**AVALIAÇÃO DO ESTADO NUTRICIONAL DO FÓSFORO DE
GENÓTIPOS DE SORGO GRANÍFERO (*Sorghum bicolor* L. Moench)**

RAFAEL GUILLERMO CAMACHO JARAMILLO

Engenheiro Agrônomo

Orientador: **Prof. Dr. EURÍPEDES MALAVOLTA**

Tese apresentada à Escola Superior de
Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade
de São Paulo, para obtenção do título de Doutor
em Agronomia, Área de Concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil

Janeiro - 1996

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - Campus "Luiz de Queiroz"/USP

Camacho Jaramillo, Rafael Guillermo

Avaliação do estado nutricional do fósforo de genótipos de sorgo granífero
(*Sorghum bicolor* L. Moench) / Rafael Guillermo Camacho Jaramillo. - - Piracicaba,
1996.

110p. : il.

Tese (doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1996.
Bibliografia.

1. Fósforo em sorgo granífero - Avaliação 2. Sorgo granífero - Nutrição I. Título

CDD 633.174

**AVALIAÇÃO DO ESTADO NUTRICIONAL DO FÓSFORO DE
GENÓTIPOS DE SORGO GRANÍFERO (*Sorghum bicolor* L. Moench)**

RAFAEL GUILLERMO CAMACHO JARAMILLO

Tese apresentada à Escola Superior de
Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade
de São Paulo, para obtenção do título de Doutor
em Agronomia, Área de Concentração: Solos e
Nutrição de Plantas.

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil

Janeiro - 1996

**AVALIAÇÃO DO ESTADO NUTRICIONAL DO FÓSFORO DE GENÓTIPOS DE
SORGO GRANÍFERO (*Sorghum bicolor* L. Moench)**

RAFAEL GUILLERMO CAMACHO JARAMILLO

Aprovada em 05.03.1996

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Eurípedes Malavolta	CENA/USP
Prof. Dr. Godofredo César Vitti	ESALQ/USP
Prof. Dr. Ronaldo Ivan Silveira	ESALQ/USP
Prof. Dr. Domingos Fornasieri Filho	UNESP/Jaboticabal
Prof. Dr. Valdemar Faquin	UFLA/Lavras

Prof. Dr. Eurípedes Malavolta
Orientador

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Maria; minha esposa, Arizay (Arita);
meus filhos, Tomás, Yomilcaring (Nino) e Rafael (Nono).

AGRADECIMENTO

Desejo exprimir o mais grande reconhecimento a meu orientador, Prof. Dr. Eurípedes Malavolta, pela sua colaboração, apoio e sábios conselhos, antes e durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Takashi Muraoka, pela colaboração prestada na execução do experimento 2.

Ao Sr. Alfredo José Ferraz de Mello pela correção da ortografia.

À Cleuza Pereira Cabral pela ajuda prestada na instalação do experimento e nas análises químicas.

À Clotilde Maria Batochio Cunha pela sua excelência na datilografia.

Aos colegas José Simplício de Holanda, Ronaldo Stefanutti, Oscar Lima Frontão e Adonis Moreira, pela sua amizade e troca de idéias relacionadas com esta pesquisa.

Finalmente, estendo minha eterna gratidão a duas instituições venezuelanas, a Universidade Rómulo Gallegos e o Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, por me ter favorecido com uma bolsa para realizar os estudos de doutorado; e a dois centros brasileiros, a Escola Superior de Agricultura "Luis de Queiroz", por enriquecer meu patrimônio cognoscitivo, e ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura por me permitir o uso do seus laboratórios e casa de vegetação.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	ix
RESUMO.....	xiii
SUMMARY.....	xiv
 1. INTRODUÇÃO.....	 1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Importância da cultura.....	3
2.2. Avaliação do estado nutricional em P.....	3
2.2.1. Diagnose visual da deficiência de P.....	4
2.2.2. Diagnose foliar.....	5
2.2.3. Bioavaliação do estado nutricional por absorção de radio- fósforo.....	6
2.2.4. Método bioquímico para P.....	7
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	9
3.1. Procedimento experimental.....	9
3.2. Semeadura.....	10
3.3. Experimento I: crescimento, diagnose visual, foliar (teores totais e solúveis de fósforo) e avaliação bioquímica do estado nutricional em P (P-ase).....	11
3.3.1. Transplante, cuidados e diagnose visual.....	11
3.3.2. Colheita.....	13
3.3.3. Atividade de fosfatase ácida (P-ase).....	13
3.3.4. Obtenção do peso da matéria seca.....	14
3.3.5. Análise química foliar.....	14
3.4. Experimento 2: crescimento, diagnose foliar (teores totais e solú- veis de fósforo) e bioavaliação com radiofósforo.....	15

3.4.1. Transplante.....	15
3.4.2. Bioavaliação por absorção de ^{32}P	16
3.4.3. Determinação da matéria seca e análise química de fósforo.....	18
3.5. Análise estatística.....	18
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
4.1. Experimento 1.....	20
4.1.1. Diagnose visual aos 67 dias.....	20
4.1.2. Produção de matéria seca.....	31
4.1.3. Diagnose foliar aos 67 dias.....	37
4.1.3.1. Teores totais de P nas folhas +2 e +3	37
4.1.3.2. Teores solúveis de fósforo (PO_4) nas folhas +2 e +3..	40
4.1.4. Teste bioquímico para P aos 67 dias.....	42
4.1.5. Relação entre teor foliar de P e da atividade de P-ase com o crescimento das plantas.....	47
4.1.6. Avaliação do estado nutricional.....	57
4.2. Experimento 2.....	64
4.2.1. Produção de matéria seca aos 48 dias.....	64
4.2.2. Diagnose foliar aos 41 dias.....	71
4.2.2.1. Teores totais de P nas folhas +2 e +3	71
4.2.2.2. Teores solúveis de P (PO_4).....	75
4.2.2.3. Relação entre teor foliar de fósforo e produção de matéria seca.....	78
4.2.2.4. Relação entre teores foliares de P total e PO_4	79
4.2.3. Bioavaliação por absorção de P (^{32}P).....	81
4.2.4. Avaliação do estado nutricional.....	86
5. CONCLUSÕES.....	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93

LISTA DE TABELAS

1. Parentais, características da panícula, maturação e rendimento de oito genótipos de sorgo granífero.....	10
2. Solução estoque de JOHNSON et al. (1957), modificada por MALAVOLTA et al. (1993).....	12
3. Tratamentos para sorgo nas soluções nutritivas.....	13
4. Tratamento para bioavaliação com ^{32}P	17
5. Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre a produção da matéria seca radicular (g planta^{-1}), em oito genótipos de sorgo granífero aos 67 dias após plantio.....	32
6. Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre a produção da matéria seca na parte aérea (g planta^{-1}), em oito genótipos de sorgo granífero aos 67 dias após plantio.....	33
7. Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre a produção da matéria seca total (g planta^{-1}), em oito genótipos de sorgo granífero aos 67 dias....	35
8. Produções estimadas de MST correspondentes à máxima e 90% da máxima, e os níveis de P na solução para promover estas produções, em oito genótipos de sorgo granífero, aos 67 dias após plantio.....	35
9. Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre a relação raiz/parte aérea de oito genótipos de sorgo granífero, aos 67 dias após plantio.....	36

10. Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre o teor foliar de P total (g Kg^{-1}), equações de regressão ajustadas, e níveis críticos de P-total (NC P) nas folhas, correspondentes à produção total máxima e 90% da máxima, em oito genótipos de sorgo granífero, aos 67 dias após plantio. 39
11. Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre o teor foliar de PO_4 ($\mu\text{g g}^{-1}$), equações de regressão ajustadas, e níveis críticos de PO_4 (NC PO_4) nas folhas, correspondentes à produção total máxima e 90% da máxima, em oito genótipos de sorgo granífero, aos 67 dias após plantio. 41
12. Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre a atividade da P-ase radicular ($\mu\text{mol.g}^{-1} \text{MF.h}^{-1}$), em oito genótipos de sorgo granífero, aos 67 dias após plantio..... 43
13. Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre a atividade da P-ase foliar ($\mu\text{mol.g}^{-1} \text{MF.h}^{-1}$), equações de regressão ajustadas, e atividades de P-ase foliar, correspondentes à produção total máxima e 90% da máxima, em oito genótipos de sorgo granífero, aos 67 dias após plantio. 46
14. Equações de regressão e coeficientes de determinação (r^2) para produção de matéria seca de raízes (MSR), parte aérea (MSPA) e total (MST) em função do teor foliar de P total (P total)..... 49
15. Equações de regressão e coeficientes de determinação (r^2) para produção de matéria seca de raízes (MSR), parte aérea (MSPA) e total (MST) em função do teor foliar de P solúvel (PO_4)..... 50
16. Equações de regressão e coeficientes de determinação (r^2) para produção de matéria seca de raízes (MSR), parte aérea (MSPA) e total (MST), em função da atividade de P-ase radicular (P-ase r)..... 52

17. Equações de regressão e coeficientes de determinação (r^2) para produção de matéria seca de raízes (MSR), parte aérea (MSPA) e total (MST) em função da atividade P-ase foliar (P-ase f).....	53
18. Equações de regressão e coeficientes de determinação (r^2) para P foliar solúvel (PO_4) e atividade de P-ase foliar (P-ase f), em função do teor foliar de P total (P total); atividade de P-ase foliar (P-ase f), em função do teor foliar de P solúvel (PO_4); e entre atividade de P-ase radicular em função do P radicular total (P radicular).....	54
19. Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre o peso da matéria seca radicular (g planta^{-1}), em oito genótipos de sorgo granífero, aos 41 dias após plantio.....	65
20. Efeitos dos níveis de P na solução nutritiva sobre a produção da matéria seca da parte aérea (g planta^{-1}), em oito genótipos de sorgo granífero, aos 41 dias após plantio.....	66
21. Efeitos dos níveis de P na solução nutritiva sobre a produção da matéria seca total (g planta^{-1}), em oito genótipos de sorgo granífero, aos 41 dias após plantio.....	67
22. Produções estimadas de matéria seca total (MST) correspondentes à máxima e 90% da máxima, e os níveis de P na solução para promover estas produções, em oito genótipos de sorgo granífero, aos 41 dias após plantio.....	68
23. Efeitos dos níveis de P na solução nutritiva sobre a relação raiz/parte aérea de oito genótipos de sorgo granífero, aos 41 dias após plantio.....	79

24. Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre o teor de P total nas folhas (g Kg^{-1}), equações de regressão ajustadas, e níveis críticos de P-total foliar (NC P), correspondentes à produção total máxima e 90% da máxima, em oito genótipos de sorgo granífero, aos 41 dias após plantio. 72
25. Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre o teor de P-PO_4 foliar ($\mu\text{g g}^{-1}$), equações de regressão ajustadas, e níveis críticos de PO_4 foliar (NC PO_4), correspondentes à produção total máxima e 90% da máxima, em oito genótipos de sorgo granífero, aos 41 dias após plantio..... 76
26. Equações de regressão e coeficientes de determinação (r^2) para produção de matéria seca de raízes (MSR), parte aérea (MSPA) e total (MST), em função do teor foliar de P total, em oito genótipos de sorgo granífero, aos 41 dias após plantio..... 78
27. Equações de regressão e coeficientes de determinação (r^2) para produção de matéria seca de raízes (MSR), parte aérea (MSPA), total (MST) e absorção de ^{32}P em função do P-PO_4 , em oito genótipos de sorgo granífero, aos 41 dias após plantio..... 80
28. Equações de regressão e coeficientes de determinação (r^2) para P solúvel (PO_4) e absorção de ^{32}P em função do P total, e entre absorção de ^{32}P em função do P solúvel..... 81
29. Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre a absorção de ^{32}P ($\mu\text{mol.g}^{-1} \text{MS.15min}^{-1}$), equações de regressão ajustadas e absorção de ^{32}P , correspondentes à produção total máxima e 90% da máxima, em oito genótipos de sorgo granífero, aos 67 dias após plantio..... 83
30. Equações de regressão e coeficientes de determinação (r^2) para produção de matéria seca de raízes (MSR), parte aérea (MSPA) e total (MST), em função da absorção de ^{32}P 86

LISTA DE FIGURAS

Página

1. Resposta do sorgo granífero cv. Criollo-1 ao P em solução nutritiva.....	23
2. Resposta do sorgo granífero cv. Criollo-8 ao P em solução nutritiva.....	24
3. Resposta do sorgo granífero cv. Sefloarca-7 ao P em solução nutritiva.....	25
4. Resposta do sorgo granífero cv. Sefloarca-10 ao P em solução nutritiva...	26
5. Resposta do sorgo granífero cv. Himeca-101 ao P em solução nutritiva....	27
6. Resposta do sorgo granífero cv. Himeca-303 ao P em solução nutritiva....	28
7. Resposta do sorgo granífero cv. Pioneer YSB-83 ao P em solução nutritiva.....	29
8. Resposta do sorgo granífero cv. Wac 8228-BR ao P em solução nutritiva..	30
9. Teor de fósforo na matéria seca de raízes e folhas de oito genótipos de sorgo granífero crescidos em 0, 0,5 e 1,0 mM P na solução nutritiva (média de três repetições).....	56

10. Relação entre teor foliar de P total e: (a) produção de matéria seca, e (b) teor foliar de PO_4 , em oito genótipos de sorgo granífero. R^2 significativo a 1 % de probabilidade.....	60
11. Relação entre teor foliar de PO_4 e: (a) produção de matéria seca, e (b) atividade de P-ase foliar, em oito genótipos de sorgo granífero. R^2 significativo a 1 % de probabilidade.....	61
12. Relação entre atividade de P-ase foliar e produção de matéria seca, em genótipos de sorgo granífero. R^2 significativo ao nível de 1 % de probabilidade.....	62
13. Relação entre teor foliar de P total e atividade de P-ase foliar, em oito genótipos de sorgo granífero. R^2 significativo ao nível de 1 % de probabilidade.....	62
14. Relação entre teor radicular de P total e: (a) produção de matéria seca, e (b) atividade de P-ase radicular, em oito genótipos de sorgo granífero. * e ** significativo aos níveis de 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente.....	63
15. Relação entre teor foliar de P total e produção de matéria seca, em 8 híbridos de sorgo granífero. R^2 significativo a 1 % de probabilidade.....	88
16. Relação entre teor foliar de P total e teor foliar de P- PO_4 , em oito genótipos de sorgo granífero. R^2 significativo a 1 % de probabilidade.....	88

17. Relação entre teor foliar de PO_4 e produção de matéria seca, em oito genótipos de sorgo granífero. * e ** significativo aos níveis de 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente..... 89
18. Relação entre teor foliar de PO_4 e absorção de ^{32}P por raízes destacadas de oito genótipos de sorgo granífero. R^2 significativo a 1 % de probabilidade..... 89
19. Relação entre absorção ^{32}P e produção de matéria seca, em 8 híbridos de sorgo granífero. ** significativo a 1 %; ns: não significativo..... 90
20. Relação entre teor foliar de P total e absorção de ^{32}P por raízes destacadas de 8 híbridos de sorgo granífero. R^2 significativo a 1 % de probabilidade..... 90

Abreviaturas

P-ase: fosfatase ácida

C-O-P: éster fosfórico

C-OH: éster

Pi: fosfato inorgânico

^{32}P : radiofósforo, fósforo marcado

P- PO_4 , P solúvel: fósforo solúvel em ácido acético

M , mM , μM : molar, milimolar, micromolar

p-NFP: para nitrofenil fosfato

λ : comprimento de onda

$^{\circ}\text{C}$: grau Celsius

Fe-EDTA: ferro acomplexado com o ácido etileno diamino tetracético

μCi : microcuri

KBq: quilobequerel

Background: radiação de fundo

-P: tratamento carente de P, O mM P

R/PA: razão peso da matéria seca das raízes ao peso da matéria seca da parte aérea

$y = a \pm bx$: equação linear

$y = a e^{\pm bx}$: equação exponencial

$y = \pm a \pm bx \pm cx^2$: equação quadrática

r^2 , R^2 : coeficiente de determinação

ATP: trifosfato de adenosina

MF: matéria fresca

MS: matéria seca

MSR: matéria seca de raízes

MSPA: matéria seca da parte aérea

MST: matéria seca total

M-G-P: manose-6-fosfato

G-6-P: glicose-6-fosfato

AVALIAÇÃO DO ESTADO NUTRICIONAL DO FÓSFORO DE GENÓTIPOS DE SORGO GRANÍFERO (*Sorghum bicolor* L. Moench)

Autor: RAFAEL GUILLERMO CAMACHO JARAMILLO

Orientador: Prof. Dr. EURÍPEDES MALAVOLTA

RESUMO

Oito genótipos de sorgo granífero (*Sorghum bicolor* L. Moench.) foram cultivados em solução nutritiva sob condições de casa de vegetação, com três concentrações de P (0, 0,5 e 1,0 mM). Os outros macronutrientes e micronutrientes foram adicionados em doses iguais a todas as plantas. O estado nutricional das plantas foi avaliado através de dois experimentos, independente um do outro. No primeiro (67 dias após plantio) usaram-se os seguintes métodos: (1) diagnose visual da deficiência de fósforo; (2) diagnose foliar (teor total e solúvel de fósforo); e (3) teste bioquímico para fósforo (atividade de fosfatase ácida, P-ase). No experimento 2 (41 dias após plantio) as técnicas usadas foram: (1) diagnose foliar e (2) bioavaliação por absorção de ^{32}P . Dentro de limites, observaram-se relações positivas entre concentração de P na solução nutritiva e: produção de matéria seca (da parte aérea e total) e concentração de fósforo nas folhas. Por outro lado, relação negativa entre: absorção de ^{32}P por raízes destacadas e concentração de P no meio de crescimento em que as plantas tenham se desenvolvido previamente; entre produção de matéria seca e: absorção de radiofósforo e atividade de P-ase; igualmente, entre atividade de P-ase e teor de P no meio externo. Todos os métodos utilizados refletiram bem o estado nutricional, sendo que no primeiro experimento a diagnose foliar constituiu a melhor técnica de avaliação, enquanto que no segundo a absorção de ^{32}P por raízes foi o melhor método de avaliação do estado nutricional do fósforo em plantas de sorgo granífero.

EVALUATION OF THE NUTRITIONAL STATUS OF PHOSPHORUS OF GENOTYPES OF GRAIN SORGHUM (*Sorghum bicolor* L. Moench).

Author: RAFAEL GUILLERMO CAMACHO JARAMILLO

Adviser: Prof. Dr. EURÍPEDES MALAVOLTA

ABSTRACT

Eight genotypes of grain sorghum were grown in nutrient solution under three concentrations of P (0, 0.5 e 1.0 mM). Their nutritional status was evaluated by visual diagnosis, leaf analysis (determination of total P and soluble phosphate concentration), biochemical test of acid phosphatase activity, and uptake of ^{32}P by excised roots, in two different experiments. Positive correlation were found to occur between the following pairs of variables, between limits: substrate P and shoot dry weight and substrate P and total dry weight; substrate P and leaf phosphorus. On the other hand, as expected, negative correlations were observed among nutrient solution P and: acid phosphatase activity (APA) and uptake of radiophosphorus; among dry matter yield and APA and uptake of ^{32}P . All methods were capable of assessing the nutritional status; however, in the first experiment leaf diagnosis gave the best indication, whereas in the second trial uptake of ^{32}P was the best method of evaluation.

1. INTRODUÇÃO

O sorgo granífero é utilizado com dois propósitos na alimentação animal. O grão constitui o principal ingrediente energético na fabricação de alimentos concentrados pela agroindústria, e a biomassa vegetativa, acima do solo, é empregada como forragem e/ou silagem.

Por estarem restritas a solos de baixa fertilidade natural (oxissolos e ultissolos), a deficiência e a fixação de fósforo constituem um dos fatores que mais têm limitado o rendimento da cultura.

Estudos conduzidos na identificação de técnicas que permitam avaliar o estado nutricional em P, além do diagnóstico visual e da diagnose foliar (P total), para esta espécie são muito limitados. O desenvolvimento de novos métodos e a avaliação dos já existentes com a caracterização dos sintomas de deficiência e avaliação da necessidade de fertilizantes, constituem importantes ferramentas que poderão contribuir para aumentar a produtividade e qualidade do sorgo granífero.

Dentro do contexto citado, diversos métodos têm sido desenvolvidos para avaliar o estado nutricional das plantas. A maneira mais rápida de se determinar a existência de uma deficiência mineral é através da diagnose visual; entretanto, é um método até um certo ponto subjetivo e, a maioria das vezes, impreciso (ROSOLEM, 1987).

Outro método de avaliação é a diagnose foliar, que consiste em analisar o solo usando a própria planta como solução extratora (MALAVOLTA et al., 1989). Embora mais demorado, o método de análise química das folhas para determinação do estado nutricional apresenta-se como excelente ferramenta (ROSOLEM, 1987; CALVACHE et al., 1994; CAMACHO et al., 1995).

Testes bioquímicos também são utilizados para avaliar o estado nutricional de um determinado nutriente nos tecidos vegetais. A fosfatase (P-ase, EC 3.1.3.2.) [SIGMA, 1995, p.802] é um exemplo clássico de uma enzima cuja atividade é dependente do seu substrato, e catalisa a hidrólise de ésteres fosfóricos orgânicos (C-O-P) a fosfato inorgânico (P_i) e éster (C-OH); em consequência, plantas deficientes em fósforo têm alta atividade da P-ase (BESFORD, 1980; ZAINI & MERCADO, 1985; GARCÍA, 1990; SILVA & BASSO, 1993). O primeiro autor sugere a utilização da atividade da P-ase como indicador bioquímico da deficiência de P nas culturas.

Para o mesmo fim, isto é, avaliação do estado nutricional, fertilizantes podem ser marcados com isótopos e sua absorção monitorada pela determinação dos mesmos nos tecidos (CHAPIN & VANCE, 1992). HARRISON & HELLIWELL (1979) demonstraram que a capacidade de absorção de ^{32}P por unidade de raiz foi maior em plantas deficientes em P, e diminuiu linearmente com o suprimento de P.

Com o objetivo de contribuir na identificação de técnicas de diagnóstico, o presente trabalho teve por finalidade avaliar o estado nutricional de 8 genótipos de sorgo grânifero cultivados em solução nutritiva, através de dois experimentos independente um do outro. No primeiro usaram-se os seguintes métodos: (1) diagnose visual da deficiência de P; (2) diagnose foliar (teor total e solúvel de fósforo); e (3) teste bioquímico para P (atividade da P-ase). No experimento dois os métodos usados foram: (1) diagnose foliar (teor total e solúvel de fósforo) e (2) bioavaliação por absorção de ^{32}P . A finalidade última constituiu na obtenção de parâmetros que servirão para avaliar o estado nutricional de genótipos de sorgo na prática agrícola.

