 15). As variedades que mais acumularam P na parte aérea e na planta inteira (dados não apresentados) foram BR 106, Catetão e Eldorado. As variedades melhoradas acumularam, em média, mais P na parte aérea e na planta inteira que as locais, semelhante ao observado no estudo anterior com doses crescentes de P em solução nutritiva. As variedades, dentro de seus respectivos grupos, não diferiram para o conteúdo de P da parte aérea e das raízes; houve separação apenas entre as melhoradas para o conteúdo total de P e Sol da Manhã e BR 106 se distinguiram, respectivamente, pelo menor e maior valor. Não foram verificadas diferenças entre e dentro dos grupos de variedades locais e melhoradas para a relação entre o conteúdo de P da parte aérea e nas raízes (Tabela 15).

Quanto aos índices de eficiência na utilização de P das variedades de milho, a variedade BR 106 foi a que mais eficientemente utilizou o P absorvido, tendo

sido significativamente superior às demais. Seguiram a esta, Eldorado, Caiano, Catetão, Carioca e Sol da Manhã ([Tabela 15](#)). Não houve diferença nos índices de eficiência na utilização de P entre as variedades locais e as melhoradas no presente ensaio, provavelmente devido ao curto espaço de tempo em que as plantas permaneceram nos tratamentos, o que ficou evidente também para as demais características avaliadas. Dentro dos grupos, apenas as melhoradas se diferenciaram e BR 106 e Sol da Manhã foram, respectivamente, as variedades mais e menos eficientes na utilização de P. Em experimento anterior, quando foram avaliadas com 25 dias de idade, as melhoradas foram superiores às locais.

Os coeficientes de correlação simples (r) calculados entre a atividade de fosfatase ácida das raízes e as demais características avaliadas para as variedades de milho não mostraram relação clara e consistente entre a atividade da enzima e as variáveis relacionadas à eficiência das plantas em P ([Tabela 16](#)).

Em nenhuma das variedades, a atividade da fosfatase das raízes se correlacionou com o conteúdo de P. Para a variedade local Carioca, houve correlação negativa com o teor de P das raízes e positiva com o conteúdo de P da parte aérea e total e com a relação de P na parte aérea e raízes. Para Catetão, houve correlação positiva significativa com a produção de massa de raízes. Na variedade local Caiano, houve correlação negativa entre a atividade da enzima e produção de massa de parte aérea, massa seca total, para o conteúdo de P, na parte aérea, e para a relação entre o P acumulado na parte aérea e raízes e para a eficiência na utilização de P. Para as variedades melhoradas Sol da Manhã e Eldorado não se observou correlação entre a atividade da enzima e nenhum das demais características determinadas. Quanto à BR 106, correlação negativa e significativa a 10% foi verificada entre atividade e conteúdo de P da parte aérea e total ([Tabela 16](#)).

Têm sido verificadas correlações tanto positivas como negativas entre a atividade da enzima e o conteúdo de P das plantas ([BESFORD, 1978, 1979, 1980](#); [MC LACHLAN; DE MARCO, 1982](#); [DRACUP et al., 1984](#); [ELLIOT; LÄUCHLI, 1986](#); [FERNANDEZ; ASCENCIO, 1994](#)) e com a tolerância ou sensibilidade à deficiência desse nutriente ([MC LACHLAN, 1980b](#); [SILBERBUSH et al., 1981](#); [FURLANI et al., 1984b](#); [HELAL, 1990](#); [TADANO et al., 1993](#)). Entretanto, a comparação e a sistematização dos resultados publicados sobre as fosfatases ácidas vegetais é difícil, em função de dados inconsistentes ou mesmo contraditórios decorrentes de diferenças entre espécies estudadas, entre técnicas de determinação e entre partes amostradas da planta, como raízes e folhas.