O trabalho se baseou nas seguintes hipóteses: (1) a deficiência de P na solução nutritiva refletirá uma sintomatologia característica; (2) dentro de certos limites, deverá existir uma relação direta entre teores de P na solução e: produção de matéria seca e concentração de P nas folhas (total e solúvel); igualmente, entre teor de P nas folhas e produção de matéria seca; (3) relação inversa entre teores de P na solução externa e nas folhas e: atividade da P-ase e absorção de ^{32}P .

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Importância da cultura

O sorgo granífero é produto de primeira necessidade na dieta humana em países como a Índia, a China e outros, bem como a África (NOUR & WEIBEL, 1978). Na América, esse cereal é utilizado, principalmente, na alimentação animal.

Na Venezuela, a cultura alcança sua maior importância, não como cereal com alto rendimento, mas por estar muito bem adaptada às condições de clima e solo, chegando a ocupar o terceiro lugar na ordem de importância (quanto à área cultivada e produção), depois do milho e o arroz (FAO, 1995). Nesse país, a espécie é utilizada com dois propósitos: a agroindústria emprega o grão na fabricação de alimentos concentrados para animais, e a resteva é utilizada como forragem na alimentação bovina.

2.2. Avaliação do estado nutricional em P

A nutrição fosfatada é um dos mais importantes fatores que limitam o crescimento das plantas em solos ácidos da zona tropical, seja por deficiência ou pela alta fixação no solo (SANCHEZ & SALINAS, 1983). A maneira mais rápida e prática de se determinar a existência da deficiência de P em plantas é através da diagnose visual; não obstante, muitos outros fatores podem comprometer este tipo de diagnóstico (WALLACE, 1961).

Segundo MALAVOLTA et al., (1989), avaliar o estado nutricional consiste simplesmente em fazer uma comparação entre amostra e padrão. Amostra é uma planta, parte dela ou um conjunto de plantas. Padrão é uma planta ou um conjunto de plantas "normais" do ponto de vista da sua nutrição. Considera-se normal uma planta que, tendo nos seus tecidos todos os elementos em quantidades e proporções adequadas, seja capaz de dar altas produções, possuindo um aspecto visual parecido com o encontrado em lavouras muito produtivas. Alternativamente, pode-se considerar como normal a planta que foi cultivada em condições controladas de nutrição, não sofrendo restrições para crescer e produzir quanto à quantidade e à proporção dos elementos que recebe.

2.2.1. Diagnose visual da deficiência de P

"A falta de um dado elemento provoca sempre a mesma manifestação visível de anormalidade, qualquer que seja a espécie considerada, visto que as funções exercidas na vida da planta são sempre as mesmas: eis o princípio em que se baseia a diagnose visual como um método de avaliação do estado nutricional" (MALAVOLTA, 1980).

Na maioria das vezes compararam-se as folhas, porém, tais comparações podem também ser feitas com outros órgãos da planta, como o caule, a raiz ou o fruto.

O P, ao contrário do que acontece nos solos, apresenta alta mobilidade na planta, translocando-se rapidamente dos tecidos velhos às regiões mais novas. Em muitas culturas a deficiência de P não é tão fácil de ser detectada em comparação com o N e o K; em alguns casos pode acontecer que as folhas pareçam amarelas, a princípio as mais velhas, pouco brilho, cor verde-azulada ou manchas pardas, ângulos foliares mais estreitos, número reduzido de frutos e sementes e atraso no florescimento (MALAVOLTA et al., 1989); em cereais, crescimento e perfilhamento reduzidos, caules pequenos e delgados, as folhas mais velhas murcham a partir das pontas e

morrem precocemente, viram de bronze a bronze-vermelho no processo; as folhas são rigidamente erectas mas as pontas caem (BERGMANN, 1992). Em plantas de milho, as folhas mais velhas apresentam tonalidade arroxeadas perto das margens e nos colmos (MALAVOLTA et al., 1989), consequência do aumento da antocianina no suco celular (HECHT-BUCHHOLZ, 1983).

Se não há possibilidade de comparação com o padrão é pouco possível identificar a deficiência de P, particularmente em condições de campo, onde outros fatores, inclusive outras deficiências, contribuem para dificultar tal identificação (BERGMANN, 1992). Isso explica, pelo menos em parte, porque os sintomas de carência do elemento tem sido pouco descritos na cultura de sorgo.

Nesse sentido, a diagnose visual para P é insuficiente para fazer recomendações de fertilizantes. Não obstante, oferece a possibilidade de se complementar com outros tipos de diagnose.

2.2.2. Diagnose foliar

Segundo MALAVOLTA et al. (1989), a diagnose foliar é um método de avaliação do estado nutricional das culturas no qual se analisam determinadas folhas em períodos definidos da vida da planta. Utilizam-se as folhas por serem, em regra geral, os órgãos que melhor refletem o estado nutricional. Esse tipo de diagnose consiste em analisar-se o solo usando a planta como solução extratora.

Para a avaliação do estado nutricional; empregando-se a diagnose foliar tem-se que comparar o teor do elemento encontrado na amostra, com àquele dado pela amostra padrão (MALAVOLTA, 1980).

De modo geral, na diagnose foliar faz-se a determinação do teor total do nutriente. A determinação de uma só fração do conteúdo, algumas vezes oferece um melhor indicador do estado nutricional (MARSCHNER, 1986; MALAVOLTA et al., 1989).

CALVACHE et al. (1994), trabalhando com plantas de arroz e feijão, concluíram que os teores totais e solúveis de P na folha apresentaram alta correlação positiva com os níveis de nutriente na solução, mostrando que a diagnose foliar é um método adequado de avaliação do estado nutricional dessas duas espécies.

Segundo BIELESKI & FERGUSON (1983) o P nos tecidos vegetais está presente em torno de 3 g.kg^{-1} do peso da matéria seca; valores abaixo de 1/3 e acima 3 vezes àquele podem causar deficiência ou toxidez, respectivamente. MAYNARD (1979) indicou teores deficientes abaixo de 2 g P kg^{-1} na matéria seca das folhas. Os efeitos do excesso de P só acontecem se os níveis forem 5-10 vezes mais elevados que os considerados normais (BERGMANN, 1992). Para a cultura de sorgo, teores totais de P considerados adequados, variam de 4 a 8 gramas por quilograma de matéria seca foliar; fatores climáticos e da própria planta podem alterar essa faixa (MALAVOLTA et al., 1989). Não têm sido indicados valores normais para fosfato solúvel, nessa cultura.

2.2.3. Bioavaliação do estado nutricional por absorção de radiofósforo

Embora o método de análise química das folhas para determinação de deficiências minerais seja uma excelente ferramenta, é muito demorado (ROSOLEM, 1987).

Às vezes é difícil obter medidas confiáveis da disponibilidade às plantas do P no solo, particularmente em solos que apresentam uma ampla gama de propriedades físicas e químicas (HARRISON & HELLIWELL, 1979; ARMSTRONG et al., 1993).

O uso de compostos radioativos supera as limitações associadas a outros métodos de avaliação da disponibilidade de P mineral, por fornecer evidência direta da absorção de P pela planta da fonte marcada (FRIED, 1954). Nesse sentido, os fertilizantes são marcados com ^{32}P e a sua absorção monitorada pela presença do isótopo nos tecidos (CHAPIN & VANCLEVE, 1992).

BOWEN (1970) desenvolveu um bioensaio rápido que permite detectar deficiências de P em plântulas antes que os sintomas da carência sejam aparentes. O bioensaio está baseado nas relações entre o estado do P dentro da planta e a absorção de ^{32}P de uma solução de fosfato $5 \times 10^{-6}\text{M}$.

A aplicabilidade do método de BOWEN tem sido investigado nas espécies *Betula verrucosa* e *Acer pseudoplatanus* (HARRISON & HELLIWELL, 1979), *Oriza sativa* e *Phaseolus vulgaris* (CALVACHE et al., 1994) e vários genótipos de *Sorghum bicolor* (CAMACHO & MALAVOLTA, 1996). O bioensaio baseia-se numa relação exponencial negativa entre a absorção radicular de fósforo de uma solução teste e a quantidade de P no meio externo, onde as plantas tinham crescido previamente; assim, plantas deficientes em P apresentam alta capacidade para absorver fosfatos.

A maior sensibilidade das técnicas isotópicas permite determinar com facilidade as quantidades dos nutrientes absorvidos pelas raízes durante um período experimental de curta duração, e seu uso potencial no diagnóstico do estado nutricional ficou demonstrado nos trabalhos acima citados.

2.2.4. Método bioquímico para P

Tem sido demonstrado que sob condições de estresse são iniciados eventos bioquímicos que mostram a reação da planta a ambiente desfavorável.

Numerosas referências na literatura têm indicado a relação existente entre atividade de fosfatase ácida (P-ase) e estresse por P nas espécies *Licopersicon esculentum* (HEWITT & TATHAM, 1960; BESFORD, 1979a,b,c; 1980; GARCIA, 1990), *Zea mays* (CLARK & BROWN, 1974; CLARK, 1975), *Oryza sativa* (ZAINI & MERCADO, 1985), *Saccharum officinarum* (SILVA & BASSO, 1993), *Triticum aestivum* (McLACHLAN, 1982; McLACHLAN et al., 1987), *Phaseolus vulgaris* e

Vigna unguiculata (FERNANDEZ & ASCENCIO, 1994; ASCENCIO, 1994), *Cajanus cajan* e *Gossypium hirsutum* (ASCENCIO, 1994), *Cucumis sativus* (BESFORD, 1978) e *Sorghum bicolor* (FURLANI et al., 1984).

A enzima catalisa a hidrólise de ésteres fosfatos num processo termodinâmico favorável ($\Delta G^{\circ} \leq -9 \text{ KJ mol}^{-1}$) (VICENT et al., 1992) e, embora alguns trabalhos tenham apresentado resultados contraditórios (FERNANDEZ & ASCENCIO, 1994; ASCENCIO, 1994), em tecidos da grande maioria das espécies de plantas a atividade da P-ase é incrementada marcadamente com a deficiência de fosfato. As diferenças parecem ser genéticas (BESFORD, 1979c; LOUGHMAN et al., 1983; KUMMEROVA & BURESOVA, 1990), relacionadas ao tempo de exposição das plantas à deficiência de P (GARCIA, 1990), ao método usado na determinação da atividade da P-ase (CLARK, 1975), reserva ou fonte do fosfato determinado (SACHAY et al., 1991), tecido completo ou parte dele usado na análise (LOUGHMAN, 1987), condições ambientais (BARRET-LENARD & GREENWAY, 1982; McLACHLAN, 1984).

O aumento na atividade da P-ase parece ser devido à aparição de duas novas isoenzimas de baixo peso molecular localizadas na parede celular, ausentes sob fornecimento adequado de P (BIELESKI & JOHNSON, 1972; BARRET-LENARD & GREENWAY, 1982; BARRET-LENARD et al., 1982; McLACHLAN, 1984); ou ao incremento na síntese *de novo* da enzima (REID & BIELESKI, 1970; DUFF et al., 1994).

Por constituir um teste rápido e sensível do estado do P na planta, BESFORD (1979a,b) sugeriu a utilização da atividade de P-ase como indicador bioquímico da deficiência de P nas culturas. Além disso, BESFORD (1980) concluiu que a comparação visual da cor amarela (formada pela incubação de discos foliares de tomateiro com o substrato p-nitrofenil fosfato) com tabelas apropriadas eliminaria o uso de laboratórios na diagnose da deficiência de P nessa cultura.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Procedimento experimental

A parte experimental foi conduzida sob condições controladas, em casa de vegetação e no laboratório de Nutrição Mineral de Plantas, do Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo (CENA/USP) em Piracicaba, São Paulo, Brasil.

Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente ao acaso, com três repetições. Os fatores de tratamento foram oito genótipos de sorgo granífero e três níveis de P na solução nutritiva.

O modelo matemático associado a esse delineamento é:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + E_{ijk},$$

onde:

Y_{ijk} é o valor observado da repetição k do i-ésimo híbrido de sorgo granífero combinado com o j-ésimo nível de P na solução nutritiva;

μ é a média geral, comum a todas as observações;

α_i é o efeito do i-ésimo híbrido de sorgo;

β_j é o efeito do j-ésimo nível de P;

$(\alpha\beta)_{ij}$ é o efeito da interação do i-ésimo híbrido de sorgo com j-ésimo nível de P;

E_{ijk} é o erro experimental

3.2. Semeadura

Sementes dos 8 genótipos de sorgo, cujas características são apresentadas na Tabela 1 foram desinfetadas com hipoclorito de sódio a 10%, lavadas 3 vezes com água destilada e colocadas em vermiculita umidecida com CaSO_4 10^{-4}M numa bandeja plástica e recobertas com 1 cm do mesmo substrato, para a obtenção das mudas. Cinco dias após sementeira as plantas emergiram.

Tabela 1. Parentais, características da panícula, maturação e rendimento de oito genótipos de sorgo granífero¹.

Genótipo	Parentais ²	Compactação da panícula ³	cor da panícula ⁴	maturação ao crescimento ⁵	Rendimento ⁶
Criollo-1	LA x LT	SA	E	M	6033
Criollo-8	LT x LT	SA	E	M	6789
Sefloarca-7	LT x LT	SA	E	M	6561
Sefloarca-10	LA x LT	SA	E	M	6792
Himeca-101	LA x LA	SA	mc	M	5789
Himeca-303	LT x LT	A	mc	T	6500
Pioneer YSB-83	LA x LT	SA	E	T	6629
Wac 8228 BR	Americano tropicalizado	SA	E	M	6001

¹ CAMACHO & MALAVOLTA (1995)

² LA: linhagem americana; LT: linhagem tropical; ³ SA: panícula semi-aberta; A: panícula aberta

⁴ E: escuro; mc: marrom claro; ⁵ M: média (57-64 dias); T: tardia (> 64 dias)

⁶ Kg ha⁻¹, com 12% de umidade.

Devido ao limitado espaço na estufa e carência de dinheiro para compra de todos os vasos, foram feitos dois experimentos em épocas diferentes.

O estudo foi dividido em dois experimentos a saber:

3.3. Experimento 1: crescimento, diagnose visual, foliar (teores totais e solúveis de fósforo) e avaliação bioquímica do estado nutricional em P (P-ase)

3.3.1. Transplante, cuidados e diagnose visual

Cinco dias após emergência, as plântulas foram transferidas para bandejas com capacidade para 30 litros, com sistema de arejamento, contendo solução sem $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, apresentada na Tabela 2; diluída 5 vezes, mais $0,2\text{ ml L}^{-1}$ de uma solução *M* de NH_4NO_3 (equivalente ao tratamento -P da Tabela 3). O volume da solução foi completado com água destilada de acordo com a necessidade.

Após permanecerem nas bandejas por 14 dias, foram transplantadas para vasos com capacidade para 3,5 litros, com tampa, pintados externamente com tinta preta e aluminon. Uma muda por vaso foi colocada em solução de JOHNSON et al., (1957), modificada por MALAVOLTA et al. (1993) com o propósito de fornecer três concentrações de P: 0, 0,5 e 1,0 mM (Tabela 3)

Após sete dias nos vasos, as plantas do tratamento com omissão de P, apresentaram sintomas evidentes da deficiência, amenizada pela adição de 1 ml/vaso de uma solução 0,1 mM $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ($\sim 0,029 \mu\text{M P}$), repetido oito dias depois, quando se fez a primeira troca da solução nutritiva, para evitar a morte prematura das plantas.

Onze dias após transplante foi corrigida uma deficiência de ferro nos tratamentos com 0,5 e 1,0 mM de P, pela adição de 1 ml da solução estoque de Fe-EDTA a cada vaso.

Duas vezes por dia foi verificado o adequado funcionamento dos arejadores, fazendo-se adições diárias com água destilada conforme à necessidade. A cada 15 dias foram renovadas as soluções nutritivas, e semanalmente eram observadas cuidadosamente as plantas e descritos sintomas de carência. Quatorze dias antes da colheita, foi fotografada uma planta de cada tratamento.

Tabela 2. Solução estoque de JOHNSON et al. (1957), modificada por MALAVOLTA et al. (1994)

	Molaridade	Concentração	Solução	Estoque	Concentração
Composto	Sol. Estoque	Sol. estoque (g L ⁻¹)	(ml L ⁻¹)		final (mg L ⁻¹)
..... macronutrientes					
KNO ₃	1	101,10	6	N	210
Ca(NO ₃) ₂ . 4H ₂ O	1	236,15	4	K	235
NH ₄ H ₂ PO ₄	1	115,03	1	Ca	160
MgSO ₄ . 7H ₂ O	1	246,47	2	P	31
				S	32
				Mg	24
..... micronutrientes					
KCl	50 mM	3,728		Cl	1,77
H ₃ BO ₃	25 mM	1,546		B	0,27
MnSO ₄ . H ₂ O	2 mM	0,338		Mn	0,11
CuSO ₄ . 5H ₂ O	0,5 mM	0,125	1	Cu	0,032
H ₂ MoO ₄ (85% MoO ₃)	0,5 mM	0,081		Mo	0,05
ZnSO ₄ . 7H ₂ O	2 mM	0,575		Zn	0,131
Fe-EDTA ¹	20 mM	6,922	1	Fe	1,12

¹Fe - Ácido etileno diamino tetraacético: em 700 ml água destilada dissolver 26,1 g EDTA (ou quantidade equivalente ao sal sódico do EDTA) e em seguida, 268 ml NaOH N(40 g L⁻¹) e 24,9 g de FeSO₄ . 7H₂O; arejar durante uma noite protegendo da luz; completar a 1 litro com água destilada; conservar em frasco escuro na geladeira.

Tabela 3. Tratamentos para sorgo nas soluções nutritivas

Concentração	Vasos	KNO ₃	Ca(NO ₃) ₂	NH ₄ H ₂ PO ₄	MgSO ₄	Micros	Fe-EDTA	NH ₄ NO ₃
P na solução	n°	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>M</i>	<i>M</i>	juntos		<i>M</i>
<i>mM</i>		 ml L ⁻¹						
1	7-9; 16-18; 25-27; 34-36; 43-45; 52-54; 61-63; 70-72	6	4	1	1	1	1	0
0,5	4-6; 13-15; 22-24; 31-33; 40-42; 49-51; 58-60; 67-69	6	4	0,5	1	1	1	0,75
0	1-3; 10-12; 19-21; 28-30; 37-39; 46-48; 55-57; 64-66	6	4	0	1	1	1	1

3.3.2. Colheita

As plantas foram colhidas 67 dias após a semeadura, separadas em raízes, caules e folhas.

3.3.3. Atividade de fosfatase ácida (P-ase)

Atividade de P-ase foi determinada em amostras do terço médio da terceira folha (com lígula visível e numeradas acropetalamente), segundo o

procedimento descrito por BASSO (1994), com algumas modificações: 0,1g de segmentos de 3 mm de largura de limbo foliar, de material fresco recém-coletado, foram incubados em 8 ml de substrato tampão [100 μM de para-nitrofenilfosfato (p-NFP) em tampão acetato 0,1 M a pH 4]. Após incubação de 30 minutos, a 30°C na escuridão, 5 ml do sobrenadante foram alcalinizados por adição de 2 ml de NaOH, N (detenção da hidrólise enzimática). A atividade foi determinada quantificando o p-NFP hidrolizado, com ajuda de uma reta padrão estabelecida previamente, usando um espectrofotômetro com $\lambda = 420$ nm.

Seguindo a mesma metodologia, a atividade de P-ase foi determinada também em segmentos de 3 mm, no terço médio das raízes.

3.3.4. Obtenção do peso da matéria seca

Imediatamente após realizado o teste bioquímico, as diferentes partes das plantas foram colocadas em sacos de papel perfurados, levadas à estufa com circulação de ar forçada, à temperatura de 70°C até peso constante. O peso da matéria seca total foi obtido através do somatório do peso da matéria seca de todas as partes da planta, expressos em gramas por planta.

3.3.5. Análise química foliar

As folhas +2 e +3 (com lígula visível e numeradas acropetalamente) foram moídas em almofariz e o pó vegetal obtido foi novamente seco em estufa e imediatamente procedeu-se à extração do P.

O P total foi extraído por digestão ácida à quente com HNO_3 e HClO_4 , e a concentração no extrato determinado por colorimetria do metavanadato. O P solúvel em ácido acético foi determinado pelo método colorimétrico do azul de molibdênio. Ambas as metodologias são descritas por MALAVOLTA et al. (1989).

3.4. Experimento 2: crescimento, diagnose foliar (teores totais e solúveis de fósforo) e bioavaliação com radiofósforo

3.4.1. Transplante

Quando as plântulas atingiram de 8-10 cm de altura, 11 dias após plantio, foram transferidas para bandejas com capacidade para 30 litros com sistema de arejamento, contendo a solução nutritiva apresentada na Tabela 2, diluída 5 vezes, onde permaneceram por 10 dias. O volume da solução foi completado com água destilada, de acordo com a necessidade.

As plantas que foram transferidas para bandejas apresentaram uma deficiência generalizada de ferro, que foi corrigida pela adição de 6 ml/bandeja da solução estoque de Fe-EDTA.

O transplante das bandejas para os vasos com capacidade para 3,5 litros, foi feito em conformidade com o primeiro experimento; aeração, irrigações e trocas das soluções nutritivas foram feitas do mesmo modo.

As plantas foram colhidas 41 dias após plantio, separadas em raiz, caule e folhas.

3.4.2. Bioavaliação por absorção de ^{32}P

Para realizar a bioavaliação, cada planta foi cortada no colo. As raízes foram lavadas rapidamente com água destilada, divididas em duas partes aproximadamente iguais, e colocadas em frascos de vidro numerados de 1 a 72 (equivalente ao número dos vasos identificados na tabela 3), contendo sulfato de cálcio $5 \times 10^{-6}\text{M}$, à temperatura ambiente por 30 minutos; transferidas por 15 minutos adicionais a frascos de vidro de 200 ml contendo 100 ml da solução de KH_2PO_4 $5 \times 10^{-6}\text{M}$ marcado com $20\mu\text{Ci}$ (720 KBq) de ^{32}P L^{-1} livre de carregador em $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $5 \times 10^{-4}\text{M}$, sendo mantido um sistema contínuo de aeração. O experimento foi conduzido conforme se observa na Tabela 4.

Completados os tempos de absorção, as soluções foram decantadas dos frascos, diretamente no recipiente reservado para esse fim. Em seguida as raízes foram colocadas sobre papel absorvente e lavadas por três vezes com 100 ml de água destilada, imediatamente foram colocadas em copos numerados, contendo 100 ml de água destilada por 15 minutos (escoamento do espaço livre aparente). Após a lavagem, as raízes foram colocadas em frascos de vidro de 200 ml, e levadas para estufa com circulação forçada de ar a 70°C , até peso constante, obtendo-se em seguida o peso de matéria seca; as raízes foram trituradas em moinho, provido de peneira de aço inoxidável com 20 malhas por polegada quadrada (0,42 mm).

Preparou-se o extrato nítrico perclórico, conforme a determinação de P total (MALAVOLTA et al., 1989), para a avaliação do ^{32}P que foi metabolicamente absorvido pela raiz. Transferiram-se alíquotas de 5 ml do extrato para frascos de vidro e levadas a espectrômetro de cintilação líquida, onde por efeito Cerenkov, foram feitas as contagens de ^{32}P . Não houve necessidade de se fazer correção de cor via "quenching". Da mesma forma, foi preparada a amostra de referência (extrato nítrico

Tabela 4. Tratamento para bioavaliação com ^{32}P .

Frasco nº	Genótipo	Fósforo na solução de crescimento	Pré-tratamento $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Tratamento fosfato $^{32}\text{P} + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
		mM	 ml	
1 - 3	Criollo-1	0	100	100*
4 - 6		0,5	100	100
7 - 9		1,0	100	100
10 - 12	Criollo-8	0	100	100
13 - 15		0,5	100	100
16 - 18		1,0	100	100
19 - 21	Sefloarca-7	0	100	100
22 - 24		0,5	100	100
25 - 27		1,0	100	100
28 - 30	Sefloarca-10	0	100	100
31 - 33		0,5	100	100
34 - 36		1,0	100	100
37 - 39	Himeca-101	0	100	100
40 - 42		0,5	100	100
43 - 45		1,0	100	100
46 - 48	Himeca-303	0	100	100
49 - 51		0,5	100	100
52 - 54		1,0	100	100
55 - 57	Pioneer YSB-83	0	100	100
58 - 60		0,5	100	100
61 - 63		1,0	100	100
64 - 66	WAC 8228-BR	0	100	100
67 - 69		0,5	100	100
70 - 72		1,0	100	100

* 96 ml ($\text{KH}_2\text{PO}_4 + \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) + 4 ml ^{32}P .

perclórico sem raízes). Os resultados obtidos em cpm (contagem por minuto de ^{32}P) foram corrigidos por radiação de fundo ("background") e convertidos em μmoles de ^{32}P por grama de matéria seca de raiz por 15 minutos, segundo a metodologia descrita por HARRISON & HELLIWELL (1979).

3.4.3. Determinação da matéria seca e a análise química de fósforo

A matéria seca de raízes, parte aérea e total, e a análise química para determinação do P-total e PO_4 nas folhas $+2$ e $+3$ foram feitas de acordo com as mesmas metodologias citadas no experimento 1.

3.5. Análise estatística

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e utilizou-se o teste de Tukey ($p < 0,01$) para a comparação dos genótipos em cada nível de fósforo na solução nutritiva.

Com os dados obtidos foram feitas, ainda, análises de regressão entre P na solução nutritiva e as seguintes variáveis: peso da matéria seca (raízes, parte aérea e total), teor foliar de P (total e solúvel), atividade da P-ase e absorção de ^{32}P .

Conforme a trabalhos anteriores (HARRISON & HELLIWELL, 1979; McLACHLAN et al., 1987; SAARELA, 1990), para verificar a eficiência e utilidade dos métodos de avaliação do estado nutricional fizeram-se análise de regressão e estabelecidos os coeficientes de determinação para as seguintes relações: produção de matéria seca e: (1) teor foliar de P-total, (2) teor foliar de PO_4 , (3) atividade de

P-ase, e (4) absorção de ^{32}P . Igualmente, entre P-total nas folhas e: (5) PO_4 foliar, (6) atividade de P-ase, e (7) absorção de ^{32}P . Do mesmo modo, entre PO_4 e: (8) atividade de P-ase, e (9) absorção de ^{32}P .

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Experimento 1

4.1.1. Diagnose visual aos 67 dias¹

O primeiro sintoma visível nas plantas crescidas na solução nutritiva com omissão de fósforo foi a redução drástica do crescimento (figuras 1 a 8). Descoloração púrpura, roxo-avermelhado e avermelhado foram desenvolvidas, especificamente nas bainhas das folhas mais velhas, nervura central e parte inferior dos caules; não ocorreu, porém, a cor verde-azul observada nas folhas de outras espécies de gramíneas (MALAVOLTA et al., 1989).

A descoloração deve-se, possivelmente, ao aumento na concentração de antocianinas (HECHT-BUCHHOLZ, 1983; MENGEL & KIRBY, 1987, p.419) resultante da impossibilidade na síntese de proteínas e acumulação de certos açúcares (YAGODIN et al., 1983; TERRY & RAO, 1991; BERGMANN, 1992). BROETTO & CROCOMO (1993) concluíram que o metabolismo de flavonóides pode ser adotado como marcadores bioquímicos da capacidade de resposta das plantas a fatores estressantes.

Sintomas adicionais nas folhas velhas incluem clorose que começa nas pontas e margens e avança em direção da base e ao centro, respectivamente,

¹ Estágio de crescimento: iniciação da panícula. (VANDERLIP & REEVES, 1972).

possivelmente devido ao efeito do P nas reações enzimáticas que acontecem nos cloroplastos (TERRY & RAO, 1991). A clorose evolui rapidamente para necrose (cor bronze a marron púrpura). As pontas das folhas murcham e não são rigidamente eretas. As folhas definham prematuramente a partir das pontas e ao longo das margens. As bainhas de alguns genótipos separam-se do caule mas não se desprendem do corpo da planta.

Deficiência de P reduziu o número de folhas fotossinteticamente ativas e a área foliar em todos os genótipos. LYNCH et al. (1991), trabalhando com o feijoeiro, indicaram que a área foliar reduzida é produto da diminuição do número de folhas através do efeito primário sobre a taxa de aparição das mesmas e secundariamente por redução da expansão foliar.

Os caules foram menores e mais finos sob a deficiência de P. A citocinina tem sido indicada como o hormônio primário da divisão celular (FOSKET, 1994, p.315-317) e sua exportação é reduzida pela deficiência deste macronutriente (SALAMA & WAREING, 1979); portanto, pode-se supor que o crescimento secundário do caule estaria associado com o fornecimento de P.

Devido à dificuldade na observação das raízes crescidas em solos, principalmente na textura argilosa, a diagnose visual neste órgão tem sido escassamente estudada.

Nas ilustrações, observa-se que a sensibilidade das raízes à deficiência de P manifestou-se por um gradiente de cores vermelhas que vai desde quase claras e com poucas diferenças com relação àquelas supridas com P (figura 6) até quase marrom (figura 4). Embora esse possível estresse oxidativo não tenha sido estudado em resposta ao P, tem sido associado ao incremento das espécies oxígeno-ativadas

a um nível além da capacidade do sistema protetor (enzimático e não enzimático) de esgotá-las (ELSTNER, 1982; POLLE & RENNENBERG, 1993; DEY & KAR, 1995). O efeito oxidativo está relacionado, aparentemente, em sentido oposto à formação de raízes.

O desenvolvimento radicular em volume foi muito prejudicado no tratamento carente de P. As raízes secundárias quase desapareceram, mas o crescimento vertical foi estimulado (Figs. 1, 3 e 7), o que se constituirá em importante mecanismo de adaptação da planta permitindo-lhe absorver água e nutrientes em camadas de maior profundidade no solo.

Entrada de água, absorção de solutos e propriedades físicas da parede celular são considerados possíveis fatores regulatórios da expansão radicular (PRITCHARD, 1994). Sob condições de culturas hidropônicas, o crescimento das raízes pode ser afetado pela composição da solução nutritiva (LUNDEGÅRDH, 1942). O crescimento representa um incremento em volume e, portanto, absorção de água ao longo das raízes (SHARP et al., 1988; SILK & WAGNER, 1990). Se não houver importação de solutos para o interior das células em expansão, seu conteúdo chegaria a diluir-se reduzindo a pressão osmótica interna (π_i) e a pressão de turgor (P) (COSGROVE, 1986). Uma célula que dobra em volume, sem a concomitante absorção de solutos, teria a metade da pressão de turgor antes da expansão e, então, expandir-se-ia a uma taxa mais baixa que o normal (PRITCHARD, 1994); portanto, absorção de solutos deve ser paralela ao crescimento (SCHMALSTIG & COSGROVE, 1990).

Se a deficiência de P é difícil de ser identificada pela diagnose visual (BERGMANN, 1992), mais difíceis, ainda, são os sintomas da toxidez. Neste trabalho observou-se uma ligeira diminuição na altura da planta, nos genótipos Criollo-8 (figura 2) e Wac (figura 8), sem aparição de outras indicações relacionadas com a toxidez.

Figura 1 - Resposta do sorgo granífero cv. Criollo-1 ao P em solução nutritiva.

Figura 2 - Resposta do sorgo granífero cv. Criollo-8 ao P em solução nutritiva.

Figura 3 - Resposta do sorgo granífero cv. Sefloarca-7 ao P em solução nutritiva.

Figura 4 - Resposta do sorgo granífero cv. Sefloarca-10 ao P em solução nutritiva.

Figura 5 - Resposta do sorgo granífero cv. Himeca-101 ao P em solução nutritiva.

Figura 6 - Resposta do sorgo granífero cv. Himeca-303 ao P em solução nutritiva.

Figura 7 - Resposta do sorgo granífero cv. Pioneer YSB-83 ao P em solução nutritiva.

Figura 8 - Resposta do sorgo granífero cv. Wac 8228-BR ao P em solução nutritiva.

4.1.2. Produção de matéria seca

Biomassa total acima da superfície do solo (fitomassa), altura da planta, índice de área foliar e número de folhas por plantas são variáveis, entre outras, usadas para caracterizar o crescimento das culturas (DOBERMANN & PAMPOLINO, 1995), sendo o peso da matéria (fresca e/ou seca), provavelmente, o critério mais comumente utilizado para expressar a influência dos nutrientes minerais sobre o padrão de crescimento das plantas e/ou de alguns de seus órgãos no tempo (BOHM, 1979).

A Tabela 5 mostra os resultados da produção de matéria seca nas raízes de oito genótipos de sorgo granífero. Contrário ao esperado, as raízes das plantas no tratamento carente de P, exibiram um rendimento menor, e sem diferenças significativas entre elas, com relação as plantas crescidas nos meios não deficientes.

GARCIA (1990), trabalhando na cultura do tomateiro, encontrou que os maiores valores de peso da matéria seca radicular foram alcançados no tratamento testemunha (2 mM P), não funcionando neste estudo o chamado "crescimento compensatório", que segundo BARBER (1979) e RUSELL (1981) ocorre nas raízes de plantas submetidas a estresse. É provável que tenha acontecido o seguinte: sob um estresse moderado de P ocorre o "crescimento compensatório", mas, em condições de estresse severo, e num estado de desenvolvimento avançado da planta (como ocorreu neste experimento), aceleram-se os processos oxidativos, e em consequência os de senescência, provocando desprendimento e perda da maioria das raízes secundárias. Este último fato foi observado no presente experimento.

Tabela 5 - Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre a produção da matéria seca radicular (g planta^{-1}), em oito genótipos de sorgo granífero aos 67 dias após plantio.

Genótipo	Níveis de P, mM			equação ⁺⁺	r ²
	0	0,5	1,0		
Criollo-1	0,36 ⁺ a	3,74 bc	3,30 ab	$y = 0,36 + 10,55x - 7,61x^2$	0,99**
Criollo-8	0,26 a	3,38 c	1,78 b	$y = 0,26 + 10,97x - 9,45x^2$	0,99**
Sefloarca-7	0,33 a	3,89 bc	2,39 ab	$y = 0,33 + 12,19x - 10,13x^2$	0,72*
Sefloarca-10	0,74 a	4,10 bc	4,20 a	$y = 0,74 + 9,99x - 6,53x^2$	1,00**
Himeca-101	0,54 a	5,42 ab	4,09 a	$y = 0,54 + 15,98x - 12,43x^2$	0,81**
Himeca-303	0,18 a	3,81 bc	2,67 ab	$y = 0,18 + 12,04x - 9,54x^2$	1,00**
Pioneer YSB-83	0,51 a	3,81 bc	3,81 a	$y = 0,51 + 9,88x - 6,58x^2$	1,00**
Wac 8228-BR	0,34 a	6,17 a	3,88 a	$y = 0,34 + 19,78x - 16,24x^2$	0,97**

* Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si ao nível 1% de probabilidade pelo teste de Tukey

⁺⁺ Y: matéria seca; X: níveis P

** e *: significativo ao nível de 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.

À exceção de Sefloarca e Pioneer nos tratamentos ricos em P observou-se diminuição do desenvolvimento radicular quando os genótipos passaram de 0,5 a 1,0 mM. No nível de 0,5 mM o melhor comportamento foi o exibido por Wac e Himeca-101, e o pior, pelo Criollo-8; no entanto, os demais genótipos apresentaram conduta intermediária e sem diferenças estatísticas. Em 1,0 mM P todos os cultivares, menos o Criollo-8, mostraram semelhante comportamento na produção de matéria seca radicular. O rendimento da matéria seca nas raízes dos oito genótipos ajustou-se a modelos quadráticos de regressão (Tabela 5).

Quanto à produção de matéria seca na parte aérea (Tabela 6), todos os materiais genéticos foram altamente prejudicados pela carência de P, nenhum deles superou os dois gramas, não existindo diferenças entre eles, ainda que quantitativamente a maior redução obteve-se no Himeca-303 ($0,58 \text{ g planta}^{-1}$).

Tabela 6 - Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre a produção da matéria seca na parte aérea (g planta⁻¹), em oito genótipos de sorgo granífero aos 67 dias após o plantio.

Genótipo	Níveis de P, mM			equação ⁺⁺	r ²
	0	0,5	1,0		
Criollo-1	1,85 ⁺ a	12,50 ab	11,76 ab	$y = 1,85 + 32,72x - 22,81x^2$	0,96**
Criollo-8	1,62 a	8,93 c	7,62 c	$y = 1,62 + 23,22x - 17,22x^2$	0,92**
Sefloarca-7	1,04 a	10,23 bc	10,29 bc	$y = 1,04 + 27,51x - 18,26x^2$	0,96**
Sefloarca-10	1,87 a	12,84 ab	11,73 ab	$y = 1,87 + 34,03x - 24,16x^2$	1,00**
Himeca-101	1,67 a	12,67 ab	13,41 ab	$y = 1,67 + 32,27x - 20,53x^2$	0,92**
Himeca-303	0,58 a	12,73 ab	10,65 ab	$y = 0,58 + 38,53x - 28,46x^2$	1,00**
Pioneer YSB-83	1,67 a	12,47 ab	12,31 ab	$y = 1,67 + 32,54x - 21,91x^2$	1,00**
Wac 8228-BR	1,15 a	14,13 a	14,15 a	$y = 1,15 + 38,95x - 25,95x^2$	1,00**

⁺ Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si ao nível 1% de probabilidade pelo teste de Tukey

⁺⁺ Y: matéria seca; X: níveis P

** : significativo ao nível 1% de probabilidade.

No nível 0,5 mM P destacaram-se os genótipos Himeca-303, Wac, Himeca-101, Pioneer, Sefloarca-10 e Criollo-1, com acréscimos no rendimento da ordem de grandeza de 2095, 1129, 650, 647, 586 e 576%, respectivamente, quando comparados aos mesmos crescidos no tratamento -P. A produção inferior observou-se no híbrido Criollo-8 (8,93 g planta⁻¹); entretanto, o aumento no seu rendimento foi de 451%. Sefloarca-7 respondeu muito bem à aplicação do macronutriente.

Com 1,0 mM P na solução externa os cultivares apresentaram comportamento semelhante ao da dose anterior; porém, a tendência é a queda de produção na matéria seca aérea, salvo para o Himeca-101. Isto parece indicar que possíveis mecanismos de fitotoxidez estariam operando, sendo que o Criollo-8 e o Himeca-303 seriam os materiais mais lesados ao reduzir seus rendimentos em 15 e 16%, respectivamente.

Fato importante observado neste experimento foi que o rendimento da massa seca radicular (Tabela 5) e da parte aérea (Tabela 6) foram afetadas na mesma proporção pela carência de P. Raízes das plantas crescidas em 0 mM P reduziram seu peso entre 82 (Sefloarca-10) e 95% (Himeca-303), quando comparadas a 0,5 mM P, igualmente, o sistema aéreo foi diminuído entre 82 (Criollo-8) e 95% (Himeca-303). Estes resultados contrastam com o experimento 2 deste trabalho, e com os de CLARKSON & SCATERGOOD (1982) e REZENDE & BARBER (1984), em plantas de tomate, encontraram que o efeito do estresse por P era mais marcante na taxa de crescimento da parte aérea que nas raízes; e GARCIA (1990), evidenciou resultados totalmente opostos a estes (a parte radicular foi a mais afetada). A possível explicação para esta discordância seria o tempo de imposição do estresse; chegaria um momento em que o efeito seria tão grande que afetaria na mesma proporção as duas partes.

O peso da matéria seca total, como é observado na Tabela 7, seguiu o mesmo padrão de rendimento da parte aérea, em todos os níveis de P; o que era de se esperar, já que essa variável é função desta última e do desenvolvimento radicular. A relação funcional genótipo x nível para produção de matéria seca total foi ajustada a curva quadrática do crescimento.

Para nenhum dos genótipos encontraram-se diferenças significativas com respeito ao tratamento com omissão de P; no entanto, o Himeca-303 apresentou a mais baixa produção total (0,62) e Sefloarca-10 a mais alta (2,61 g planta⁻¹). Observou-se, também (Tabela 7), que os maiores valores foram alcançados sempre no tratamento 0,5 mM P, sendo que o Criollo-8 foi o híbrido de pior comportamento, junto com o Sefloarca-7, e os 6 outros genótipos integraram um grupo compacto, do ponto de vista estatístico, com os mais altos rendimentos.

Todos os cultivares reduziram o rendimento da matéria seca total à maior dose de P na solução nutritiva, com um ponto de máximo nos níveis situados de 0,64(Criollo-8) a 0,74 mM P (Pioneer) [Tabela 8]. O nível de fósforo na solução, adequado para promover 90% da máxima produção de matéria seca total foi de 0,63

mM. Isto parece indicar que mecanismos que conduzem à toxidez ou desequilíbrio, relacionados com o excesso de P, poderiam estar operando.

Tabela 7 - Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre a produção da matéria seca total (g planta⁻¹), em oito genótipos de sorgo granífero, aos 67 dias após plantio.

Genótipo	Níveis de P, mM			equação ⁺⁺	r ²
	0	0,5	1,0		
Criollo-1	2,21 ⁺ a	16,21 ab	15,06 ab	$y = 2,21 + 43,14x - 30,29x^2$	0,98**
Criollo-8	1,88 a	12,32 c	9,40 c	$y = 1,88 + 34,24x - 26,71x^2$	0,95**
Sefloarca-7	1,37 a	14,13 bc	12,63 bc	$y = 1,37 + 39,70x - 28,39x^2$	0,92**
Sefloarca-10	2,61 a	16,94 ab	15,91 ab	$y = 2,61 + 44,05x - 30,75x^2$	1,00**
Himeca-101	2,21 a	18,09 ab	17,51 ab	$y = 2,21 + 48,24x - 32,94x^2$	0,89**
Himeca-303	0,62 a	16,54 ab	13,29 ab	$y = 0,62 + 51,00x - 38,33x^2$	1,00**
Pioneer YSB-83	2,18 a	16,27 ab	16,12 ab	$y = 2,18 + 42,42x - 28,49x^2$	0,99**
Wac 8228-BR	1,47 a	20,30 a	18,03 a	$y = 1,49 + 58,72x - 42,17x^2$	0,96**

⁺ Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si ao nível 1% de probabilidade pelo teste de Tukey

⁺⁺ Y: matéria seca; X: níveis P

** : significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 8 - Produções estimadas de MST correspondentes ao máximo e 90% do máximo e os níveis de P na solução para promover estas produções, em oito genótipos de sorgo granífero, aos 67 dias após plantio.

Genótipo	MST, g planta ⁻¹		Nível P, mM	
	máximo	90%	máximo	90%
Criollo-1	17,57	15,81	0,71	0,64
Criollo-8	12,85	11,57	0,64	0,58
Sefloarca-7	15,25	13,72	0,70	0,63
Sefloarca-10	18,39	16,55	0,72	0,64
Himeca-101	19,87	17,88	0,73	0,66
Himeca-303	17,24	15,43	0,67	0,60
Pioneer YSB-83	17,97	16,17	0,74	0,67
Wac 8228-BR	21,93	19,74	0,70	0,63

Em síntese, para os dois componentes da matéria seca total, observou-se que todos os genótipos respondem altamente às aplicações de P; não obstante a maior resposta, nesta situação particular, foi para o rendimento das raízes. Recentes contribuições têm indicado que a nutrição fosfatada é um dos fatores mais limitantes ao crescimento das plantas, estando o nutriente envolvido no metabolismo fotossintético do carbono (TERRY & RAO, 1991; USUDA & SHIMOGAWARA, 1991 a, b, 1992; ANWARUZZAMAN, 1995) fonte de assimilados para as raízes.

Em atenção à mútua dependência existente entre a parte aérea e raízes, outro parâmetro utilizado nos estudos da nutrição mineral para avaliar o efeito preferencial no crescimento das plantas, é a razão peso da matéria seca do sistema radicular/peso da matéria seca da parte aérea (R/PA) [AUNG, 1974]; os resultados desta relação estão na Tabela 9.