Tabela 16. Coeficientes de correlação (r) entre a atividade da fosfatase ácida das raízes e as demais características avaliadas para os genótipos de milho cultivados em solução nutritiva.

| Características determinadas | Variedades | | | | | |
|------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Caiano | Carioca | Catetão | S. da Manhã | Eldorado | BR 106 |
| MSPA ⁽¹⁾ | -0,73 + | 0,66 ^{ns} | 0,33 ^{ns} | 0,47 ^{ns} | -0,51 ^{ns} | -0,30 ^{ns} |
| MSR | -0,64 ^{ns} | 0,50 ^{ns} | 0,86 * | -0,60 ^{ns} | -0,37 ^{ns} | -0,58 ^{ns} |
| MST | -0,72 + | 0,64 ^{ns} | 0,45 ^{ns} | 0,06 ^{ns} | -0,49 ^{ns} | -0,38 ^{ns} |
| R/PA | 0,63 ^{ns} | -0,70 ^{ns} | 0,52 ^{ns} | -0,68 ^{ns} | 0,03 ^{ns} | -0,47 ^{ns} |
| TPPA | 0,68 ^{ns} | -0,49 ^{ns} | -0,51 ^{ns} | -0,46 ^{ns} | 0,55 ^{ns} | -0,49 ^{ns} |
| TPR | 0,67 ^{ns} | -0,82 * | 0,40 ^{ns} | 0,41 ^{ns} | 0,32 ^{ns} | -0,27 ^{ns} |
| CPPA | -0,73 + | 0,84 * | -0,33 ^{ns} | 0,18 ^{ns} | -0,34 ^{ns} | -0,73 + |
| CPR | 0,45 ^{ns} | -0,65 ^{ns} | 0,59 ^{ns} | -0,22 ^{ns} | 0,08 ^{ns} | -0,58 ^{ns} |
| CPT | -0,69 ^{ns} | 0,77 + | -0,15 ^{ns} | 0,16 ^{ns} | -0,35 ^{ns} | -0,73 + |
| PPA/PR | -0,83 * | 0,84 * | -0,64 ^{ns} | 0,36 ^{ns} | -0,60 ^{ns} | -0,16 ^{ns} |
| IEUP | -0,70 + | 0,55 ^{ns} | 0,60 ^{ns} | -0,12 ^{ns} | -0,47 ^{ns} | -0,10 ^{ns} |

⁽¹⁾MSPA, MSR e MST: matéria seca de parte aérea, raízes e total; R/PA: relação raiz/parte aérea; TPPA e TPR: teor de P na parte aérea e raízes; CPPA, CPR e CPT: conteúdo de P da parte aérea, raízes e total; PPA/PR: relação entre o conteúdo de P na parte aérea e raízes; IEUP: índice de eficiência na utilização de P. +, *, **: significativo, respectivamente a 10, 5 e 1% pelo teste T de Student. ^{ns} Não significativo.

Analisando os resultados registrados na literatura, verifica-se que existem duas correntes a respeito da função e do efeito da atividade da fosfatase no estado nutricional de P das plantas: (1) plantas adaptadas a condições de baixo P (eficientes na aquisição ou utilização de P) apresentam elevada atividade da fosfatase ácida nas raízes (ou nas folhas), como sinal de capacidade de a planta hidrolisar e remobilizar o P do solo pela secreção dessa enzima pelas raízes (ou de outras partes mais velhas da planta) tornando-o mais disponível ([LEE, 1988](#); [LEFEBVRE et al., 1990](#); [BARRETT-LENARD et al., 1993](#)); (2) plantas adaptadas a condições de baixo P (eficientes na aquisição ou utilização de P) demonstram menor exigência ao P e conseqüentemente menor atividade da fosfatase ácida em situação de estresse do nutriente, comparativamente às plantas não adaptadas ou mais exigentes, sendo a atividade da fosfatase ácida indicador da severidade do estado de deficiência de P da planta. Quanto mais sensível à deficiência for a planta, maior a atividade da fosfatase, sinal de menor adaptação ([MC LACHLAN 1980a, 1980b](#); [SILBERBUSH et al., 1981](#); [FURLANI et al., 1984a](#); [ELLIOT; LÄUCHLI, 1986](#); [HELAL, 1990](#); [TADANO et al., 1993](#)). A primeira hipótese pressupõe um papel direto das fosfatases ácidas no mecanismo de eficiência ao P, e a segunda admite envolvimento indireto, podendo a atividade da fosfatase ser apenas indicador da maior ou de menor exigência da planta ao P, numa relação inversa.

Com as variedades de milho estudadas neste trabalho, nenhuma das hipóteses anteriores pôde ser comprovada, o que pode ter sido dificultado pelo fato de se ter trabalhado com genótipos de elevado grau de variabilidade, que é o caso de variedades de polinização aberta, e também pela utilização de plantas muito jovens.

Os resultados da atividade de fosfatase em milho descritos na literatura são variados, e a ausência de associação da atividade enzimática e demais características relacionadas à eficiência na absorção e utilização de P têm sido reportadas. [Clark e Brown \(1974b\)](#) observaram diferenças entre duas linhagens de milho para a atividade da fosfatase ácida determinada em raízes intactas, porém a linhagem de maior atividade enzimática apresentou, também, o conteúdo de P mais elevado, ou seja, melhor estado nutricional, e as diferenças entre os genótipos se relacionaram com a capacidade de absorção de P desses genótipos. Entre as variedades objeto deste estudo, aquela de maior conteúdo de P apresentou atividade de fosfatase intermediária.

A influência do grau de deficiência em P de plantas de milho foi observada por [Elliot e Läuchli \(1986\)](#), quando a atividade de fosfatase ácida foliar foi adequada

como meio de detecção de deficiência aguda, não sendo útil para deficiências sensíveis a moderadas. Relação entre a atividade foliar de fosfatase e deficiência de P em folhas de milho em função de sua posição na planta foi observada por [Kummerová \(1986\)](#).

Ainda em milho, diferenças intra-específicas foram observadas por [Kummerová e Buresová \(1990\)](#). Trabalhando com dois híbridos, um precoce e outro tardio, os autores observaram aumento na atividade enzimática de ambos sob deficiência de P e também uma relação inversa entre a produção de matéria seca de raízes e a atividade de fosfatase. O híbrido precoce, de menor produção de massa, apresentou maior atividade, ao contrário do outro, tardio, mais produtivo e de menor atividade.

Para outras espécies vegetais, os resultados são, também bastante divergentes. Relações inversas entre a atividade da fosfatase e concentração ou conteúdo de P de raízes foram verificadas em sorgo ([FURLANI et al., 1984a](#)), trevo ([DRACUP et al., 1984](#)) e feijão ([HELAL, 1990](#)) e entre a atividade enzimática nas raízes e folhas e a deficiência de P em plantas de trigo ([MCLACHLAN; DE MARCO, 1982](#)). Já [Ascencio \(1994\)](#) e Fernandez e Ascencio (1994) não observaram relação da atividade de fosfatase radicular e foliar com a deficiência de P em feijão, caupi, guandu e algodão.

Os resultados da atividade de fosfatase ácida são portanto, difíceis de serem interpretados e comparados por falta de padronização das condições de estresse (concentração de P no meio nutritivo) da parte da planta avaliada para atividade enzimática e do genótipo utilizado (linhagem, variedade ou híbrido) cuja origem pode influenciar a expressão gênica da enzima em determinada situação de disponibilidade de P. Além disso, a capacidade de o genótipo produzir fosfatases secretáveis pelas raízes só pode ser avaliada quando se mede a atividade dessa enzima em raízes de plantas intactas. A atividade dessas fosfatases secretadas pelas raízes pode ter ou não alguma relação com o estado nutricional da planta, o que tem sido mais fácil de demonstrar quando as folhas são analisadas.

O controle gênico da produção de fosfatases ácidas em resposta a uma situação de estresse de P seria independente daquele que confere às raízes a habilidade de secretar essas enzimas ([FUKUDA et al., 2001](#)), ou seja, a expressão da enzima não estaria, necessariamente, associada com a sua efetiva atividade. Daí a dificuldade de demonstrar a relação entre a atividade das fosfatases ácidas em raízes intactas e a eficiência de absorção e utilização de P.

Portanto, até o momento, conhecendo a elevada variabilidade dentro das populações e dos genótipos de milho quanto à capacidade de sintetizar as fosfatases e de secretar essas enzimas e, sendo esses dois processos controlados por sistemas gênicos independentes, não se recomenda o uso da atividade da fosfatase ácida como marcador fisiológico para avaliação da eficiência da planta na absorção e na utilização de P em condições de baixa concentração externa do elemento.