Tabela 9 - Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre a relação raiz/parte aérea de oito genótipos de sorgo granífero, aos 67 dias após plantio

Genótipo	Níveis de P, mM			equação ⁺⁺	r ²
	0	0,5	1,0		
Criollo-1	0,20 ^b	0,30 a	0,28 a	$y = 0,20 + 0,34x - 0,26x^2$	0,69*
Criollo-8	0,17 b	0,39 a	0,24 a	$y = 0,17 + 0,79x - 0,72x^2$	0,74*
Sefloarca-7	0,32 ab	0,37 a	0,23 a	-. -	ns
Sefloarca-10	0,40 a	0,32 a	0,36 a	$y = 0,40 - 0,28x + 0,24x^2$	0,66*
Himeca-101	0,32 ab	0,42 a	0,31 a	-. -	ns
Himeca-303	0,32 ab	0,30 a	0,25 a	-. -	ns
Pioneer YSB-83	0,30 ab	0,31 a	0,31 a	-. -	ns
Wac 8228-BR	0,30 ab	0,45 a	0,28 a	$y = 0,30 + 0,63x - 0,65x^2$	0,63*

⁺ Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si ao nível 1 % de probabilidade pelo teste de Tukey

⁺⁺ Y: razão R/PA; X: níveis P

*: significativo ao nível de 5%; ns: não significativo.

Pouca variação foi observada na R/PA no tratamento carente de P e nenhuma nos outros dois. Assim, nesta fase do desenvolvimento vegetativo, na ausência de fósforo, os genótipos Criollo-8 (0,17) e Criollo-1 (0,20), produziram elevada quantidade de matéria seca na parte aérea (Tabela 6) e pouca biomassa radicular, quando comparado ao Sefloarca 10 (Tabela 5). Segundo esta característica, os dois primeiros genótipos citados teriam a mais baixa capacidade na "procura" de fosfatos num meio deficiente em P.

Contrariamente ao esperado (ver experimento 2 desta tese), entre limites, a razão aumentou ou não foi alterada com os acréscimos do P no meio externo, salvo para o Sefloarca-10; a possível explicação já foi dada quando se estudou a produção da matéria seca nas raízes (p.31). O comportamento aguardado pode ser observado entre 0,5 e 1 mM P, exceto para Sefloarca-10 (Tabela 8).

4.1.3. Diagnose foliar aos 67 dias

4.1.3.1. Teores totais de P nas folhas +2 e +3

A concentração foliar de P total aumentou de forma quadrática ($p < 0,01$) para todos os genótipos com o acréscimo da concentração de P na solução nutritiva (Tabela 10).

No tratamento -P o teor do P nas folhas foi o mesmo para os oito genótipos, apesar de os Sefloarcas e o Himeca-303 terem valores acima de 2 g kg⁻¹. Para este último e o Sefloarca-7, esses teores elevados podem ser consequência do efeito da concentração pelo baixo crescimento da parte aérea destes genótipos (LOCKMAN, 1972a; JARREL & BEVERLY, 1981; CALVACHE et al., 1994).

Observa-se, na mesma Tabela 10, que todos os materiais genéticos responderam positivamente à adição de P; assim, acrescentando-se o P na solução aumentou a concentração nas folhas; uma das três premissas a serem obedecidas para

que a diagnose foliar possa ser usada (MALAVOLTA et al., 1989). Os maiores valores foram encontrados no nível alto de P, todos acima de $9,00 \text{ g kg}^{-1}$ (salvo no Himeca-101), por outro lado, as concentração mais baixas, como eram esperadas, foram obtidas na dose -P, todos iguais ou inferiores a $2,50 \text{ g kg}^{-1}$.

Considerável variação genotípica na concentração de P foliar foi observada no nível intermediário de P (Tabela 10). Deste modo, Criollo-8, Pioneer e Sefloarca-10 apresentaram teores superiores a $9,00 \text{ g}$ de P por kg de matéria seca do tecido foliar; enquanto que Pioneer e Wac mostraram os teores mais baixos.

Os níveis críticos de P-total nas folhas relacionado à produção máxima de MST variaram entre $6,80$ (Himeca-101) e $12,63 \text{ g kg}^{-1}$ (Criollo-8), com um teor médio de $9,82 \text{ g kg}^{-1}$ de matéria seca; enquanto que os valores da concentração de P-total associados a 90% da produção máxima de MST variaram de $6,32$ (Himeca-101) a $11,86 \text{ g kg}^{-1}$ (Criollo-8), obtendo-se um teor médio de $9,14 \text{ g kg}^{-1}$ (Tabela 10). Isto parece indicar que no nível $1,0 \text{ mM P}$, os genótipos Criollo-1, Sefloarca-7, Sefloarca-10, Himeca-303 e Wac estariam sob efeito da toxidez, e o restante genótipo na zona de consumo de luxo.

Tabela 10 - Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre o teor foliar de P total (g kg⁻¹), equações de regressão ajustada, e níveis críticos de P-total (NC P) nas folhas, correspondentes à produção total máxima e 90% da máxima, em oito genótipos de sorgo granífero aos 67 dias após plantio.

Genótipo	Níveis de P, mM			equação ⁺⁺	r ²	NC P, g kg ⁻¹	
	0	0,5	1,0			máximo	90%
Criollo-1	1,07 ⁺ a	7,43 cd	10,10 ab	y = 1,07 + 16,43x - 7,40x ²	0,98**	8,65	8,69
Criollo-8	1,17 a	11,37 a	11,50 ab	y = 1,17 + 30,47x - 20,13x ²	1,00**	12,63	11,86
Sefloarca-7	2,27 a	7,53 cd	11,70 a	y = 2,27 + 11,63x - 2,20x ²	0,99**	10,58	9,07
Sefloarca-10	2,33 a	9,57 ab	11,27 ab	y = 2,33 + 20,00x - 11,07x ²	0,98**	10,68	10,04
Himeca-101	1,13 a	5,83 d	7,00 c	y = 1,13 + 12,93x - 7,07x ²	1,00**	6,80	6,32
Himeca-303	2,50 a	8,67 bc	11,60 ab	y = 2,60 + 15,27x - 6,27x ²	0,96**	9,80	8,76
Pioneer YSB-83	1,33 a	9,87 ab	10,20 ab	y = 1,33 + 25,27x - 16,40x ²	0,99**	11,08	10,51
Wac 8228-BR	1,83 a	6,63 d	9,83 b	y = 1,83 + 11,20x - 3,20x ²	0,99**	8,14	7,89

⁺ Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si ao nível 1% de probabilidade pelo teste de Tukey

⁺⁺ Y: P foliar total; X: níveis P

** : significativo ao nível 1% de probabilidade.

4.1.3.2. Teores solúveis de fósforo (PO_4) nas folhas +2 e +3

Os resultados da concentração de P solúvel nas folhas dos oito genótipos em função dos três níveis de P na solução nutritiva são apresentados na Tabela 11. Como no caso do P total, nenhuma diferença significativa foi encontrada quando o fósforo foi omitido (-P), embora tenha sido observado diferença de $1644 \mu\text{g g}^{-1}$ entre o teor mais alto (Himeca-101, $2150 \mu\text{g g}^{-1}$) e o mais baixo (Criollo-1, $506 \mu\text{g g}^{-1}$). A aplicação do fosfato no meio externo trouxe como consequência, acréscimo no teor interno de PO_4 ; assim, no nível intermediário, os teores aumentaram entre 862 (para Criollo-1) e 104% (Pioneer) quando comparados com a dose -P; observou-se, também, neste nível que o Criollo-8 e Sefloarca-7 caracterizaram-se por apresentar os teores mais elevados ($\sim 8000 \mu\text{g g}^{-1}$), Sefloarca-10 num nível intermediário (5608), e os 5 restantes genótipos os mais baixos valores ($< 5000 \mu\text{g g}^{-1}$). Na dose $1,0 \text{ mM P}$, os teores variaram entre 6100 (Wac) e 9840 (Himeca-303), sendo que os genótipos Criollo-1, Criollo-8, Sefloarca-7, Himeca-303 e Pioneer superaram os $8000 \mu\text{g PO}_4 \text{ g}^{-1}$.

Os níveis críticos de PO_4 nas folhas relacionados à produção máxima de MST variaram entre 3500 (Sefloarca-10) e $8185 \mu\text{g g}^{-1}$ (Criollo-8), com um teor médio de $5730 \mu\text{g de PO}_4 \text{ g}^{-1}$ de matéria seca; enquanto que a concentração de PO_4 associado a 90% da produção máxima de MST, os valores variaram de 3000 (Sefloarca-10) a $7661 \mu\text{g g}^{-1}$ (Criollo-8), obtendo-se um teor médio de $5000 \mu\text{g g}^{-1}$ (Tabela 11).

CALVACHE et al. (1994) encontraram, na dose $0,5 \text{ mM P}$, um teor de $6500 \mu\text{g de P solúvel g}^{-1}$ (na cultura do arroz); e na dose -P, $2285 \mu\text{g g}^{-1}$ (para feijoeiro). Ao comparar os resultados desta pesquisa com os da literatura, ter-se-ia que o tratamento -P, as plantas sofreram muito pela deficiência de P, enquanto que, no nível máximo de fósforo na solução externa, os genótipos sofreram por toxidez; e os teores foliares observados no nível intermédio seriam considerados adequados para o bom desenvolvimento do sorgo granífero. Teores acima de $8000 \mu\text{g g}^{-1}$ de PO_4 possivelmente estejam afetando o crescimento da planta e portanto deveriam ser considerados como excessivos.

Tabela 11 - Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre o teor foliar de PO_4 ($\mu\text{g g}^{-1}$), equações de regressão ajustadas e níveis críticos de PO_4 (NC PO_4) nas folhas, correspondente à produção total máxima e 90% da máxima, em oito genótipos de sorgo granífero, aos 67 dias após plantio.

Genótipo	Níveis de P, mM			equação $y = ax + b$	r^2	NC PO_4 , $\mu\text{g g}^{-1}$	
	0	0,5	1,0			máximo	90%
Criollo-1	506 ⁺ a	4870 c	8265 ab	$y = 506 + 9699x - 1939x^2$	0,92**	5000	4166
Criollo-8	1349 a	8314 a	9791 a	$y = 1349 + 19419x - 10977x^2$	0,98**	8185	7661
Sefloarca-7	1560 a	7822 ab	8807 ab	$y = 1560 + 17803x - 10556x^2$	0,97**	7708	7356
Sefloarca-10	1771 a	5608 bc	7085 bc	$y = 1771 + 10036x - 4772x^2$	0,91**	3500	3000
Himeca-101	2150 a	4575 c	6494 bc	$y = 2150 + 5356x - 1012x^2$	0,84**	-	-
Himeca-303	1875 a	4329 c	9840 a	$y = 1875 + 1855x - 6112x^2$	0,93**	5000	4166
Pioneer YSB-83	1939 a	3953 c	7823 ab	$y = 1939 + 2171x - 3711x^2$	0,91**	5714	4714
Wac 8228-BR	1771 a	4664 c	6100 c	$y = 1771 + 7244x - 2915x^2$	0,94**	5000	4000

+ Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si ao nível 1% de probabilidade pelo teste de Tukey

++ Y: PO_4 ; X: níveis P

** : significativo ao nível 1% de probabilidade.

A relação funcional existente entre as doses de P na solução e concentração foliar de PO_4 foi ajustado a curvas do tipo $y = a + bx - cx^2$ ($p < 0,01$).

Mais detalhes sobre níveis de deficiência, suficiência e toxidez do P total e PO_4 , e seus efeitos no crescimento das plantas, são estudados no experimento 2 desta tese.

4.1.4. Teste bioquímico para P aos 67 dias

Na Tabela 12, são apresentados os resultados da atividade da fosfatase ácida radicular ($\mu\text{mol p-NFP hidrolizado g}^{-1} \text{ MF h}^{-1}$) em função dos três níveis de P na solução nutritiva. Considerável variação genotípica foi observada no tratamento sem P, e pouca variação genotípica nos tratamentos com o P.

O Sefloarca-10 exibiu a mais alta atividade enzimática no nível 0 de P (-P), no entanto, foi elevada também, nas outras duas doses, e sem diferenças significativas entre níveis (r_s^2 não significativos). No sentido oposto, Criollo-8 e Sefloarca-7, além de apresentarem a mais baixa atividade de P-ase no tratamento carente de P, também não mostraram diferenças em relação às outras doses.

Nos tratamentos com fornecimento de P todos os genótipos apresentaram reduzida atividade da enzima, salvo Sefloarca-10.

Ao se analisarem os valores para cultivares Criollo-1, Himeca-101, Himeca-303 e Wac tem-se que a enzima foi mais ativa nas raízes das plantas sob estresse por deficiência que as das plantas fornecidas com P; sendo a grandeza da ordem de 147, 146, 152 e 48%, respectivamente, quando comparados os tratamentos extremos. Estes resultados, de se manter elevada a atividade da P-ase em resposta à deficiência de P, seriam o comportamento típico esperado (CLARK, 1975; GARCIA & ASCENCIO, 1992).

O Pioneer apresentou a conduta mais atípica de todos os genótipos, a mesma atividade nos tratamentos extremos e a mínima em 0,5 mM P.

Tabela 12 - Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre a atividade da P-ase radicular ($\mu\text{mol.g}^{-1} \text{MF.h}^{-1}$), em oito genótipos de sorgo granífero, aos 67 dias após plantio.

Genótipo	Níveis de P, mM			equação ⁺⁺	r ²
	0	0,5	1,0		
Criollo-1	9,34 ^{+bc}	5,89 b	3,78 b	$y = 9,12 - 5,66x$	0,76*
Criollo-8	5,59 d	6,35 b	4,90 b	.-	ns
Sefloarca-7	6,68 cd	5,80 b	5,31 b	.-	ns
Sefloarca-10	14,18 a	13,65 a	13,07 a	.-	ns
Himeca-101	9,92 b	4,18 b	4,04 b	$y = 9,92 - 17,09x + 11,21x^2$	0,97**
Himeca-303	9,44 bc	5,24 b	3,74 b	$y = 9,00 - 5,70x$	0,82**
Pioneer YSB-83	6,21 d	5,35 b	6,74 b	$y = 6,21 - 3,98x + 4,51x^2$	0,65*
Wac 8228-BR	7,84 bc	6,22 b	5,28 b	$y = 7,73 - 2,56x$	0,62*

* Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si ao nível 1% de probabilidade pelo teste de Tukey

⁺⁺ Y: P-ase; X: níveis P

** e *: significativo aos níveis 1 e 5% de probabilidade, respectivamente

ns: não significativo.

Dos oito genótipos, só três (Criollo-1 e os dois Himeca) exibiram visível aumento da atividade enzimática no tratamento sem P, e reduzida atividade de P-ase nas plantas suficientes em P. Os coeficientes de determinação (r^2) observados nos genótipos Pioneer (0,65) e Wac (0,62), embora estejam expressando a existência de diferenças, encontram-se no nível mínimo de significância para a aceitação do comportamento diferencial.

A concordância parcial entre estes resultados e aqueles citados na literatura pode ser consequência de terem aqueles pesquisadores trabalhando com raízes inteiras, e aqui foram utilizados somente os segmentos delas. LOUGHMAN (1987) indicou que a atividade enzimática com extratos poderia ter pouca relação em comparação ao de tecidos intactos, porque os tecidos poderiam diferir no seu conteúdo de metais, metabólitos e inibidores enzimáticos, conduzindo à inativação da enzima

durante a extração; ou diferenças na concentração protéica no interior do tecido analisado (ASCENCIO, 1994). Resultados de um estudo feito por JUMA & TABATABAI (1988) confirmaram, em parte, o anteriormente citado, concluindo que: (1) a atividade de P-ase não é distribuída uniformemente nas raízes e pelos radiculares; (2) os métodos de preparação dos materiais radiculares têm efeito marcado na magnitude da atividade enzimática; e (3) a atividade de P-ase em raízes pode ser inibida por íons metálicos a diferentes graus.

Em síntese, tomando junto estes resultados e aqueles da literatura, a atividade da P-ase em segmentos radiculares de plantas de sorgo granífero, parece não ser totalmente induzível por baixas concentrações de P (como indicado para outras espécies) e não poderiam ser sugeridas como indicador bioquímico geral da deficiência de P nesta cultura.

A Tabela 13 mostra a variação na atividade de fosfatase ácida em segmentos de folhas em resposta aos níveis de P na solução. Ao se analisar esses valores, ficou claro que a atividade enzimática foi significativamente mais elevada em todos os materiais genéticos, exceto no Criollo-8, crescidos na solução carente de P, em relação àquelas com fornecimento adequado, sendo equações quadráticas negativas ($p < 0,01$) as que melhor se ajustam a essa relação funcional. Este comportamento coincide com o mencionado por outros autores (BESFORD, 1979a,b,c; McLACHLAN, 1982, 84; BARRET-LENARD et al., 1982; McLACHLAN et al., 1987; SILVA & BASSO, 1993).

Quando comparados os genótipos em cada nível de P na solução (Tabela 13), observou-se que no tratamento 0 mM P a pior conduta foi exibida pelo Criollo-8 (atividade ~ 45% mais baixa em relação aos outros 7 genótipos). No nível 0,5 mM P houve muita variabilidade genética; os valores mais elevados foram apresentados por

Sefloarca-10, Criollo-1 e Himeca-101 e os mais baixos por Pioneer e Wac; neste mesmo tratamento, a redução do comportamento enzimático variou de 17 (Sefloarca-10) a 45% (Pioneer e Wac) em comparação à dose 0 mM P; entretanto, na dose mais elevada de fosfato, a redução da atividade enzimática foi ainda maior, situando-se a faixa diferencial entre 26 (Sefloarca-10) e 61% (Himeca-303). Neste último nível de P também houve variabilidade genética, sendo que o maior valor foi exibido por Sefloarca-10 (15,25) e os menores pelo Himeca-303 (7,84), Pioneer (7,33) e Wac (7,67 $\mu\text{mol p-NFP}$ hidrolisado por grama de matéria fresca/hora). A inexistência de diferenças observada no cultivar Criollo-8 pode ser explicada, ao menos em parte, pelo estudo de LOUGHMAN (1987), citado nas páginas 43-44.

CAMACHO & LIMA FILHO (1996)², trabalhando com dois genótipos de sorgo granífero, encontraram aumento entre 58 e 111% de atividade de P-ase foliar no tratamento com omissão de P, em relação ao tratamento suficiente (1,0 mM P). A extração foi feita 24 dias após manter as plantas sob três níveis de P na solução nutritiva e os valores de atividade enzimática variaram de 5,71 a 9,60 (para o tratamento 1,0 mM P) e de 12,04 a 15,18 $\mu\text{mol.g}^{-1} \text{MF.h}^{-1}$ (para o tratamento 0 mM P). Ao se compararem esses resultados com o desta tese, duas importantes conclusões podem ser tiradas: (1) a atividade de P-ase aumenta com a idade da cultura, como indicado por McLACHLAN (1984), e (2) a enzima é induzida pela deficiência de P, independentemente da idade das plantas.

² CAMACHO, R. & LIMA FILHO, O., 1996. (Resultados não publicados).

Tabela 13 - Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre a atividade de P-ase foliar ($\mu\text{mol.g}^{-1}\text{MF.h}^{-1}$), equações de regressão ajustadas, e atividades de P-ase foliar correspondente à produção total máxima e 90% da máxima, em oito genótipos de sorgo granífero aos 67 dias após plantio.

Genótipo	Níveis de P, mM			equação ⁺⁺	r ²	P-ase	
	0	0,5	1,0			máximo	90%
Criollo-1	20,25 ⁺ a	15,59 ab	9,08 bc	y = 20,25 - 7,48x - 3,69x ²	0,99**	14,38	15,70
Criollo-8	11,07 b	12,37 cd	11,36 b	-, -	ns	-	-
Sefloarca-7	19,90 a	11,40 de	10,22 bc	y = 19,90 - 24,34x + 14,66x ²	0,97**	10,19	10,64
Sefloarca-10	20,74 a	17,31 a	15,25 a	y = 20,74 - 8,20x + 2,71x ²	0,86**	15,03	15,20
Himeca-101	19,46 a	15,33 ab	8,36 bc	y = 19,46 - 5,41x - 5,69x ²	0,96**	12,94	14,02
Himeca-303	19,87 a	13,53 bc	7,84 c	y = 19,87 - 13,31x + 1,29x ²	0,99**	12,96	13,92
Pioneer YSB-83	18,34 a	10,02 e	7,33 c	y = 18,34 - 22,26x + 11,25x ²	0,96**	7,86	8,40
Wac 8228-BR	17,64 a	9,62 e	7,65 c	y = 17,64 - 22,06x + 12,07x ²	0,97**	8,69	9,23

⁺ Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si ao nível 1% de probabilidade pelo teste de Tukey

⁺⁺ Y: P-ase; X = nível P.

** : significativo ao nível 1% de probabilidade; ns: não significativo.

BESFORD (1979b) ao comparar a nutrição com P e atividade de P-ase, em folhas de 7 espécies de plantas, encontrou que a deficiência de P produzia um acréscimo nos valores desta enzima em todas as espécies utilizadas, salvo em arroz anão, sugerindo que é possível usar a atividade da P-ase como indicador bioquímico da deficiência de P nas culturas, exceto em arroz anão. Segundo McLACHLAN (1982), a atividade de P-ase é uma medida muito sensível do estado nutricional num momento particular da planta.

A pouca sensibilidade de P-ase observada nas raízes, quando comparada a exibida nas folhas, parece indicar que a atividade de P-ase em segmentos foliares constituiu a melhor medida de que as secções de raízes, para diagnosticar o estado do P em plantas de sorgo granífero. Além disso, sob condições de campo, as folhas são mais acessíveis que as raízes, e a medida da P-ase nestes órgãos é um procedimento "não destrutivo"; em consequência, a medida da P-ase em segmentos de folhas poderia ter uma aplicação geral como indicador do estado nutricional do P presente na planta.

4.1.5. Relação entre teor foliar de fósforo e da atividade de P-ase com o crescimento das plantas

Na Tabela 14 apresenta-se a relação existente entre rendimento da matéria seca de raízes (MSR) e o teor foliar de P total. Nesta fase do desenvolvimento, até certo limite, observaram-se acréscimos na produção de matéria seca radicular em função da concentração do P total; equações do tipo quadrática, com um ponto de máximo, são as que melhor ajustam essa relação, para todos os genótipos, exceto para o Himeca-101, que exibiu crescimento exponencial positivo.

Na mesma ordem de idéias, foi observada uma relação quadrática significativa para a produção de MSPA, em função do teor de P total, para sete dos genótipos. O Criollo-8 e o Himeca-101 incrementam seu rendimento total com

acréscimos na concentração interna de P, nos restantes seis genótipos, curvas quadráticas, com produção máxima, deram melhor ajuste (Tabela 14).