Conclusões

- 1) São detectadas diferenças de resposta entre as variedades. O desempenho de variedades locais e melhoradas é semelhante tanto em casa de vegetação quanto no campo.
- 2) As variedades apresentam variabilidade quanto aos índices de eficiência em P, em solução nutritiva e no solo. Eldorado, Antigo Maya e BR 106 são as variedades mais eficientes na utilização de P nos ensaios conduzidos em solução nutritiva, enquanto o híbrido P 6875 e as variedades locais Argentino, Asteca, Amarelão, Caiano de Sobralia, Carioca e Quarentão são os genótipos mais eficientes quando cultivados em solo sob condições controladas. Para os índices de eficiência estimados em condições de campo, o melhor desempenho é observado para a variedade Eldorado, seguida da BR 106, Sol da Manhã, BR 105, BR 107 e das variedades locais Caiano e Carioca.
- 3) Os menores valores de Km e Cmin, obtidos para variedades BR 106 e Eldorado, adaptadas à condição de baixa concentração externa de P, são bons indicadores da capacidade de absorção de P dessas variedades.
- 4) Os parâmetros cinéticos *per se* permitem a identificação de genótipos adaptados à condição de baixa ou de alta disponibilidade de P, porém, utilizados isoladamente, não servem como critério de seleção de plantas mais eficientes na absorção e utilização de P.
- 5) As variedades de milho pouco diferem na atividade da fosfatase ácida de raízes intactas, e a atividade enzimática da maioria delas não se correlaciona significativamente com a produção de massa, absorção e eficiência de utilização de P.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, D. L.; SANTOS, G. de A.; DE-POLLI, H.; CUNHA, L. H.; FREIRE, L. R.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. do; PEREIRA, N. N. C.; EIRA, P. A. da; BLOISE, R. M.; SALEK, R. C. **Manual de adubação para o Estado do Rio de Janeiro**. Itaguaí: Universidade Rural, 1988. 179 p. (Coleção Universidade Rural. Série Ciências Agrárias, 2).

ALVES, V. M. C.; NOVAIS, R. F. de; OLIVEIRA, M. F. G. de; SANT'ANNA, R. Cinética e translocação de fósforo em híbridos de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 33, n. 7, p. 1047-1052, 1998.

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

ANGHINONI, I.; VOLKART, C. R.; FATTORE, N.; ERNANI, P. R. Morfologia de raízes e cinética da absorção de nutrientes em diversas espécies e genótipos de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, p. 355-361, 1989.

ASCENCIO, J. Acid phosphatase as a diagnostic tool. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 25, p. 1553-1564, 1994.

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

BALIGAR, V. C.; BARBER, S. A. Genotypic differences of corn for ion uptake. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, p. 870-873, 1979.

BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K. Nutrient use efficiency in acid soils: nutrient management and plant use efficiency. In: MONIZ, A. C.; FURLANI, A. M. C.; SCHAFFERT, R. E.; FAGERIA, N. K.; ROSELEM, C. A.; CANTARELLA, H. (Ed.). **Plant-soil interactions at low pH**. Campinas: Brazilian Soil Science Society, 1997. p. 75-95.

BARRETT-LENARD, E. G.; DRACUP, M.; GREENWAY, H. Role of extracellular phosphatases in the phosphorus-nutrition of clover. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 44, n. 267, p. 1595-1600, 1993.

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

BATTEN, G. D. A review of phosphorus efficiency in wheat. In: RANDALL, P. J.; DELHAITZE, E.; RICHARDS, R. A.; MUNNS, R. (Ed.). **Genetic aspects of plant mineral nutrition**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1993. p. 215-220. (Developments in Plant and Soil Sciences, 50).

BESFORD, R. T. Effect of phosphorus supply on acid phosphatase activity in the leaves of tomato plants. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 9, n. 4, p. 303-309, 1978.

BESFORD, R. T. Phosphorus nutrition and acid phosphatase activity in the leaves of seven plant species. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 30, n. 3, p. 281-285, 1979.

BESFORD, R. T. A rapid tissue test for diagnosing phosphorus deficiency in the tomato plants. **Annals of Botany**, London, v. 45, n. 2, p. 225-227, 1980.

BLAIR, G. Nutrient efficiency: what do we really mean? In: RANDALL, P. J.; DELHAITZE, E.; RICHARDS, R. A.; MUNNS, R. (Ed.). **Genetic aspects of plant mineral nutrition**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1993. p. 205-213. (Developments in Plant and Soil Sciences, 50).

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

CHAPIN III, F. S. Adaptation of selected trees and grasses to low availability of phosphorus. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 72, n. 2/3, p. 283-287, 1983.

CHAPIN III, F. S. The mineral nutrition of wild plants. **Annual Review of Ecology and Systematics**, Palo Alto, v. 11, p. 233-260, 1980.

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

CLARK, R. B. Characterization of phosphatase of intact maize roots. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, DC, v. 23, n. 3, p. 458-460, 1975a.