Ao se estudar a produção de matéria seca de raízes em função do teor de P solúvel, tem-se um comportamento diferencial para os genótipos em estudo (Tabela 15); assim, nos materiais Criollo-1, Sefloarca-10, Pioneer e Wac, curvas do tipo $y = \pm a + bx - cx^2$ foram ajustados aos dados. A relação entre esta forma de fósforo e MSR foi, também, curvilínea, mas modelo matemático do tipo $y = ae^{bx}$ deu melhor ajuste aos genótipos Criollo-8 e Sefloarca-7. Não foi observada relação funcional nos genótipos Himeca-101 e Himeca-303.

A relação entre PO_4 e rendimento da parte aérea foi ajustada a modelos quadráticos, com um ponto de máximo, para os genótipos Criollo-1, Sefloarca-10, Himeca-303, Pioneer e Wac; nos três genótipos restantes, curvas do tipo $y = ae^{bx}$ deram melhor ajuste (Tabela 15). A produção de matéria seca total seguiu a mesma tendência do rendimento da parte aérea, exceto para o Himeca-101, no qual observa-se que o teor foliar aumenta sem que o faça a MST.

Sobre a base de produção de matéria seca, a relação entre duas formas de fósforo e o rendimento da MSPA e MST, foi melhor ajustado por curvas do tipo $y = \pm a + bx - cx^2$ e $y = ae^{bx}$. Assim, as concentrações de P total e P inorgânico poderiam ser correlatas com o rendimento da planta.

Por outro lado, a relação quadrática observada, com um ponto de máximo rendimento para MSPA a uma determinada concentração interna de fósforo, parece indicar que 7 dos 8 genótipos estão sofrendo por toxidez desse macronutriente, ou estariam no limiar dessa zona (MARSCHNER, 1986). Estes resultados comprovam os de CAMACHO & MALAVOLTA (1996), que observaram genótipos de sorgo granífero na zona de consumo de luxo, e o Prosorgo-II na zona de toxidez, quando incrementou o teor foliar de P total.

Tabela 14 - Equações de regressão e coeficientes de determinação (r^2) para produção de matéria seca de raízes (MSR), parte aérea (MSPA) e total (MST) em função do teor foliar de P total.

Genótipo	Relação		
	P total x MSR	P total x MSPA	P total x MST
Criollo-1	$y = -0,62 + 1,00x - 0,06x^2$ $r^2 = 0,98^{**}$	$y = 1,15 + 3,06x - 0,17x^2$ $r^2 = 0,94^{**}$	$y = -1,77 + 4,07x - 0,23x^2$ $r^2 = 0,96^{**}$
Criollo-8	$y = -3,96 + 2,95x - 0,26x^2$ $r^2 = 0,96^{**}$	$y = -8,61 + 6,98x - 0,57x^2$ $r^2 = 0,96^{**}$	$y = 1,54 e^{0,17}$ $r^2 = 0,96^{**}$
Sefloarca-7	$y = -2,92 + 1,67x - 0,10x^2$ $r^2 = 0,72^*$	$y = -5,76 + 3,40x - 0,17x^2$ $r^2 = 0,96^{**}$	$y = -8,68 + 5,08x - 0,28x^2$ $r^2 = 0,92^{**}$
Sefloarca-10	$y = -1,21 + 0,94x - 0,04x^2$ $r^2 = 1,00^{**}$	$y = -5,63 + 3,68x - 0,19x^2$ $r^2 = 0,98^{**}$	$y = -6,83 + 4,62x - 0,23x^2$ $r^2 = 0,98^{**}$
Himeca-101	$y = 0,37 e^{0,39x}$ $r^2 = 0,90^{**}$	$y = 1,13 e^{0,38x}$ $r^2 = 0,96^{**}$	$y = 1,50 e^{0,38x}$ $r^2 = 0,94^{**}$
Himeca-303	$y = -3,99 + 1,91x - 0,11x^2$ $r^2 = 0,98^{**}$	$y = 12,14 + 5,78x - 0,33x^2$ $r^2 = 1,00^{**}$	$y = -16,17 + 7,71x - 0,44x^2$ $r^2 = 1,00^{**}$
Pioneer YSB-83	$y = -0,56 + 0,86x - 0,04x^2$ $r^2 = 1,00^{**}$	$y = -3,05 + 3,86x - 0,23x^2$ $r^2 = 1,00^{**}$	$y = -3,61 + 4,72x - 0,27x^2$ $r^2 = 1,00^{**}$
Wac 8228-BR	$y = -4,52 + 3,08x - 0,22x^2$ $r^2 = 0,94^{**}$	$y = -7,23 + 5,13x - 0,30x^2$ $r^2 = 0,94^{**}$	$y = -11,74 + 8,21x - 0,52x^2$ $r^2 = 0,94^{**}$

* e **: significativo aos níveis 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

Tabela 15 - Equações de regressão e coeficientes de determinação (r^2) para produção de matéria seca de raízes (MSR), parte aérea (MSPA) e total (MST) em função do teor foliar de P solúvel(PO_4)

Genótipo	Relação		
	PO_4 x MSR	PO_4 x MSPA	PO_4 x MST
Criollo-1	$y = -0,16 + 0,001x - 0,0000008x^2$ $r^2 = 0,96^{**}$	$y = 0,22 + 0,004x - 0,0000005x^2$ $r^2 = 0,94^{**}$	$y = 0,06 + 0,005x - 0,0000003x^2$ $r^2 = 0,94^{**}$
Criollo-8	$y = 0,20 e^{0,0003x}$ $r^2 = 0,83^{**}$	$y = 1,28 e^{0,0002x}$ $r^2 = 0,90^{**}$	$y = 2,50 e^{0,0002x}$ $r^2 = 0,88^{**}$
Sefloarca-7	$y = 0,24 e^{0,0003x}$ $r^2 = 0,79^{**}$	$y = 0,68 e^{0,0003x}$ $r^2 = 0,94^{**}$	$y = 1,51 e^{0,0003x}$ $r^2 = 0,92^{**}$
Sefloarca-10	$y = -2,84 + 0,002x - 0,0000002x^2$ $r^2 = 0,98^{**}$	$y = -11,72 + 0,009x - 0,0000008x^2$ $r^2 = 1,00^{**}$	$y = -14,56 + 0,01x - 0,0000001x^2$ $r^2 = 1,00^{**}$
Himeca-101	ns	$y = 1,16 e^{0,0004x}$ $r^2 = 0,61^*$	ns
Himeca-303	ns	$y = -8,84 + 0,007x - 0,0000005x^2$ $r^2 = 0,72^*$	$y = -11,57 + 0,009x - 0,0000006x^2$ $r^2 = 0,74^*$
Pioneer YSB-83	$y = -2,29 + 0,002x - 0,0000001x^2$ $r^2 = 0,77^*$	$y = -8,36 + 0,007x - 0,0000005x^2$ $r^2 = 0,81^{**}$	$y = -10,66 + 0,009x - 0,0000007x^2$ $r^2 = 0,81^{**}$
Wac 8228-BR	$y = -5,90 + 0,004x - 0,0000004x^2$ $r^2 = 0,79^{**}$	$y = -13,75 + 0,01x - 0,0000009x^2$ $r^2 = 0,96^{**}$	$y = -19,66 + 0,01x - 0,0000001x^2$ $r^2 = 0,94^{**}$

* e **: significativo aos níveis 5 e 1 %, respectivamente; ns: não significativo.

Na Tabela 16 apresenta-se a relação entre rendimento da matéria seca em função da P-ase nos tecidos radiculares. Neste sentido, a produção de MSR, MSPA e MST, foi negativamente correlacionada à atividade enzimática, e o modelo do tipo $y = a - bx$ ($p < 0,05$) deu melhor ajuste nos genótipos Criollo-1 e Sefloarca-7; no entanto, nos genótipos Himeca-101 e Wac a relação funcional é melhor explicado por curvas do tipo exponencial ($p < 0,01$); para o cultivar Himeca-303, o modelo de regressão quadrática é o que melhor se ajusta a essa relação. Nenhuma relação foi observada nos outros 3 genótipos.

Embora do ponto de vista estatístico a relação entre o crescimento e a atividade de P-ase foliar (Tabela 17) seja bem mais estreita ($p < 0,01$), em 7 dos 8 genótipos, quando comparada ao caso anterior (Tabela 16), o esperado seria um aumento nas variáveis do crescimento com a diminuição da atividade enzimática, como foi observado nos genótipos Sefloarca-7, Sefloarca-10 e Wac. Para o Criollo-8, variações do crescimento (em peso de matéria seca) não são explicados pela atividade enzimática no tecido foliar; nos restantes materiais genéticos, o modelo de regressão quadrática, com um ponto de máximo, explicou a relação existente.

A relação entre atividade de fosfatase ácida e o estado interno do fósforo na planta é apresentada na Tabela 18. Assim, a relação entre a atividade enzimática no tecido foliar e a concentração de P total nas folhas foi inversa e linear ($p < 0,01$) nos genótipos Criollo-1, Sefloarca-10, Himeca-303, Pioneer e Wac; embora, essa mesma relação apresentou-se quadrática ($p < 0,01$) para os genótipos Sefloarca-7 e Himeca-101. Variações no teor foliar de P total não foram acompanhados por alterações na atividade de P-ase, no Criollo-8.

Ao se estudar a atividade de P-ase foliar, em função do PO_4 foliar (Tabela 18), observou-se o comportamento esperado em 7 dos 8 cultivares. Neste caso, acréscimos no teor de P solúvel acarretaram baixa atividade da enzima, e o modelo $y = a - bx$ deu melhor ajuste; entanto, para o Pioneer, a relação foi curvilínea ($y = ae^{-bx}$). O híbrido Criollo-8 não apresentou variações no teor de substrato hidrolizado com variações nos teores de PO_4 .

Tabela 16 - Equações de regressão e coeficientes de determinação (r^2) para produção de matéria seca de raízes (MSR), parte aérea (MSPA) e total (MST), em função da atividade de fosfatase radicular (P-ase r).

Genótipo	Relação		
	P-ase r x MSR	P-ase r x MSPA	P-ase r x MST
Criollo-1	$y = 5,38 - 0,46x$ $r^2 = 0,62^*$	$y = 17,98 - 1,46x$ $r^2 = 0,58^*$	$y = 23,36 - 1,92x$ $r^2 = 0,58^*$
Criollo-8	ns	ns	ns
Sefloarca-7	$y = 10,86 - 1,46x$ $r^2 = 0,52^*$	$y = 30,41 - 3,92x$ $r^2 = 0,56^*$	$y = 41,27 - 5,38x$ $r^2 = 0,58^*$
Sefloarca-10	ns	ns	ns
Himeca-101	$y = 19,47 e^{-0,36x}$ $r^2 = 0,94^{**}$	$y = 50,78 e^{-0,34x}$ $r^2 = 0,94^{**}$	$y = 70,66 e^{-0,34x}$ $r^2 = 0,94^{**}$
Himeca-303	$y = -1,34 + 1,90x - 0,18x^2$ $r^2 = 0,86^{**}$	$y = -0,17 + 5,24x - 0,54x^2$ $r^2 = 0,92^{**}$	$y = -1,48 + 7,12x - 0,72x^2$ $r^2 = 0,90^{**}$
Pioneer YSB-83	ns	ns	ns
Wac 8228-BR	$y = 176,34 e^{-0,70x}$ $r^2 = 0,52^*$	$y = 417,99 e^{-0,66x}$ $r^2 = 0,53^*$	$y = 593,82 e^{-0,67x}$ $r^2 = 0,53^*$

* e **: significativo aos níveis 5 e 1 %, respectivamente; ns: não significativo.

Tabela 17 - Equações de regressão e coeficientes de determinação (r^2) para produção de matéria seca de raízes (MSR), parte aérea (MSPA) e total (MST) em função da atividade de fosfatase foliar (P-ase f).

Genótipo	Relação		
	P-ase f x MSR	P-ase f x MSPA	P-ase f x MST
Criollo-1	$y = -6,58 + 1,70x - 0,07x^2$ $r^2 = 0,96^{**}$	$y = -17,35 + 5,07x - 0,20x^2$ $r^2 = 0,94^{**}$	$y = -23,93 + 6,77x - 0,27x^2$ $r^2 = 0,96^{**}$
Criollo-8	ns	ns	ns
Sefloarca-7	$y = 30,39 e^{-0,22x}$ $r^2 = 0,83^{**}$	$y = 126,01 e^{-0,24x}$ $r^2 = 0,92^{**}$	$y = 158,76 e^{-0,23x}$ $r^2 = 0,90^{**}$
Sefloarca-10	$y = 373,93 e^{-0,29x}$ $r^2 = 0,74^{**}$	$y = 1346,27 e^{-0,30x}$ $r^2 = 0,67^{**}$	$y = 1707,44 e^{-0,30x}$ $r^2 = 0,69^{**}$
Himeca-101	$y = -11,73 + 2,90x - 0,12x^2$ $r^2 = 0,91^{**}$	$y = -14,53 + 5,30x - 0,23x^2$ $r^2 = 0,98^{**}$	$y = -26,25 + 8,20x - 0,35x^2$ $r^2 = 0,94^{**}$
Himeca-303	$y = -5,15 + 1,48x - 0,06x^2$ $r^2 = 0,94^{**}$	$y = -10,46 + 4,09x - 0,18x^2$ $r^2 = 0,96^{**}$	$y = -15,72 + 5,58x - 0,24x^2$ $r^2 = 0,96^{**}$
Pioneer YSB-83	$y = 2,64 + 0,37x - 0,03x^2$ $r^2 = 0,98^{**}$	$y = 5,98 + 1,67x - 0,10x^2$ $r^2 = 0,98^{**}$	$y = 8,62 + 2,04x - 0,13x^2$ $r^2 = 0,98^{**}$
Wac 8228-BR	$y = -12,55 + 3,34x - 0,15x^2$ $r^2 = 0,90^{**}$	$y = 25,93 - 1,39x$ $r^2 = 0,94^{**}$	$y = -6,42 + 5,49x - 0,29x^2$ $r^2 = 0,96^{**}$

* e **: significativo aos níveis 5 e 1 %, respectivamente; ns: não significativo.

Tabela 18 - Equações de regressão e coeficientes de determinação (r^2) para fósforo foliar solúvel (PO_4) e atividade de fosfatase foliar (P-ase f), em função do teor foliar de P total (P total); atividade de P-ase f, em função de PO_4 ; e entre atividade de fosfatase radicular (P-ase r) em função do fósforo radicular total (P radicular).

Genótipo	Relação			
	P total x PO_4	P total x P-ase f	PO_4 x P-ase f	P radicular x P-ase r
Críollo-1	$y = 566 + 824x$ $r^2 = 0,92^{**}$	$y = 21,89 - 1,11x$ $r^2 = 0,86^{**}$	$y = 21,06 - 0,001x$ $r^2 = 0,92^{**}$	$y = 10,97 - 1,25x$ $r^2 = 0,74^{**}$
Críollo-8	$y = 459,17 + 752,14x$ $r^2 = 0,96^{**}$	ns	ns	ns
Sefloarca-7	$y = 469,55 + 780,48x$ $r^2 = 0,86^{**}$	$y = 25,91 - 2,99x + 0,14x^2$ $r^2 = 0,96^{**}$	$y = 21,79 - 0,001x$ $r^2 = 0,94^{**}$	ns
Sefloarca-10	$y = 428,61 + 568,84x$ $r^2 = 0,90^{**}$	$y = 22,14 - 0,57x$ $r^2 = 0,83^{**}$	$y = 21,97 - 0,001x$ $r^2 = 0,71^{**}$	ns
Himeca-101	$y = 1679,54 e^{0,18x}$ $r^2 = 0,81^{**}$	$y = 15,05 + 4,83x - 0,82x^2$ $r^2 = 0,94^{**}$	$y = 23,17 - 0,002x$ $r^2 = 0,69^{**}$	$y = 21,24 - 10,69x + 1,60x^2$ $r^2 = 0,96^{**}$
Himeca-303	$y = 1106 e^{0,18x}$ $r^2 = 0,94^{**}$	$y = 22,97 - 1,21x$ $r^2 = 0,88^{**}$	$y = 20,74 - 0,001x$ $r^2 = 0,83^{**}$	$y = 17,57 - 5,72x + 0,56x^2$ $r^2 = 0,80^*$
Pioneer YSB-83	$y = 1638,36 e^{0,12x}$ $r^2 = 0,71^{**}$	$y = 19,74 - 1,10x$ $r^2 = 0,88^{**}$	$y = 21,70 e^{-0,0001x}$ $r^2 = 0,85^{**}$	ns
Wac 8228-BR	$y = 836,05 + 547,93x$ $r^2 = 0,94^{**}$	$y = 19,45 - 1,28x$ $r^2 = 0,94^{**}$	$y = 21,20 - 0,002x$ $r^2 = 0,94^{**}$	ns

* e **: significativo aos níveis 5 e 1 %, respectivamente; ns: não significativo.

Pouca relação foi observada quando se estudou a atividade da enzima nas raízes dos oito genótipos, em função do P total radicular (Tabela 18). Neste sentido, nenhuma interação significativa foi exibida em 5 dos genótipos, e em dois deles (os Himeca) a relação foi do tipo $y = a - bx + cx^2$. Somente o Criollo-1 apresentou a conduta esperada, e uma equação de primeiro grau ($y = a - bx$) explicou melhor essa relação funcional. Estes resultados são contrários aos de BOUTIN et al. (1981) e GARCIA (1990), que observaram aumentos na atividade enzimática com diminuição na concentração do fósforo nas raízes.

O comportamento da P-ase ácida, em função dos teores de fósforo nos diferentes tecidos, observada neste estudo, pode ser explicado, ao menos em parte, da seguinte maneira: a baixa atividade nas raízes deve-se ao fato de que a concentração de P total nesse órgão, no tratamento carente de P, é mais elevada que para as folhas em 5 dos 8 genótipos e, ainda, nos outros 3 genótipos continua alta (Figura 9); o que parece indicar que os genótipos têm baixa capacidade para transportar fosfatos à parte aérea. Em algumas espécies, entre delas os cereais, onde a atividade de fosfomanoisomerase é baixa, a entrada de fosfato pode ser retida na forma de manose-6-fosfato (M-6-P) nas raízes, evitando o transporte ascendente do P_i ; em consequência o M-6-P não poderia ser utilizado via glicose-6-fosfato (G-6-P) na usual rota glicolítica (LOUGHMAN et al., 1983).

Uma vez que o fosfato é retido nas raízes, o transporte a longa distância ou a redistribuição do nutriente dentro da planta (ver comportamento do Criollo-8 na Tabela 12), se reduz drasticamente; assim, a deficiência do fósforo na parte aérea dispara o gatilho para a aparição de duas isoenzimas (BIELESKI & JOHNSON, 1972; BARRET-LENARD et al., 1982), ou para que ocorra a "*síntese de novo*" da fosfatase, que estaria sob o controle de algumas das formas de fósforo na célula, provavelmente

Figura 9 - Teor de fósforo na matéria de raízes e folhas de 8 genótipos de sorgo granífero crescendo em 0; 0,5 e 1,0 mM P na solução nutritiva (média de 3 repetições).

da espécie inorgânica, mediante um mecanismo de indução/repressão (BOUTIN et al., 1981). Estas duas hipóteses parecem ser a causa do aumento na atividade de fosfatase como consequência da deficiência de P. As fosfatases agem como agente de liberação de fósforo inorgânico tornando-o diretamente disponível para o uso das plantas (BESFORD, 1979 c). Recentemente, tem sido indicado que a atividade enzimática pode ser regulada de duas formas: (1) mudando a concentração da enzima, e (2) por alterar o estado de atividade das moléculas enzimáticas existentes (MOHR & SCHOPPER, 1995).

Ao se acrescentar a concentração de P (total e solúvel) nos tecidos, seja por aplicação do fósforo no meio externo (como foi para este estudo) ou por defosforilação dos ésteres fosfóricos, e a homeostase for alcançada, dispara-se outro gatilho que inativa a P-ase. Assim, o fosfato constitui o metabolito que age como modulador (efetor) alostérico da fosfatase ácida, regulando o metabolismo energético (MOHR & SCHOPFER, 1995, p.81 a 85).

4.1.6. Avaliação do estado nutricional

Para verificar a eficiência dos métodos de avaliação do estado nutricional, fizeram-se análises de regressão e, estabelecidos os coeficientes de determinação entre produção de matéria seca e: (1) teor foliar de P total; (2) teor foliar PO_4 ; (3) atividade de P-ase. Igualmente, entre teor foliar de P total e: (4) teor foliar de PO_4 ; (5) atividade de P-ase foliar. Mesmo assim, entre (6) teor foliar de PO_4 e atividade de P-ase foliar; e (7) teor radicular de P total e atividade de P-ase radicular.

Nesta pesquisa foi usada a produção de fitomassa, e não a comercial, como parâmetro do rendimento, o que LOCKMAN (1972 b) correlacionou a concentra-

ção de nutrientes e rendimento do grão a vários estágios do crescimento, e concluiu que as concentrações de P foram correlatas com o rendimento em todos os estágios estudados.

Os métodos de avaliação do estado nutricional do sorgo granífero foram relacionados com a produção da matéria seca. Observou-se, dentro de limites, aumentos na produção da matéria seca (radicular, da parte aérea e total) com o acréscimo dos teores foliares de P total (Figura 10 a) e P solúvel (Figura 11 a), e do P total nas raízes (Figura 14 a); não obstante, aumento na atividade de P-ase foliar acarretou diminuição da matéria seca (Figura 12). A matéria seca apresentou uma regressão quadrática com os métodos estudados, verificando-se a seguinte ordem nas relações: P foliar total > PO_4 foliar > atividade de P-ase foliar; assim, a diagnose foliar parece ser mais efetiva como indicadora do rendimento da planta, em estágios tardios do desenvolvimento vegetativo. CAMACHO & MALAVOLTA (1996) encontraram relação linear positiva para produção de matéria seca e P total nas folhas no estágio inicial do desenvolvimento vegetativo, em 6 genótipos de sorgo granífero. Da mesma forma, McLACHLAN et al. (1987) observaram que as concentrações de P total e inorgânico foram relacionadas com o rendimento da planta, no entanto, a primeira espécie citada teve melhor comportamento que o Pi. SILVA & BASSO (1993), observaram também, na cultura de cana-de-açúcar, correlação inversa entre a atividade de P-ase e a produção de matéria seca.