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

CLARK, R. B. Nutrient solution growth of sorghum and corn in mineral nutrition studies. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 5, n. 8, p. 1039-1057, 1982.

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

CLARK, R. B.; BROWN, J. C. Differential mineral uptake by maize inbreds. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 5, n. 3, p. 213-227, 1974a.

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

DRACUP, M. N. H.; BARRETT-LENNARD, E. G.; GREENWAY, H.; ROBSON, A. D. Effect of phosphorus deficiency on phosphatase activity of cell walls from roots of subterranean clover. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 35, n. 153, p. 466-480, 1984.

DUFF, S. M. G.; SARATH, G.; PLAXTON, W. C. The role of acid phosphatase in plant phosphorus metabolism. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 90, n. 4, p. 791-800, 1994.

ELLIOT, G. C.; LÄUCHLI, A. Evaluation of an acid phosphatase assay for detection of phosphorus deficiency in leaves of maize (*Zea mays* L.) **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 9, p. 1469-1477, 1986.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

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

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Response of legumes and cereals to phosphorus in solution culture. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 12, p. 1005-1019, 1989.

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

- FAWOLE, I.; GABELMAN, W. H.; GERLOFF, G. C.; NORDHEIM, E. V. Heritability of efficiency in phosphorus utilization in beans (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under phosphorus stress. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, New York, v. 107, n. 1, p. 94-97, 1982.
- FEIL, B.; THIRAPORN, R.; STAMP, P. Can maize cultivars with low mineral concentrations in the grains help to reduce the need for fertilizers in third world countries? **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 146, p. 227-231, 1992.
- FERNANDEZ, D. S.; ASCENCIO, J. Acid phosphatase activity in bean and cowpea plants grown under phosphorus stress. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 17, p. 229-241, 1994.
- FÖHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants. I. External and internal P requirement and P uptake efficiency of different plant species. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 110, p. 101-109, 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.
- FUKUDA, T.; OSAKI, M.; SHINANO, T.; WASAKI, J. Cloning and characterization of two secreted acid phosphatases from rice calli. In: HORST, W. J.; SCHENK, M. K.; BÜRKERT, A.; CLAASSEN, N.; FLESSA, H.; FROMMER, W. B.; GOLDBACH, H.; OLFS, H. W.; RÖMHELD, V.; SATTELMACHER, B.; SCHMIDHALTER, U.; SCHUBERT, S.; WIRÉN, N. V.; WITTENMAYER, L. (Ed.). **Plant nutrition: food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research**. Dordrecht: Kluwer Academic, 2001. p. 34-35.
- FURLANI, A. M. C. Variações em parâmetros de cinética de absorção de fósforo de três linhagens de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, p. 77-80, 1988
- 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.; CLARK, R. B.; MARANVILLE, J. W.; ROSS, W. M. Root phosphatase activity of sorghum genotypes grown with organic and inorganic sources of phosphorus. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 7, p. 1583-1595, 1984a.

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

FURLANI, A. M. C.; CLARK, R. B.; ROSS, W. M.; MARANVILLE, J. W. Differential phosphorus uptake, distribution and efficiency by sorghum inbred parents and their hybrids. In: GEBELMAN, H. W.; LOUGHMAN, B. C. (Ed.). **Genetic aspects of plant mineral nutrition**. Dordrecht: Martinus Nyhoff, 1987. p. 287-298.

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

FURLANI, A. M. C.; LIMA, M.; NASS, L. L. Combining ability effects for P-efficiency characters in maize grown in low P nutrient solution. **Maydica**, Bergamo, v. 43, p. 169-174, 1998.

FURLANI, P. R.; LIMA, M.; MIRANDA, L. T. de; SAWAZAKI, E.; MAGNAVACA, R. Avaliação de linhagens, materiais comerciais e duas populações de milho para tolerância a alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 21, n. 6, p. 655-660, 1986.

GILL, M. A.; SALIM, R. M.; ZIA, M. S. Maize growth and uptake of phosphate and copper at different ambient phosphate concentrations. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 38, n. 4, p. 631-636, 1992.

GORSLINE, G. W.; BAKER, D. E.; THOMAS, W. I. Accumulation of eleven elements by field corn (*Zea mays* L.). **Pennsylvania State University Bulletin**, Harrisburg, v. 725, p. 1-33, 1965.

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

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

HELAL, H. M. Varietal differences in root phosphatase activity as related to the utilization of organic phosphates. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 123, p. 161-163, 1990.

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

ISRAEL, D. W.; RUFTY JR., T. W. Influence of phosphorus nutrition on phosphorus and nitrogen efficiencies and associated physiological responses in soybean. **Crop Science**, Madison, v. 28, p. 954-960, 1988.

JONES, G. P. D.; JESSOP, R. S.; BLAIR, G. J. Alternative methods for the selection of phosphorus efficiency in wheat. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 30, p. 29-40, 1992.

JORGE, L. A. de C. **Recomendações práticas para aquisição de imagens digitais analisadas através do SIARCS**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 1996. 44 p. (Circular Técnica, 1).

JUMA, N. G.; TABATABAI, M. A. Phosphatase activity in corn and soybean roots: conditions for assay and effects of metals. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 107, p. 39-47, 1988.

JUNGK, A.; ASHER, C. J.; EDWARDS, D. G.; MEYER, D. Influence of phosphate status on phosphate uptake kinetics of maize (*Zea mays*) and soybean (*Glycine max*). **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 124, p. 175-182, 1990.

KUMMEROVÁ, M. Acid phosphatase activity in maize leaves as related to their evolution and phosphorus deficiency. **Biologia Plantarum**, Prague, v. 28, n. 5, p. 391-395, 1986.

KUMMEROVÁ, M.; BURESOVÁ, I. The effect of exogenous phosphate deficiency on the activity of acid phosphatase of the root of two maize genotypes. **Biologia Plantarum**, Prague, v. 32, n. 1, p. 1-7, 1990.

LEE, R. B. Phosphate influx and extracellular phosphatase activity in barley roots and rose cells. **New Phytologist**, New York, v. 109, n. 2, p. 141-148, 1988.

LEFEBVRE, D. D.; DUFF, S. M. G.; FIFE, C. A.; JULIEN-INALSINGH, C.; PLAXTON, W. C. Response to phosphate deprivation in *Brassica nigra* suspension cells: Enhancement of intracellular cell surface, and secreted phosphatase activities compared to increases in Pi absorption rate. **Plant Physiology**, Rockville, v. 93, n. 3, p. 504-511, 1990.

LOUGHMAN, B. C.; ROBERTS, S. C.; GOODWIN-BAILEY, C. I. Varietal differences in physiological and biochemical responses to changes in the ionic environment. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 72, p. 245-259, 1983.

MACHADO, A. T. Resgate e caracterização de variedades locais de milho. In: SOARES, A. C.; MACHADO, A. T.; SILVA, B. de M.; WEID, J. M. von der.

(Org.). **Milho crioulo**: conservação e uso da biodiversidade. Rio de Janeiro: AS-PTA, 1998. p. 82-92.

MACHADO, A. T.; MAGALHÃES, J. R.; MAGNAVACA, R.; SILVA, M. R. Determinação da atividade de enzimas envolvidas no metabolismo do nitrogênio em diferentes genótipos de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Viçosa, v. 4, n. 1; p. 45-47, 1992.

MACHADO, A. T.; MAGNAVACA, R. **Estresse ambiental**: o milho em perspectiva. Rio de Janeiro: AS-PTA, 1991. 47 p

MACHADO, A. T.; MACHADO, C. T. de T.; FURLANI, P. R. Avaliação e caracterização de variedades locais de milho para condições adversas de ambiente. In: SOARES, A. C.; MACHADO, A. T.; SILVA, B. de M.; WEID, J. M. von der. (Org.). **Milho crioulo**: conservação e uso da biodiversidade. Rio de Janeiro: AS-PTA, 1998a. p. 151-178..

MACHADO, A. T.; PEREIRA, M. B.; MACHADO, C. T. de T.; MÉDICE, L. O. Avaliação de variedades locais e melhoradas de milho em diferentes regiões do Brasil. In: SOARES, A. C.; MACHADO, A. T.; SILVA, B. de M.; WEID, J. M. von der. (Org.). **Milho crioulo**: conservação e uso da biodiversidade. Rio de Janeiro: AS-PTA, 1998b. p. 93-106.

MACHADO, C. T. de T. **Avaliação da eficiência de utilização de fósforo de variedades locais de milho (*Zea mays* L.)**. 1995. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Itaguaí, 1995.

MACHADO, C. T. de T. **Caracterização de genótipos de milho quanto a parâmetros morfológicos, fisiológicos e microbiológicos associados à eficiência de absorção e uso de fósforo**. 2000. 365 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2000.