Regressão linear positiva ($p < 0,01$) foi encontrada ao se comparar o P total foliar com o teor de PO_4 (Figura 10 b). No entanto, a atividade da P-ase foliar apresentou relação linear negativa ($p < 0,01$) com as concentrações PO_4 (Figura 11 b) e de P total (Figura 13) nas folhas; igualmente, a relação entre P total radicular e a atividade de P-ase radicular (Figura 14 b) foi ajustada ao modelo de regressão linear (p

$< 0,05$), sendo que esta última mostrou-se bem menos estreita ($r^2 \approx 0,16$) que a correlação P-ase foliar x P total foliar ($r^2 \approx 0,47$) [Figura 13]. Estes resultados estão de acordo com os de McLACHLAN (1982) e SILVA & BASSO (1993), que verificaram correlação inversa entre a atividade de fosfatase nas folhas de trigo e cana-de-açúcar, respectivamente, e os teores de P na planta. Da mesma maneira, FURLANI et al. (1984), no sorgo granífero, demonstraram que a alta atividade de P-ase radicular estava associada com baixas concentrações de P radicular.

Em síntese, os resultados permitem concluir que a atividade enzimática da fosfatase ácida pode auxiliar no diagnóstico do estado de nutrição fosfórica em sorgo granífero; mas, contrário a McLACHLAN et al. (1987), não foi melhor indicador que a diagnose foliar, neste estágio de desenvolvimento das plantas. Aliado a isto, tem sido demonstrado que os efeitos da idade da planta e o estresse de água marcaram a interpretação da relação entre atividade de P-ase e rendimento (McLACHLAN, 1984), sendo este último fator muito importante sob condições de campo sem irrigação; além disso, parece que as fosfatases não são as únicas enzimas envolvidas com a liberação de fósforo em plantas de sorgo (RAJAGOPALAN et al., 1994). Por outro lado, a diagnose foliar mediante o uso do PO_4 , merece atenção por se constituir, em alguns casos, num método rápido, seguro e sensível, indicador do estado nutricional em P, como verificado por SAARELA (1990).

Figura 10 - Relação entre teor foliar de P total e: (a) produção de matéria seca, e (b) teor foliar de PO₄, em 8 genótipos de sorgo granífero. R² significativo ao nível 1% de probabilidade.

Figura 11 - Relação entre teor foliar de PO_4 e: (a) produção de matéria seca, e (b) atividade de P-ase foliar em 8 genótipos de sorgo granífero. R^2 significativo ao nível 1% de probabilidade.

Figura 12 - Relação entre atividade de P-ase foliar e produção de matéria seca, em 8 genótipos de sorgo granífero. R^2 significativo ao nível 1% de probabilidade.

Figura 13 - Relação entre teor foliar de P total e atividade de P-ase foliar, em 8 genótipos de sorgo granífero. R^2 significativo ao nível 1% de probabilidade.

Figura 14 - Relação entre teor radicular de P total e: (a) produção de matéria seca, e (b) de P-ase radicular de 8 genótipos de sorgo granífero. * e ** significativo aos níveis 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

4.2. Experimento 2

4.2.1. Produção da matéria seca aos 41 dias³

Na Tabela 19 encontram-se os resultados da produção de matéria seca nas raízes. Observaram-se as diferenças significativas ($p < 0,01$) para a interação híbrido x nível, exceto para os genótipos do tratamento completo, que cresceram na concentração mais alta de P.

No tratamento carente de P os valores médios variaram de um mínimo de 0,37 g para o híbrido Criollo-8, a um máximo de 0,92 g para o Himeca-101. A 0,5 mM P, Himeca-101 aumenta em 200% seu peso seco radicular (0,81 g), quando comparado ao híbrido menos produtivo (Pioneer).

Observa-se também, que as variações nos níveis de P na solução externa, foram acompanhadas por variações significativas no peso da matéria seca da raiz (Tabela 18). Assim, para todos os genótipos exceto Criollo-8, os maiores valores sempre foram alcançados no tratamento carente de P, ajustando-se os tratamentos a curvas quadráticas (Criollo-1 e Criollo-8) e lineares (os outros genótipos restantes) do crescimento. Estes resultados concordam com outros obtidos nas culturas do feijoeiro (GERLOFF, 1976; RYCHTER & RANDALL, 1994) e milho (ANGHINONI & BARBER, 1980).

Num trabalho recente, CAMACHO & MALAVOLTA (1996) não encontraram variações significativas no peso da matéria seca radicular de 5 genótipos de sorgo granífero com o incremento dos níveis de P na solução nutritiva. Só no genótipo Chaguaramas-III foi encontrada correlação do tipo linear e positiva. Embora

³ Estágio de crescimento: folha mais nova visível do conjunto superior (VANDERLIP & REEVES, 1972).

seja a mesma espécie, as diferenças podem ser devido àqueles que colheram as plantas num estado inicial do desenvolvimento vegetativo (35 dias após plantio), e no tratamento -P as plantas permaneceram 15 dias só.

Tabela 19 - Efeitos dos níveis de P na solução nutritiva sobre o peso da matéria seca radicular (g planta^{-1}), em oito genótipos de sorgo granífero, aos 41 dias após plantio.

Genótipo	Níveis de P, mM			equação	r^2
	0	0,5	1,0		
Criollo-1	0,57 ^a b	0,39 b	0,42 a	$y = 0,57 - 0,57x + 0,43x^2$	1,00**
Criollo-8	0,37 c	0,57 b	0,40 a	$y = 0,37 + 0,76x - 0,73x^2$	1,00**
Sefloarca-7	0,59 b	0,41 b	0,29 a	$y = 0,58 - 0,31x$	0,99**
Sefloarca-10	0,45 b	0,33 c	0,32 a	$y = 0,43 - 0,13x$	0,81*
Himeca-101	0,92 a	0,81 a	0,46 a	$y = 0,96 - 0,46x$	0,91**
Himeca-303	0,64 b	0,43 b	0,39 a	$y = 0,62 - 0,25x$	0,87**
Pioneer YSB-83	0,42 b	0,27 d	0,24 a	$y = 0,40 - 0,18x$	0,87**
Wac 8228-BR	0,60 b	0,52 b	0,47 a	$y = 0,59 - 0,13x$	0,99**

* Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si ao nível 1% de probabilidade pelo teste de Tukey

** Y: matéria seca; X: níveis P

** e *: significativo aos níveis 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.

Na Tabela 20 estão os resultados do rendimento da matéria seca da parte aérea. Onde se observa que a deficiência de P ocasionou redução substancial da fitomassa, sendo que o melhor comportamento evidenciou-se nos genótipos Himeca-101, Sefloarca-7, Wac 8228-Br e Himeca-303, cujos rendimentos incrementam-se em 144, 92, 78 e 74% quando comparados com o Criollo-8, que é o genótipo menos produtivo (0,77 g).

Igualmente, observou-se uma capacidade genotípica diferencial por acumulação de matéria seca no tratamento 0,5 mM P. Himeca-101 (2,77 g), Criollo-8

(2,32 g), Criollo-1 (2,28 g) e Sefloarca-7 (2,19 g) constituem o grupo homogêneo superior.

Tabela 20 - Efeitos dos níveis de P na solução nutritiva sobre a produção da matéria seca da parte aérea (g planta⁻¹), em oito genótipos de sorgo granífero, aos 41 dias após plantio

Genótipo	Níveis de P			equação ⁺⁺	r ²
	0	0,5	1,0		
Criollo-1	0,90 ^b	2,28 a	1,89 a	$y = 0,90 + 4,53x - 3,54x^2$	1,00**
Criollo-8	0,77 c	2,32 a	2,04 a	$y = 0,77 + 4,93x - 3,67x^2$	1,00**
Sefloarca-7	1,48 a	2,19 a	1,73 a	$y = 1,48 + 2,61x - 2,36x^2$	1,00**
Sefloarca-10	0,96 b	1,79 b	1,86 a	$y = 0,96 + 2,43x - 1,53x^2$	1,00**
Himeca-101	1,88 a	2,77 a	1,91 a	$y = 1,88 + 3,54x - 3,51x^2$	1,00**
Himeca-303	1,34 a	1,98 b	1,71 a	$y = 1,34 + 2,20x - 1,83x^2$	1,00**
Pioneer YSB-83	1,05 b	1,68 b	1,50 a	$y = 1,05 + 2,08x - 1,63x^2$	1,00**
Wac 8228-BR	1,37 a	2,03 b	1,87 a	$y = 1,37 + 2,13x - 1,63x^2$	1,00**

⁺ Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si ao nível 1% de probabilidade pelo teste de Tukey

⁺⁺ Y: matéria seca; X: níveis P

** : significativo ao nível 1% de probabilidade.

A redução do peso da matéria seca da parte aérea por efeito do tratamento -P concordam com os obtidos nas culturas de cevada (CLARKSON & SCATERGOOD, 1982), do tomateiro (CLARKSON & SCATERGOOD, 1982; RESENDE & BARBER, 1984), feijoeiro (GERLOFF, 1976; RYCHTER & RANDALL, 1994), trevo (GOURLEY et al., 1993), milho (HAJABBASI & SCHUMACHER, 1994) e sorgo (CAMACHO & MALAVOLTA, 1996), sendo o efeito mais acentuado na taxa de crescimento da parte aérea que nas raízes.

O peso da matéria seca total teve tendência similar ao rendimento da parte aérea nos tratamentos extremos de P (Tabela 21). No nível 0, os maiores valores

são apresentados pelos genótipos Himeca-101 e Sefloarca-7, Himeca-303 e Wac-8228-BR; porém, sem comportamento genotípico diferencial na máxima concentração de P. No nível 0,5 mM P encontram-se as maiores produções, exceto para Sefloarca-10.

Ao se estudar a conduta de cada material genético nos três níveis de P observa-se a inexistência de variações significativas na matéria seca total em Himeca-303 e Pioneer (Tabela 20). A relação funcional existente para os 5 genótipos é do tipo quadrática ($p < 0,01$).

Tabela 21 - Efeitos dos níveis de P na solução nutritiva sobre a produção da matéria seca total (g planta⁻¹), em oito genótipos de sorgo granífero, aos 41 dias após plantio.

Genótipo	Níveis de P, mM			equação ⁺⁺	r ²
	0	0,5	1,0		
Criollo-1	1,47 ^{+b}	2,65 b	2,31 a	$y = 1,47 + 3,88x - 3,04x^2$	1,00**
Criollo-8	1,14 c	2,89 a	2,44 a	$y = 1,14 + 5,69x - 4,39x^2$	1,00**
Sefloarca-7	2,07 a	2,60 b	2,01 a	$y = 2,07 + 2,18x - 2,24x^2$	1,00**
Sefloarca-10	1,41 b	2,12 b	2,18 a	$y = 1,41 + 2,08x - 1,31x^2$	0,81*
Himeca-101	2,79 a	3,58 a	2,37 a	$y = 2,79 + 3,57x - 3,99x^2$	1,00**
Himeca-303	1,98 a	2,42 b	2,10 a	.-	ns
Pioneer YSB-83	1,46 b	1,98 c	1,74 a	.-	ns
Wac 8228-BR	1,97 a	2,55 b	2,33 a	$y = 1,97 + 1,97x - 1,60x^2$	1,00*

⁺ Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si ao nível 1% de probabilidade pelo teste de Tukey

⁺⁺ Y: matéria seca; X: níveis P

** e *: significativo ao nível de 1 e 5% de probabilidade, respectivamente; ns: não significativo.

Essa relação quadrática, com um ponto de máximo (tanto para produção de matéria seca na parte aérea, quanto matéria seca total), revela que os genótipos estão sob efeito de estresse, nos níveis extremos de P, com deficiência no nível 0 e excesso

no nível de 1,0 mM P. É possível que Himeca-101 seja o híbrido mais afetado por excesso de P no meio externo, ao reduzir o rendimento em 34%, embora esteja apresentando o melhor comportamento no tratamento - P, seguido pelo Sefloarca-7 (redução de 23%).

Na Tabela 22 apresentam-se os nível de P na solução externa, necessários para promover o máximo rendimento e 90% do máximo, respectivamente. Assim, Sefloarca-7 e Himeca-101 precisaram de aproximadamente 0,5 mM P para expressar a máxima produção de MST, enquanto que o Sefloarca-10 necessitou de uma concentração mais elevada (0,79 mM P) para alcançar o máximo rendimento (2,20 g planta⁻¹). Os valores médios, adequados para alcançar o rendimento máximo e 90% do máximo foram 0,60 e 0,55 mM P, respectivamente; em consequência, todos os genótipos crescidos em 1,0 mM P encontrar-se-iam sob efeito do excesso de P no meio de crescimento.

Tabela 22 - Produções estimadas de matéria seca total (MST) correspondentes ao máximo e 90% do máximo e os níveis de P na solução para promover estas produções, em oito híbridos de sorgo granífero, aos 41 dias após plantio.

Genótipo	MST, g planta ⁻¹		Nível P, mM	
	máximo	90%	máximo	90%
Criollo-1	2,70	2,43	0,64	0,58
Criollo-8	2,98	2,68	0,65	0,59
Sefloarca-7	2,60	2,34	0,49	0,44
Sefloarca-10	2,20	2,01	0,79	0,71
Himeca-101	3,59	3,23	0,45	0,41
Himeca-303	-	-	-	-
Pioneer YSB-83	-	-	-	-
Wac 8228-BR	2,57	2,43	0,62	0,56

HELDT et al. (1977) indicaram que a concentração ótima de fosfato para a fixação de CO₂ está em torno de 0,5 mM, e a valores acima deste, a incorporação de ¹⁴C dentro do amido diminui consideravelmente.

CAMACHO & MALAVOLTA (1996) encontraram para o híbrido Pro-sorgo-II, queda no crescimento quando o P foi, aumentado de 31 a 62 mg por litro, mas não encontraram nenhuma variação no genótipo Dekalb X-9951, quando houve aumento do P de 0 a 62 mg; enquanto a tendência dos outros cultivares foi linearmente positiva.

Ao se comparar os resultados obtidos por CAMACHO & MALAVOLTA (1996), com os desta pesquisa, pode-se inferir o seguinte: (1) a capacidade de resposta ao P é específico de cada genótipo, e (2) o efeito tóxico que estaria se apresentando seria em função da concentração do nutriente e da fase de desenvolvimento da planta, agindo conjuntamente.

Segundo GERLOFF (1976), as plantas deveriam ter a capacidade de reagir perante a deficiência de P em solos com baixa disponibilidade deste elemento, diminuindo sua taxa de crescimento, o que lhes permitiriam se adaptar ao baixo suprimento. Esta indicação coincide com a de CHAPIN & BIELESKI (1982), que consideram ser o retardamento no crescimento mais importante que qualquer outra resposta ao estresse em espécies adaptadas a condições de baixo fornecimento de fósforo.

Na Tabela 23 estão os resultados da avaliação da R/PA. Encontram-se diferenças estatísticas para as plantas nos níveis 0 e 0,5, mas não em 1,0 mM P. A razão aumentou fortemente no tratamento -P, sendo o Criollo-1 que apresentou a maior grandeza (0,62) e o Pioneer a pior conduta (0,37); os demais genótipos formaram um grupo homogêneo intermediário entre aqueles dois. Nesse sentido, a deficiência de P originou um incremento na relação R/PA devido ao estímulo preferencial do crescimento da raiz, ajudando as plantas sob estresse obter mais fosfatos. Plantas crescendo num meio carente de P distribuem a maior parte dos fotossintatos às raízes as expensas do crescimento da parte aérea, com o propósito de aumentar ao máximo a

capacidade de absorver fosfatos, sendo, portanto, um "mecanismo de adaptação" (FREEDEN et al., 1989) ou de "crescimento compensatório" (BARBER, 1979), enquanto que a redução da matéria seca da planta é resultado da diminuição da taxa fotossintética, manifestando-se o efeito do P nas reações enzimáticas que ocorrem no interior dos cloroplastos (BROOKS, 1986; RAO & TERRY, 1989). Estes resultados confirmam conclusões anteriores em diferentes culturas (ATKINSON, 1973; TAYLOR & GOUBRAN, 1976; DREW & SAKER, 1978; CHAPIN & BIELESKI, 1982; RESENDE & BARBER, 1984; KATZ et al., 1986; YAN et al., 1995).

Para todos os tratamentos, a produção da matéria seca foi sempre maior na parte aérea que nas raízes.

Juntando os 2 experimentos desta tese, uma $R/PA > 0,30$ permitiria uma eficiente aquisição de P no meio. As diferenças encontradas nos dois experimentos dever-se-iam ao estágio de desenvolvimento e ao estado nutricional da planta (AUNG, 1974).

Tabela 23 - Efeitos dos níveis de P na solução nutritiva sobre a relação raiz/parte aérea de oito genótipos de sorgo granífero, aos 41 dias após plantio.

Genótipo	Níveis de P			equação ⁺⁺	r ²
	0	0,5	1,0		
Criollo-1	0,62 ⁺ a	0,17 b	0,22 a	$y = 0,62 - 1,40x + 0,99x^2$	1,00**
Criollo-8	0,48 b	0,25 a	0,20 a	$y = 0,48 - 0,65x + 0,36x^2$	1,00**
Sefloarca-7	0,40 b	0,19 a	0,17 a	$y = 0,40 - 0,62x + 0,39x^2$	1,00**
Sefloarca-10	0,47 b	0,18 a	0,17 a	$y = 0,47 - 0,84x + 0,55x^2$	1,00**
Himeca-101	0,50 b	0,29 a	0,24 a	$y = 0,50 - 0,55x + 0,29x^2$	1,00**
Himeca-303	0,48 b	0,22 a	0,23 a	$y = 0,48 - 0,80x + 0,55x^2$	1,00**
Pioneer YSB-83	0,37 c	0,15 b	0,17 a	$y = 0,37 - 0,65x + 0,45x^2$	1,00**
Wac 8228-BR	0,44 b	0,26 a	0,25 a	$y = 0,44 - 0,54x + 0,35x^2$	1,00**

⁺ Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si ao nível 1% de probabilidade pelo teste de Tukey

⁺⁺ Y: R/PA; X: níveis P

** : significativo ao nível de 1% de probabilidade.

4.2.2. Diagnose foliar aos 41 dias

4.2.2.1. Teores totais de P nas folhas +2 e +3

A análise de variância para teor total de P nas folhas mostrou uma interação altamente significativa entre genótipos e concentração de P (Tabela 24). Até certo limite, aumentando o nível de P na solução, aumentou a concentração foliar de P, sendo o modelo de regressão quadrática o que melhor se ajusta a essa relação funcional ($p < 0,01$).

Quando se estudou o comportamento dos genótipos dentro de cada nível de P, os menores valores foram alcançados no tratamento 0 mM P e os maiores, a diferença do experimento 1, no nível seguinte, exceto para o Criollo-8. Dessa maneira, os incrementos foram da seguinte ordem de grandeza: 668% (Criollo-1), 869% (Criollo-8), 479% (Sefloarca-7), 558% (Sefloarca-10), 663% (Himeca-101), 644% (Himeca-303), 575% (Pioneer) e 665% (Wac). O mais alto nível de P observado em 1,0 mM P no híbrido Criollo-8 (17,80 g Kg⁻¹) pode-se dever a que o híbrido é grande acumulador de P na parte aérea, ou tem alta habilidade para transportar P a longa distância.

Segundo LOCKMAN (1972b), os níveis adequados de P para sorgo granífero em amostras da planta inteira no estágio inicial do crescimento vegetativo, condições similares a este experimento, oscilam entre 2,1 a 5,0 g kg⁻¹. Para MALAVOLTA et al. (1989), esses valores devem ser bem mais altos: 4,0 - 8,0 g P kg de matéria seca foliar. LOCKMAN (1972b) cita valores inferiores a 1,3 como deficientes e entre 1,3 a 2,5 g P kg como baixos.

Tabela 24 - Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre o teor de P total nas folhas (g kg^{-1}), equações de regressão ajustadas, e níveis críticos de P-total foliar (NC P), correspondente à produção total máxima e 90% da máxima, em oito genótipos de sorgo granífero, aos 41 dias após plantio.

Genótipo	Níveis de P, mM			equação ⁺⁺	r ²	NC P, g kg^{-1}	
	0	0,5	1,0			máximo	90%
Criollo-1	1,90 ⁺ a	14,60 a	14,23 b	$y = 1,90 + 38,47x - 26,13x^2$	1,00**	16,00	12,95
Criollo-8	1,63 a	15,80 a	17,80 a	$y = 1,63 + 40,50x - 24,33x^2$	1,00**	17,80	17,29
Sefloarca-7	2,47 a	14,30 a	13,17 b	$y = 2,47 + 36,63x - 25,93x^2$	1,00**	14,78	13,24
Sefloarca-10	1,93 a	12,70 b	12,40 c	$y = 1,93 + 32,60x - 22,13x^2$	1,00**	12,71	10,15
Himeca-101	2,07 a	15,80 a	14,70 b	$y = 2,07 + 42,30x - 29,67x^2$	1,00**	16,93	16,00
Himeca-303	2,03 a	15,10 a	15,60 a	$y = 2,03 + 38,70x - 25,13x^2$	1,00**	-	-
Pioneer YSB-83	2,07 a	13,90 a	13,50 b	$y = 2,07 + 35,90x - 24,47x^2$	1,00**	-	-
Wac 8228-BR	2,00 a	15,30 a	14,60 b	$y = 2,00 + 40,60x - 28,00x^2$	1,00**	15,00	9,51

⁺ Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si ao nível 1% de probabilidade pelo teste de Tukey

⁺⁺ Y: P foliar total; X: níveis P

** : significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Se compararem os resultados com os de LOCKMAN (1972b) ter-se-ia que no tratamento -P, os genótipos não deveriam sofrer por deficiência do nutriente; não obstante, e em concordância com a diagnose visual praticada, e os resultados da produção de matéria seca obtidos neste trabalho, os genótipos foram grandemente afetados quando cresceram na solução com omissão de P, quanto em 1,0 mM P (Tabela 22). Tudo isso parece indicar que os níveis de P total nas folhas, adequados para o normal desenvolvimento da cultura do sorgo granífero, deveriam ser, ou estar muito perto, daqueles indicados por MALAVOLTA et al. (1989) e não dos assinalados por LOCKMAN (1972b) [ver níveis críticos, Tabela 24].

Já nos tratamentos que receberam o nutriente, os teores de P total encontram-se muito acima das concentrações consideradas como adequadas, mais de 50% do limite superior de suficiência indicado por MALAVOLTA et al. (1989) [Tabela 24].

Embora não tenham sido indicados valores de toxicidade nesta cultura, BIELESKI & FERGUSON (1983) consideraram excessivos aqueles acima de 9 mg kg⁻¹, enquanto BERGMANN (1992) manifestou que os excessos só acontecem quando os níveis estiverem na ordem de 10 a 20 mg kg⁻¹ no tecido foliar. Tomando em consideração essas observações, todas as plantas que receberam P na solução nutritiva encontrar-se-iam sob toxidez. Observa-se também na Tabela 24 que a tendência dos genótipos é manter constante ou diminuir o teor de P foliar quando o mesmo foi aumentado de 0,5 a 1,0 mM no meio externo; neste sentido, vale a pena citar a conclusão de LEIG & STOREY (1991): "plantas não são simples esponjas que absorvem nutrientes de seus contornos de uma maneira descontrolada. Pelo contrário, elas regulam sua composição a diferentes níveis e por diferentes razões".

Anteriormente foi citado que no tratamento 1,0 mM P, as plantas reduziram o peso da MST, quando comparados com a concentração 0,5 mM (possível efeito tóxico). Ao redor de 0,5 mM P os genótipos apresentaram os maiores valores na variável citada (Tabela 21), mesmo com concentrações de P foliar consideradas excessivas. Se as plantas não apresentaram sintomas de toxidez, isto parece indicar que o excesso de P está sendo acumulado no vacúolo sem efeito negativo sobre o metabolismo (BIELESKI & FERGUSON, 1983; LEIGH & STOREY, 1991) ou o excedente de fósforo estaria sendo drenado para fora das plantas (YAGODIN et al., 1982) via raízes (BIELESKI & FERGUSON, 1983).

Quando estudou-se o comportamento dos genótipos em cada um dos níveis de P no meio externo (Tabela 24) obteve-se o seguinte: nenhuma diferença significativa na concentração 0 mM P, possivelmente pelo fato de as plantas, previamente ser colocadas no tratamento carente de P, permanecerem por 10 dias em uma solução com P e, além disso as plantas poderiam ser originadas de sementes altamente acumuladoras de P, como tem sido indicado por CAMACHO & MALAVOLTA (1995). Na concentração intermédia, pequena diferença foi obtida, sete dos genótipos apresentaram a mesma capacidade de concentrar P, entretanto o Sefloarca-10 mostrou a menor resposta que foi repetida em 1,0 mM P. No nível 1,0 mM P foram observadas as maiores diferenças genotípicas com as médias mais altas para Criollo-8 (17,80) e Himeca-303 (15,60 g kg⁻¹) e valores intermédios para os restantes 5 genótipos.

Ao se comparar os teores de P total nas folhas do experimento 2 com o experimento 1, tem-se que neste último os valores foram, sempre, mais baixos para os três níveis sob o estudo (salvo para os genótipos Sefloarca-10 e Himeca-303 na dose 0

mM P) o que era de se esperar. Isto é devido a que no primeiro experimento a colheita foi feita no estágio inicial do crescimento reprodutivo e, portanto, a tendência do P é diminuir com a idade da planta. Adicionalmente, os genótipos de sorgo são altamente acumuladores de P na semente (CAMACHO & MALAVOLTA, 1995), em consequência, haverá uma grande translocação dos órgãos vegetativos para os reprodutivos, e aqueles teores que atualmente consideram-se excessivos passaram a se encontrar na faixa considerada adequada por MALAVOLTA et al. (1989).

4.2.2.2. Teores solúveis de P (PO_4)

Os teores de PO_4 foliar, no tratamento onde se omitiu o P, foram similares nos genótipos de sorgo (Tabela 25); porém, nos tratamentos onde foi fornecido o fosfato no meio de crescimento o mesmo não ocorreu. Em 0,5 mM P todos os genótipos, exceto o Himeca-303 (9449) integram um grupo homogêneo com os mais altos valores e, em 1,0 mM P somente o Criollo-1 apresentou o mais baixo teor de PO_4 (10152). No nível intermediário de P os incrementos do fosfato inorgânico foliar foram muito elevados quando comparados àquele onde não foi fornecido P, encontrando-se a menor ordem de grandeza para Himeca-303 (7,32 vezes) e o maior para Criollo-8 (aumento de 10,37 vezes).

Na mesma ordem de idéias, ao se compararem os teores de PO_4 na concentração 1,0 mM P com aqueles -P os aumentos estiveram entre 7,54 vezes (Pioneer) e 11 vezes (Criollo-8). No entanto, nos tratamentos onde foi fornecido fósforo, a concentração de fosfato inorgânico nas folhas mostrou diferenças somente para os genótipos Criollo-1 e Himeca-303, ao variar de 12209 (0,5 mM P) para 10152 (1,0 mM P) e de 9449 (0,5 mM P) para 13923 $\mu\text{g PO}_4 \text{ g}^{-1}$ (1,0 mM P), respectivamente.

Tabela 25 - Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre o teor de PO_4 foliar ($\mu\text{g g}^{-1}$), equações de regressão ajustadas, e níveis críticos de PO_4 foliar (NC PO_4), correspondente à produção total máxima e 90% da máxima, em oito genótipos de sorgo granífero, aos 41 dias após plantio.

Genótipo	Níveis de P, mM			equação ⁺⁺	r^2	NC PO_4 , $\mu\text{g g}^{-1}$	
	0	0,5	1,0			máximo	90%
Criollo-1	1290 ⁺ a	12209 ab	10152 b	$y = 1290 + 32459x - 23597x^2$	0,90**	9666	8333
Criollo-8	1290 a	13380 a	14299 a	$y = 1290 + 32998x - 19989x^2$	0,95**	8185	7661
Sefloarca-7	1290 a	11749 ab	11958 ab	$y = 1290 + 29233x - 18565x^2$	0,91**	7708	7356
Sefloarca-10	1386 a	12167 ab	12218 ab	$y = 1386 + 30013x - 18981x^2$	0,93**	9663	9194
Himeca-101	1505 a	13129 a	13589 a	$y = 1505 + 32155x - 20071x^2$	0,90**	10000	9833
Himeca-303	1290 a	9449 b	13923 a	$y = 1290 + 12633x$	0,94**	-	-
Pioneer YSB-83	1648 a	12668 a	12418 ab	$y = 1648 + 30839x - 20069x^2$	0,91**	-	-
Wac 8228-BR	1648 a	13129 a	12167 ab	$y = 1648 + 32935x - 22416x^2$	0,92**	9500	8600

⁺ Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si ao nível 1% de probabilidade pelo teste de Tukey

⁺⁺ Y: PO_4 ; X: níveis P

** : significativo ao nível de 1% de probabilidade.

USUDA & SHIMOGAWARA (1991) trabalhando com plantas de milho (C_4 igual ao sorgo) crescidas em soluções nutritivas contendo 0,001 (P-baixo) ou 0,5 mM de P_i (testemunha), encontraram, 20 dias após plantio, que no tratamento P baixo diminuiu-se acentuadamente os níveis de P solúvel ($\sim 77\%$). Nesta pesquisa, a redução dos teores de P_i esteve entre 86 (Himeca-303) e 90% (Criollo-8) quando comparou-se o tratamento -P respeito com o 0,5 mM. É possível que a maior redução percentual observada no presente trabalho, com respeito àquele, deve-se ao fato das plantas terem sido colhidas aos 41 após plantio e, em consequência houve efeito de diluição do P_i na matéria seca, ou serem espécies diferentes.

Os teores de PO_4 foliar foram ajustados a modelos quadráticos de regressão, com exceção de Himeca-303, cuja relação com a concentração de P na solução externa é melhor explicada por uma função linear (Tabela 25).

CALVACHE et al. (1994), trabalhando com soluções nutritivas, encontraram valores de 2285 para a cultura do feijoeiro, no início do florescimento, no tratamento carente de P e de 6500 $\mu g PO_4 g^{-1}$ para o arroz, no início do perfilhamento no nível 0,5 mM P. Em trigo tem sido apresentados valores entre 140 e 350 $\mu g P_i g^{-1}$ nos tratamentos onde não foram aplicados P e entre 490 e 2570 $\mu g P_i g^{-1}$ (na parte aérea) com 103 kg P ha^{-1} , em diferentes localidades e estágios de crescimento (McLACHLAN et al., 1987).

Quando comparados os resultados desta pesquisa com os da literatura, pode-se inferir que as concentrações foliares de P solúvel nos oito genótipos de sorgo no tratamento -P são indicativos de deficiência; pelo contrário, embora não tenham sido citados os teores considerados adequados, as plantas que receberam P via solução nutritiva, apresentaram teores que podem ser considerados excessivos (ver níveis críticos, Tabela 25), que poderiam conduzir ao seu pior aproveitamento e induziriam às plantas a amadurecer antes do tempo, impossibilitando assim, o seu bom rendimento em escala comercial (YAGODIN et al., 1982).

Ao se comparar os dois experimentos, observou-se a tendência do PO_4 de diminuir com a idade da planta.

4.2.2.3. Relação entre teor foliar de fósforo e produção de matéria seca

Ao se estudar o rendimento em função do teor total de P nas folhas, na produção de matéria seca de raízes, verifica-se a ocorrência de relação funcional para os genótipos: Criollo-1, Sefloarca-7, Sefloarca-10, Himeca-303 e Pioneer, sendo a interação negativa (Tabela 26).

Tabela 26 - Equações de regressão e coeficientes de determinação (r^2) para produção de matéria seca de raízes (MSR), parte aérea (MSPA) e total (MST), em função do teor foliar de P total, em oito genótipos de sorgo granífero, aos 41 dias após plantio.

Genótipo	Relação		
	Pfoliar x MSR	Pfoliar x MSPA	Pfoliar x MST
Criollo-1	$y = 0,59 - 0,0013x$ $r^2 = 0,55^*$	$y = 0,81 e^{0,063x}$ $r^2 = 0,85^{**}$	$y = 1,25 + 0,12x - 0,022x^2$ $r^2 = 0,72^{**}$
Criollo-8	ns	$y = 0,70 e^{0,066x}$ $r^2 = 0,85^{**}$	$y = 0,50 + 0,42x - 0,017x^2$ $r^2 = 0,83^{**}$
Sefloarca-7	$y = 0,80 - 0,07x + 0,0005x^2$ $r^2 = 0,88^{**}$	$y = 1,39 e^{0,025x}$ $r^2 = 0,64^{**}$	$y = 2,27 - 0,098x + 0,007x^2$ $r^2 = 0,60^*$
Sefloarca-10	$y = 0,47 - 0,012x$ $r^2 = 0,77^{**}$	$y = 0,87 e^{0,058x}$ $r^2 = 0,81^{**}$	$y = 0,945 + 0,264x - 0,013x^2$ $r^2 = 0,83^{**}$
Himeca-101	ns	ns	$y = 3,62 - 0,46x + 0,027x^2$ $r^2 = 0,58^*$
Himeca-303	$y = 0,68 - 0,018x$ $r^2 = 0,69^{**}$	$y = 1,27 e^{0,024x}$ $r^2 = 0,58^*$	ns
Pioneer YSB-83	$y = 0,44 - 0,013x$ $r^2 = 0,81^{**}$	$y = 0,97 e^{0,036x}$ $r^2 = 0,92^{**}$	$y = 2,01 - 0,31x + 0,022x^2$ $r^2 = 0,85^{**}$
Wac 8228-BR	ns	$y = 1,30 e^{0,027x}$ $r^2 = 0,77^{**}$	$y = 1,91 e^{0,02x}$ $r^2 = 0,52^*$

* e **: significativo aos níveis 5 e 1 %, respectivamente; ns: não significativo.

Com relação a MSPA em sete dos oito genótipos, esta aumentou com o incremento do P total; não obstante, no Himeca-101 tem-se que o teor foliar aumenta sem que o faça a MSPA (Tabela 26).

Na mesma ordem de idéias, existe uma relação quadrática entre produção de MST e P total para seis dos genótipos.

Na Tabela 27 apresenta-se a relação funcional existente entre rendimento e teor de PO_4 (P solúvel). Tem-se que a mesma é quase uma repetição da anterior (interação P-total x rendimento), exceto na relação P-total x MST na qual, não há significância no genótipo Pioneer. Neste caso, o modelo linear negativo se ajusta melhor à relação PO_4 x MSR, enquanto as interações PO_4 x MSPA e PO_4 x MST são melhor explicadas pelos modelos exponencial e quadrático de regressão, respectivamente.

De acordo com MALAVOLTA et al. (1989), "três premissas devem ser obedecidas para que a diagnose foliar possa ser usada". Neste trabalho, **dentro de limites**, o silogismo foi demonstrado: observou-se que acrescentando a concentração do P na solução nutritiva incrementaram os teores foliares de fósforo e produção da MSPA e MST (Tabelas 6 e 7, 20 e 21), existindo, em consequência, relação direta entre concentração de P (total e solúvel) nas folhas e produção da MSPA e MST (Tabelas 14, 15, 26 e 27).

Resultados similares aos observados nesta pesquisa foram obtidos num trabalho recente, quando foi estudado a relação P total versus o rendimento da matéria seca, em seis genótipos de sorgo granífero (CAMACHO & MALAVOLTA, 1996).

4.2.2.4. Relação entre teores foliares de P total e PO_4

A relação funcional existente entre as duas formas de fósforo nos oito genótipos de sorgo, é apresentada na Tabela 28. Nesse sentido, acréscimo no teor total de P acarretou aumentos, quase proporcional, na concentração foliar de P solúvel, e o modelo $y = a + bx$ deu melhor ajuste ($p < 0,01$). Isto permite afirmar que, independente de qualquer que seja o material genético, aumento do P total conduzirá a incrementos nos teores de P solúvel, na cultura do sorgo granífero.

Tabela 27 - Equações de regressão e coeficientes de determinação (r) para produção de matéria seca de raízes (MSR), parte aérea (MSPA), total (MST) e absorção de ^{32}P em função do PO_4 , em oito genótipos de sorgo granífero, aos 41 dias após plantio.

Genótipo	Relação		
	$\text{PO}_4 \times \text{MSR}$	$\text{PO}_4 \times \text{MSPA}$	$\text{PO}_4 \times \text{MST}$
Criollo-1	$y = 0,58 - 0,00002x$ $r^2 = 0,48^*$	$y = 0,82 e^{0,00008x}$ $r^2 = 0,88^{**}$	$y = 1,29 + 0,00013x - 0,0000000002x^2$ $r^2 = 0,64^*$
Criollo-8	ns	$y = 0,69 e^{0,00008x}$ $r^2 = 0,86^{**}$	$y = 0,19 + 0,0008x - 0,000000004x^2$ $r^2 = 0,94^{**}$
Sefloarca-7	$y = 0,62 - 0,00002x^2$ $r^2 = 0,74^{**}$	$y = 1,39 e^{0,00001x}$ $r^2 = 0,55^*$	$y = 1,99 + 0,00007x - 0,00000000036x^2$ $r^2 = 0,55^*$
Sefloarca-10	$y = 0,46 - 0,00001x$ $r^2 = 0,76^{**}$	$y = 0,88 e^{0,00006x}$ $r^2 = 0,86^{**}$	$y = 0,936 + 0,00038x - 0,0000000022x^2$ $r^2 = 0,85^{**}$
Himeca-101	ns	ns	$y = 2,03 + 0,00057x - 0,0000000038x^2$ $r^2 = 0,86^{**}$
Himeca-303	$y = 0,66 - 0,00002x$ $r^2 = 0,64^*$	$y = 1,36 e^{0,00002x}$ $r^2 = 0,53^*$	ns
Pioneer YSB-83	$y = 0,44 - 0,00001x$ $r^2 = 0,85^{**}$	$y = 1,00 e^{0,00004x}$ $r^2 = 0,88^{**}$	ns
Wac 8228-BR	ns	$y = 1,30 e^{0,00003x}$ $r^2 = 0,77^{**}$	$y = 1,676 + 0,00019x - 0,000000001x^2$ $r^2 = 0,64^*$

* e **: significativo aos níveis 5 e 1%, respectivamente; ns: não significativo.

Tabela 28 - Equações de regressão e coeficientes de determinação (r^2) para P solúvel (PO_4) e absorção de ^{32}P em função do P total, e entre absorção de ^{32}P em função do P solúvel.

Genótipo	Relação		
	Ptotal x PO_4	Ptotal x ^{32}P	PO_4 x ^{32}P
Criollo-1	$y = 93,71 + 760,41x$ $r^2 = 0,90^{**}$	$y = 0,67 - 0,03x$ $r^2 = 0,90^{**}$	$y = 0,65 - 0,004x$ $r^2 = 0,88^{**}$
Criollo-8	$y = 113,59 + 812,54x$ $r^2 = 0,98^{**}$	$y = 0,89 - 0,05x$ $r^2 = 0,98^{**}$	$y = 0,90 - 0,006x$ $r^2 = 0,98^{**}$
Sefloarca-7	$y = 787,75 + 914,04x$ $r^2 = 0,98^*$	$y = 0,93 - 0,04x$ $r^2 = 0,94^{**}$	$y = 0,89 - 0,06x$ $r^2 = 0,94^{**}$
Sefloarca-10	$y = 367,13 + 1001,43x$ $r^2 = 0,98^{**}$	$y = 0,98 - 0,07x$ $r^2 = 0,94^{**}$	$y = 0,96 - 0,0006x$ $r^2 = 0,94^{**}$
Himeca-101	$y = 238,49 + 888,59x$ $r^2 = 0,98^{**}$	$y = 0,28 - 0,01x$ $r^2 = 0,96^{**}$	$y = 0,27 - 0,001x$ $r^2 = 0,98^{**}$
Himeca-303	$y = 361,75 + 786,58x$ $r^2 = 0,88^{**}$	$y = 0,69 - 0,03x$ $r^2 = 0,92^*$	$y = 0,65 - 0,004x$ $r^2 = 0,85^{**}$
Pioneer YSB-83	$y = 154,22 + 992,95x$ $r^2 = 0,94^{**}$	$y = 1,17 - 0,05x$ $r^2 = 0,88^{**}$	$y = 1,13 - 0,001x$ $r^2 = 0,98^{**}$
Wac 8228-BR	$y = -259,99 + 854,77x$ $r^2 = 0,96^{**}$	$y = 0,87 - 0,04x$ $r^2 = 0,96^{**}$	$y = 0,87 - 0,005x$ $r^2 = 0,96^{**}$

ns: não significativo; * e **: significativo aos níveis 5 e 1 %, respectivamente.

4.2.3. Bioavaliação por absorção de P (^{32}P)

Para todos os genótipos observou-se uma relação negativa entre absorção de radiofósforo por raízes destacadas na solução do bioensaio em função da concentração de P na solução nutritiva onde previamente os materiais genéticos tinham crescido (Tabela 29).

Contrário aos resultados obtidos por HARRISON & HELLIWELL (1979) e CAMACHO & MALAVOLTA (1966), este processo biológico foi melhor explicado por uma relação funcional do tipo quadrática ($r^2 > 0,90$).

Os genótipos apresentaram absorção diferencial nas diferentes concentrações (Tabela 29): em 0 mM P o influxo variou entre 0,25 (Himeca-101) e 1,08 $\mu\text{mol } ^{32}\text{P g}^{-1} \text{ MS } 15 \text{ min}^{-1}$ (Pioneer), mudança de 332%, enquanto que em plantas crescidas em solução nutritiva com 1,0 mM P a variação foi de 629%, de 0,07 (Himeca-101) para 0,51 (Pioneer). Este comportamento diferencial pode ser devido ao fato de que plantas originadas de sementes com baixa reserva nutritiva tendem a absorver maior quantidade de P, em relação àsquelas de alta reserva (HARRISON & HELLIWELL, 1979), ou de genótipos que têm a capacidade de usar mais rapidamente o P seminal e/ou o P da solução nutritiva (BOWEN, 1970; CAMACHO & MALAVOLTA, 1996).

Na mesma ordem de idéias, e dentro de limites, tem-se que plantas com elevada concentração interna de P, total e/ou solúvel, foram as que cresceram nos meios onde foi aplicado o fosfato (Tabelas 24 e 25) e, como consequência, absorveram menos ^{32}P (Tabela 29). Por analogia à regulação de certas enzimas, tem sido proposto que essa relação negativa pode ser devida à inibição alostérica do influxo, no qual o P absorvido age como modulador (GLASS, 1975, 1990; LEFEBVRE & GLASS, 1982; BIELESKI & FERGUSON, 1983).

Embora não esteja claro como o estado interno do fósforo regula a sua absorção, é postulado que a inibição retroativa ocorre via liberação dos mecanismos transportadores existentes (CLARKSON & LÜTTGE, 1991), por mudanças nos transportadores (DREW & SAKER, 1984; DUNLOP & GARDINER, 1993; SHIMOOGAWARA & USUDA, 1995) ou por inativação da bomba protônica (MIMURA, 1995).

Tabela 29 - Efeito dos níveis de P na solução nutritiva sobre a absorção de ^{32}P ($\mu\text{mol.g}^{-1} \text{ MS.15min}^{-1}$), equações de regressão ajustadas e absorção de ^{32}P correspondentes à produção total máxima e 90% da máxima, em oito genótipos de sorgo granífero, aos 41 dias após plantio.

Genótipo	Níveis de P, mM			equação ⁺⁺	r ²	^{32}P , $\mu\text{mol.g}^{-1} \text{ MS} \cdot 15 \text{ min}^{-1}$	
	0	0,5	1,0			máxima	90%
Criollo-1	0,62 bc	0,19 b	0,17 b	$y = 0,62 - 1,27x + 0,82x^2$	0,94**	0,12	0,20
Criollo-8	0,83 ab	0,14 b	0,13 b	$y = 0,83 - 2,04x + 1,34x^2$	0,99**	0,04	0,13
Sefloarca-7	0,84 ab	0,32 ab	0,41 ab	$y = 0,84 - 1,65x + 1,22x^2$	0,98**	0,30	0,36
Sefloarca-10	0,88 ab	0,26 ab	0,24 ab	$y = 0,88 - 1,84x + 1,21x^2$	0,98**	0,33	0,36
Himeca-101	0,25 c	0,08 b	0,07 b	$y = 0,25 - 0,49x + 0,31x^2$	0,92**	0,07	0,09
Himeca-303	0,63 bc	0,22 b	0,20 b	$y = 0,63 - 1,21x + 0,79x^2$	0,94**	-	-
Pioneer YSB-83	1,08 a	0,61 a	0,51 a	$y = 1,08 - 1,32x + 0,75x^2$	0,91**	-	-
Wac 8228-BR	0,79 bc	0,21 b	0,19 b	$y = 0,79 - 1,73x + 1,13x^2$	1,00**	0,61	0,77

* Médias seguidas da mesma letra nas colunas não diferem entre si ao nível 1% de probabilidade pelo teste de Tukey

++ Y: ^{32}P ; X: níveis P

** e *: significativo aos níveis de 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.

Estes resultados levam à conclusão de que a demanda de P entre cultivares de sorgo é governada mais pelo estado interno que pela concentração externa de P.