MACHADO, C. T. de T.; GUERRA, J. G. M.; ALMEIDA, D. L. de; MACHADO, A. T. Variabilidade entre genótipos de milho para eficiência no uso de fósforo. **Bragantia**, Campinas, v. 58, p. 109-124, 1999.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MC LACHLAN, K. D. Acid phosphatase activity of intact roots and phosphorus nutrition in plants. I. Assay conditions and phosphatase activity. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 31, p. 429-440, 1980a.

MC LACHLAN, K. D. Acid phosphatase activity of intact roots and phosphorus nutrition in plants. II. Variations among wheat roots. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 31, p. 441-448, 1980b.

MC LACHLAN, K. D.; DE MARCO, D. G. Acid phosphatase activity of intact roots and phosphorus nutrition in plants. III. Its relation to phosphorus garnering by wheat and a comparison with leaf activity as a measure of phosphorus status. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 33, p. 1-11, 1982.

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, n. 3, p. 562-564, 1982.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A. modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 27, p. 31-36, 1962.

NIELSEN, N. E.; BARBER, S. A. Differences among genotypes of corn in the kinetics of P uptake. **Agronomy Journal**, Madison, v. 70, p. 695-698, 1978.

NIELSEN, N. E.; SCHJØRRING, J. K. Efficiency and kinetics of phosphorus uptake from soil by various barley genotypes. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 72, p. 225-230, 1983.

PATERNIANI, E.; GOODMAN, M. M. **Races of maize in Brazil and adjacent areas**. Mexico: CIMMYT, 1978. 95 p.

ROSSIELO, R. O. P.; ARAÚJO, A. P.; MANZATTO, C. V.; FERNANDES, M. S. Comparação dos métodos fotoelétrico e da interseção na determinação de área, comprimento e raio médio radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 30, p. 633-638, 1995.

RUIZ, H. A. Estimativa dos parâmetros cinéticos Km e Vmax por uma aproximação gráfico-matemática. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 32, p. 79-84, 1985.

SCHENK, M. K.; BARBER, S. A. Potassium and phosphorus uptake by corn genotypes grown in the field as influenced by root characteristics. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 54, p. 65-76, 1980.

SCHENK, M. K.; BARBER, S. A. Root characteristics of corn genotypes as related to P uptake. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, p. 921-924, 1979.

- SCHJØRRING, J. K.; JENSÉN, P. Phosphorus export from roots to shoots of barley buckwheat and rape seedlings with different P status. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 70, p. 58-64, 1987.
- SCHULTHESS, U.; FEIL, B.; JUTZI, S. C. Yield-independent variation in grain nitrogen and phosphorus concentration among Ethiopian wheats. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, p. 497-506, 1997.
- SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization Index: a modified approach to the estimations and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 4, p. 289-302, 1981.
- SILBERBUSH, M.; SHOMER-ILAN, A.; WAISEL, Y. Root surface phosphatase activity in ecotypes of *Aegilops peregrina*. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 53, p. 501-504, 1981.
- SILVA, A. E. da; GABELMAN, W. H. Screening maize inbred lines for tolerance to low P stress condition. In: RANDALL, P. J.; DELHAITZE, E.; RICHARDS, R. A.; MUNNS, R. (Ed.). **Genetic aspects of plant mineral nutrition**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1993. p. 233-239. (Developments in Plant and Soil Sciences, 50).
- 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. In: RANDALL, P. J.; DELHAITZE, E.; RICHARDS, R. A.; MUNNS, R. (Ed.). **Genetic aspects of plant mineral nutrition**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1993. p. 241-249. (Developments in Plant and Soil Sciences, 50).
- TADANO, T.; OZAWA, K.; SAKAI, H.; OSAKI, M.; MATSUI, H. Secretion of acid phosphatase by the roots of crop plants under phosphorus-deficient conditions and some properties of the enzyme secreted by lupin roots. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 155/156, p. 95-98, 1993.
- WALKER, W. M.; RAINES, G. A. Effect of corn cultivar, phosphorus and potassium on yield and chemical composition. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 11, n. 12, p. 1715-1726, 1988.
- YAN, X.; LIAO, H.; TRULL, M. C.; BEEBE, S. E.; LYNCH, J. P. Induction of a major leaf acid phosphatase does not confer adaptation to low phosphorus availability in common bean. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 125, p. 1901-1911, 2001.