No início foi indicado o híbrido Pioneer que apresentou a maior taxa de absorção de ^{32}P , quando foi fornecido o P como no tratamento -P (Tabela 29); da mesma maneira, este híbrido exibiu o menor rendimento na MST nos meios de crescimento, onde o nutriente foi ministrado (Tabela 21). Isto parece indicar que o genótipo é pouco eficiente no uso do P e, pior ainda, não teria habilidade para deter ou, ao menos, diminuir fortemente a absorção, nem mesmo quando crescendo em níveis que possam ser tóxicos para a cultura. A redução na absorção de ^{32}P é da ordem de 53% (Pioneer) quando houve aumento na concentração do P no meio externo (de 0 a 1,0 mM P); enquanto que para os demais genótipos a queda é superior a 70%, exceto em Sefloarca-7. CAMACHO & MALAVOLTA (1996), verificaram, também, que um dos genótipos de sorgo granífero (Criollo-9) apresentou a maior taxa de absorção de ^{32}P , tanto no nível 0 mM P quanto nos tratamentos onde foram aplicados o P.

SAKANO et al. (1995) concluíram que num meio carente de P todas as células não poderiam proliferar (e como consequência, o crescimento é reduzido). Em sentido oposto, a inibição do crescimento das células de *Catharanthus roseus* dependente da concentração de P_i deve ser explicado em termos de absorção excessiva do P_i (efeito tóxico do fosfato) devido à carência aparente do controle alostérico nos processos de absorção. Dada a coincidência destas observações com o comportamento exposto pelo Pioneer, é possível que as células deste genótipo tenham uma alta capacidade de absorção de fosfato inorgânico por carecerem (ou serem ineficientes) do mecanismo de inibição retroativa e acumularem uma grande quantidade de P_i quando abundantemente disponível.

Por outro lado, o Himeca-101, que apesar de se encontrar sofrendo por toxidez do P (Tabela 20) quase tem inibido a absorção metabólica do P (Tabela 29). Isto indica claramente que seu sistema modulador reage mais rapidamente que o do Pioneer, evitando assim a morte da planta. SAKANO et al. (1995) observaram células inchadas

e carentes de grânulos de amido induzidas por altos níveis de P_i ; em adição, a morte das células acontece como resultado da ruptura celular.

Na Tabela 30 apresenta-se a relação entre rendimento da matéria seca nas diferentes partes da planta em função da absorção do radiofósforo pelas raízes destacadas dos oito genótipos de sorgo granífero.

Para esta situação, a produção de MSR foi positivamente correlacionada à absorção de ^{32}P nos genótipos Sefloarca-7, Sefloarca-10, Himeca-303 e Pioneer, sendo o modelo de regressão exponencial o que melhor se ajusta a essa relação funcional; nenhuma relação foi observada nos outros 4 genótipos. CAMACHO & MALAVOLTA (1996) encontraram regressão exponencial negativa entre MSR x ^{32}P no híbrido Chaguaramas-III, sem diferenças estatísticas nos outros 5 materiais genéticos. A causa da discrepância teve sua origem quando a produção da MSR se elevou com o aumento das concentrações de P na solução nutritiva; o contrário verificou-se neste experimento. Não obstante, os resultados obtidos aqui concordam com os de JESSOP et al. (1983), que encontraram uma relação significativamente positiva entre peso da matéria seca das raízes e absorção de fósforo em 22 variedades de milho.

Na mesma ordem de idéias, a produção de MSPA foi negativamente correlacionada à absorção de radiofósforo em sete dos oito genótipos, sendo o modelo exponencial o que melhor se ajusta a tal correspondência, enquanto que a produção da matéria seca em função da absorção de ^{32}P foi melhor ajustada por uma função quadrática, exceto no genótipo Himeca-303.

A relação entre absorção de ^{32}P por raízes destacadas e o estado interno do fósforo, nos oito genótipos de sorgo granífero, é apresentada na Tabela 28. A correspondência entre a absorção de radiofósforo e a concentração de P total e P solúvel nas folhas foi inversa e linear ($p < 0,01$) para todos os genótipos em estudo. Isto permite afirmar que independente do genótipo, sempre existirá diminuição na absorção de ^{32}P com o aumento dos teores foliares de fósforo.

Tabela 30 - Equações de regressão e coeficientes de determinação (r^2) para produção de matéria seca de raízes (MSR), parte aérea (MSPA); total (MST), em função da absorção de ^{32}P .

Genótipo	Relação		
	$^{32}\text{P} \times \text{MSR}$	$^{32}\text{P} \times \text{MSPA}$	$^{32}\text{P} \times \text{MST}$
Criollo-1	ns	$y = 2,79 e^{-1,789x}$ $r^2 = 0,86^{**}$	$y = 3,16 - 4,18x + 2,30x^2$ $r^2 = 0,71^{**}$
Criollo-8	ns	$y = 2,60 e^{-1,471x}$ $r^2 = 0,86^{**}$	$y = 3,125 - 3,73x + 1,63x^2$ $r^2 = 0,64^{**}$
Sefloarca-7	$y = 0,24 e^{0,995x}$ $r^2 = 0,55^*$	$y = 2,45 e^{0,619x}$ $r^2 = 0,72^{**}$	$y = 4,764 - 9,404x + 7,304x^2$ $r^2 = 0,77^{**}$
Sefloarca-10	$y = 0,29 e^{0,476x}$ $r^2 = 0,67^{**}$	$y = 2,38 e^{-1,053x}$ $r^2 = 0,92^{**}$	$y = 1,82 + 2,05x - 2,84x^2$ $r^2 = 0,86^{**}$
Himeca-101	ns	ns	$y = 2,79 + 3,57x - 3,99x^2$ $r^2 = 0,64^{**}$
Himeca-303	$y = 0,34 e^{0,916x}$ $r^2 = 0,55^*$	$y = 2,14 e^{0,748x}$ $r^2 = 0,61^*$	ns
Pioneer YSB-83	$y = 0,17 e^{0,765x}$ $r^2 = 0,64^{**}$	$y = 2,28 e^{0,686x}$ $r^2 = 0,77^{**}$	$y = 2,31 e^{-0,403x}$ $r^2 = 0,79^*$
Wac 8228-BR	ns	$y = 2,20 e^{-0,615x}$ $r^2 = 0,88^{**}$	$y = 2,404 + 0,467x - 1,298x^2$ $r^2 = 0,62^{**}$

* e **: significativo aos níveis 5 e 1%, respectivamente; ns: não significativo.

4.2.4. Avaliação do estado nutricional

Para verificar a eficiência e utilidade dos métodos de avaliação do estado nutricional estabeleceram-se as relações entre: 1) Produção de matéria seca e teor de P-total; 2) produção de matéria seca e teor de PO_4 ; 3) produção de matéria seca e absorção de ^{32}P ; 4) absorção de ^{32}P em função do P foliar (P-total e solúvel); e 5) teor foliar de PO_4 em função do P total.

Os três métodos refletiram bem o estado nutricional do sorgo granífero, sendo que a MSPA e a MST apresentaram uma relação linear positiva, da mesma ordem de grandeza, com o P-total ($r^2 = 0,53$ e $r^2 = 0,29$, respectivamente; Figura 15); quanto ao PO_4 ($r^2 = 0,48$ e $r^2 = 0,25$, respectivamente; Figura 17); enquanto que com a absorção de ^{32}P , a relação funcional foi do tipo exponencial negativa ($r^2 = 0,64$ e $r^2 =$

0,57, respectivamente; Figura 19). Estes resultados estão totalmente de acordo com os de CAMACHO & MALAVOLTA (1996).

Embora tenha sido encontrada relação significativa entre os métodos e produção de MSR (exceto para absorção de ^{32}P), parece que esta relação funcional não seria de grande utilidade neste tipo de estudos devido a sua pobre sensibilidade (baixos coeficientes de correlação) e mudanças nos signos das interações (CAMACHO & MALAVOLTA, 1996).

Relação linear positiva foi observada quando estudou-se a concentração de PO_4 em função do teor foliar de P total (Figura 16).

Relação linear negativa ($p < 0,01$) foi encontrada ao se compararem a bioavaliação do ^{32}P com os outros métodos de avaliação do estado nutricional (Figuras 18 e 20). Resultados esses de acordo com os de CALVACHE et al. (1994) e CAMACHO & MALAVOLTA (1996).

Neste estudo verificou-se que os bioensaios de absorção de ^{32}P por raízes destacadas pela sua rapidez, sensibilidade e precisão, são de grande utilidade para se avaliar o estado nutricional e as necessidades de adubação no sorgo granífero, principalmente nos níveis mais deficientes, como têm sido propostos nesta (CAMACHO & MALAVOLTA, 1996) e outras culturas (BOWEN, 1970; HARRISON & HELLIWELL, 1979; CALVACHE et al., 1994). Além disso, demonstrou-se que a diagnose foliar em fósforo é um indicador veraz do estado interno do nutriente, resultados que estão em oposição àqueles obtidos por CAMACHO et al. (1995), na cultura do feijoeiro.

Verificou-se também, que a absorção por radiofósforo foi o melhor método para se avaliar o estado nutricional, devido ao fato de o mesmo apresentar os coeficientes de determinação mais altos com a produção da MSPA e MST. Entretanto, para seu efetivo emprego, há que se realizar estudos adicionais que deveriam ser continuados em condição de solos, em vasos, e posteriormente, em campo, para finalmente, estabelecer as curvas de calibração com a finalidade de recomendação de adubação.

Figura 15 - Relação entre teor foliar de P total e produção de matéria seca, em oito genótipos de sorgo granífero. R^2 significativo a 1% de probabilidade.

Figura 16 - Relação entre teor foliar de P total e teor foliar de PO₄, em oito genótipos de sorgo granífero. R^2 significativo a 1% de probabilidade.

Figura 17 - Relação entre teor foliar de PO₄ e produção de matéria seca, em oito genótipos de sorgo granífero. * e **: significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

Figura 18 - Relação entre teor foliar de PO₄ e absorção de ³²P por raiz destacadas de oito genótipos de sorgo granífero. R² significativo a 1% de probabilidade.

Figura 19 - Relação entre absorção ^{32}P e produção de matéria seca em 8 híbridos de sorgo granífero. **: significativo a 1%; ns: não significativo.

Figura 20 - Relação entre teor foliar de P total e absorção de ^{32}P por raízes destacadas de 8 híbridos de sorgo granífero. R^2 significativo a 1% de probabilidade.

5. CONCLUSÕES

5.1. Experimento 1

5.1.1. Os métodos utilizados refletiram bem o estado nutricional; não obstante, a diagnose foliar constituiu a melhor técnica de avaliação da deficiência de P em plantas de sorgo granífero.

5.1.2. Embora a atividade de P-ase ácida se relacionasse com o estado nutricional, constituiu o método menos indicado.

5.1.3. As médias dos valores críticos para 90% da produção máxima de matéria seca total foram de $9,14 \text{ g kg}^{-1}$, $5000 \mu\text{g g}^{-1}$ e $12,94 \mu\text{mol.g}^{-1} \text{ MF.h}^{-1}$, para P-total foliar, PO_4 foliar e atividade de P-ase, respectivamente.

5.2. Experimento 2

5.2.1. O bioensaio com radiofósforo foi o melhor método de avaliação do estado nutricional; não obstante, as duas formas de fósforo (total e solúvel) mostraram-se, também, eficientes como indicadoras do estado interno do fósforo.

5.2.2. As médias dos valores críticos para se obter o 90% da produção máxima de matéria seca total foram 13,94 g P-total kg^{-1} , 8496 $\mu\text{g PO}_4 \text{ g}^{-1}$ e 0,32 $\mu\text{mol } ^{32}\text{P} \cdot \text{g}^{-1} \text{MS} \cdot 15 \text{ min}^{-1}$.

5.3. Nos dois experimentos, a concentração de 1,0 mM P na solução nutritiva foi mais alta que a necessária para o adequado desenvolvimento das plantas de sorgo granífero.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, D.L. & BOWEN, J.E. Nutrição de cana-de-açúcar. Trad. de J. ORLANDO-FILHO. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1992. 40p.
- ANGHINONI, I. & BARBER, S.A. Phosphorus influx and growth characteristics of corn roots as influenced by phosphorus supply. **Agronomy Journal**, Madison, **72**(4):685-688, 1980.
- ARMSTRONG, R.D.; HELYAR, K.R.; PRANGNELL, P. Direct assesment of mineral phosphorus availability to tropical crops using ^{32}P labelled compounds. **Plant and Soil**, Dordrecht, **150**(2):279-287, 1993.
- ASCÊNCIO, J. Acid phosphatase as a diagnostic tool. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, **25**(9/10):1553-1564, 1994.
- ATKISON, D. Some general effects of phosphorus deficiency on growth and development. **New Phytologist**, Cambridge, **61**:101-111, 1973.

- AUNG, L. Root-shoot relationships. In: CARSON, E.W., ed. **The Plant Root and its Environment**. Virginia, USA, The University Press of Virginia, 1974. p.29-61.
- BARBER, S.A. Growth requirements for nutrients in relation to demand at the root surface. In: HARLEY, J.L. & RUSSEL, R.S. ed. **The Soil-Root Interface**, New York, Academic Press Inc., 1979. p.5-20.
- BARRET-LENARD, E.G.; ROBSON, A.D.; GREENWAY, H. Effect of phosphorus deficiency and water deficit on phosphatase activities from wheat leaves. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, 33(135):682-693, 1982.
- BARRET-LENARD, E.G. & GREENWAY, H. Partial separation and characterization of soluble phosphatases from leaves of wheat grown under phosphorus deficiency and water deficit. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, 33(135):694-704, 1982.
- BASSO, L.C. Atividade de fosfatase ácida em plantas. Piracicaba, ESALQ/USP, sd. 3p.
- BERGMANN, W. **Nutritional disorders of plants**: development, visual and analytical diagnosis. Jena, Gustav Fischer, 1992. 741p.

- BESFORD, R.T. A phosphatase as a potential indicator of phosphorus status of the glasshouse cucumber (*Cucumis sativus*). **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, **29**(1):87-91, 1978.
- BESFORD, R.T. Nutrient imbalances in tomato plants and acid phosphatase activity in the leaves. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, **30**(4):275-280, 1979a.
- 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, **30**(4):281-285, 1979b.
- BESFORD, R.T. Quantitative aspects of leaf acid phosphatase activity and the phosphorus status of tomato plants. **Annals of Botany**, London, **44**(2):153-161, 1979c.
- BESFORD, R.T. A rapid tissue test for diagnosing phosphorus deficiency in the tomato plant. **Annals of Botany**, London, **45**(2):335-227, 1980.
- BIELESKI, R.L. & FERGUSON, I.B. Physiology and metabolism of phosphate and its compounds. In: PIRSON, A. & ZIMMERMANN, M.H. ed. **Encyclopedia of Plant Physiology**. New York, Springer-Verlag, 1983. Vol. 15A, p.422-449.

- BIELESKI, R.L. & JOHNSON, P. The external location of phosphatase activity in phosphorus deficient *Spirodela oligorhiza*. **Australian Journal of Biological Science**, Melbourne, **25**(4):707-720, 1972.
- BOHN, W. Methods of studying root system. Berlin, Springer Verlag, 1979. 188p.
- BOUTIN, J.; PROVOT, M.; ROUT, L. Effect of cicloheximide and renewal of phosphorus supply on surface acid phosphatase activity of phosphorus deficient tomato roots. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, **51**(4):353-360, 1981.
- BOWEN, G.D. Early detection on phosphate deficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, **1**(5):293-298, 1970.
- BROETTO, F. & CRÓCOMO, O.J. Acúmulo de antocianina e variação da atividade de enzimas do metabolismo de fenilpropanóides e flavonóides em cultura de células de cenoura (*Daucus carota* L.) induzidos por luz ultravioleta. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, São Carlos, **5**(1):79, 1993.
- BROOKS, A. Effects of phosphorus nutrition on ribulose-1,5-biphosphate carboxilase activation, photosynthetic quantum yield and amounts of some Calvin-cycle metabolites in spinach leaves. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, **13**:221-237, 1986.

- CALVACHE, A.M.; BERNARDI, A.C.C.; OLIVEIRA, F.C.; PRADA NETO, E.; SILVA, J.A.A.; MALAVOLTA, E. Bioavaliação do estado nutricional do arroz (*Oryza sativa* L. var. IAC-165) e do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L. var. Carioca) utilizando ^{15}N e ^{32}P . **Scientia Agricola**, Piracicaba, **51**(3):393-398, 1994.
- CAMACHO, R. & MALAVOLTA, E. Avaliação da composição química em sementes de vinte cultivares venezuelanos de sorgo granífero. **Revista da Agricultura**, Piracicaba, **70**(1):103-115, 1995.
- CAMACHO, R.; CALVACHE, A.M.; FALCÃO, N.; FERNANDES, F.; DEMATTÊ, J.A.M.; MALAVOLTA, E. Avaliação do estado nutricional do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivado em solução nutritiva, com variação no fornecimento de N, P e K. **Scientia Agricola**, Piracicaba, **52**, 1995 (no prelo).
- CAMACHO, R. & MALAVOLTA, E. Evaluación del estado nutricional de seis híbridos venezolanos de sorgo granífero (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Phyton**, Vicente Lopez (Buenos Aires), **58**, 1996 (no prelo).
- CHAPIN, F.S. & VANCLEVE, L. Approaches to studying nutrient uptake, used and loss in plants. In: PEARCY, R.W.; EHLERINGER, J.; MOONEY, H.A.; RUNDELL, P.W., ed. **Plant Physiological Ecology: Field Methods and Instrumentation**. London, Chapman & Hall, 1992. Cap.10, p.185-207.
- CHAPIN, F. & BIELESKI, R. Mild phosphorus stress in barley and related low phosphorus-adapted barley grass: phosphorus fractions and phosphate absorption in relation to growth. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, **54**(3):309-317, 1982.

- CLARK, R.B. Characterization of phosphate of intact maize roots. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, **23**(3):458-460, 1975.
- CLARK, R.B. & BROWN, J.C. Differential phosphorus uptake by phosphorus-stressed corn inbreds. **Crop Science**, Madison, **14**(4):505-508, 1974.
- CLARKSON, D.T. & LÜTTGE, U. Mineral nutrition: inducible and repressible nutrient transport systems. **Progress in Botany**, New York, **52**(1):61-83, 1991.
- CLARKSON, D.T. & SCATERGOOD. Growth and phosphate transport in barley and tomato plants during the development of, and recovery from phosphate stress. **Journal of Experimental Botany**, London, **33**:865-875, 1982.
- COSGROVE, D.J. Biophysical control of plant cell growth. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, **37**:377-405, 1986.
- DEY, S.K. & KAR, M. Antioxidante efficiency during callus initiation from mature rice embryo. **Plant Cell Physiology**, Tokyo, **36**(4):543-549, 1995.
- DOBERMANN, A. & PAMPOLINO, M.F. Indirect leaf area index measurement as a tool for characterization rice growth at the field scale. **Communications in Soil Science and Plant Annalysis**, New York, **26**(9/10):1507-1523, 1995.
- DREW, M.C. & SAKER, L.R. Nutrient supply and the growth of seminal root system in barley. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, **29**(109):435-451, 1978.

- DREW, M.C. & SAKER, R.L. Uptake and long-distance transport of phosphate, potassium and chloride in relation to internal ion concentrations in barley evidency of non-allosteric regulation. **Planta**, Berlin, **160**:500-507, 1989.
- DUFF, S.M.G.; SARATH, G.; PLAXTON, W.C. The role of acid phosphatases in plant phosphorus metabolism. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, **90**(4):791-800, 1994.
- DUNLOP, J. & GARDINER, S. Phosphate uptake, proton extrusion and membrane electropotentials of phosphorus-deficient *Tripholium repens* L. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, **44**(269):1801-1808, 1993.
- ELSTNER, E.F. Oxygen activation and oxygen toxicity. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, **33**:73-96, 1982.
- FAO. Boletín trimestral de estadísticas. Roma, **8**(1/2):19-27, 1995.
- FERNANDEZ, D.S. & ASCENCIO, J. Acid phosphatase activity in bean and cowpea plants grown under phosphorus stress. **Journal of Plant Nutrition**, New York, **17**(2/3):229-241, 1994.
- FOSKET, D.E. Plant growth and development: a molecular approach. San Diego: Academic Press, 1994. 580p.

FREEDEN, A.L.; RAO, I.M.; TERRY, N. Influence of phosphorus nutrition on growth and carbon partitioning in *Glycine max*. **Plant Physiology**, Rockville, **89**(1):225-230, 1989.

FRIED, M. Quantitative evaluation of processed and natural phosphates. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, **2**(3):241-244, 1954.

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, **7**(11):1583-1595, 1984.

GARCIA, M. Algunas respuestas morfofisiológicas inducidas por el estrés por fósforo y capacidad de recuperación de plantas de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill, var. Tropic) cultivadas en soluciones nutritivas. San Juan de los Morros, Venezuela, 1990. 115p. (Asistente - Area Ciencias Agropecuarias, Universidad Rómulo Gallegos).

GARCIA, M. & ASCENCIO, J. Root morphology and acid phosphatase activity in tomato plants during development of and recovery from phosphorus stress. **Journal of Plant Nutrition**, New York, **15**(1):2491-2503, 1992.

GERLOFF, G.C. Plant efficiencies in the uses of nitrogen, phosphorus and potassium. In: WRIGHT, M.J., ed. **Plant adaptation to mineral stress in problem soils**. New York, Cornell University Agriculture Experimental Station, 1976. p.161-173.

- GLASS, A.D. A regulation of potassium absorption in barley roots. **Plant Physiology**, Rockville, **56**(3):377-380, 1975.
- GLASS, A.D. Ion absorption and utilization: the cellular level. In: BALIGAR, V.C. & DUNCAN, R.R., ed. **Crops as enhancers of nutrient use**. San Diego, Academic Press, 1990. p.37-64.
- GOURLEY, C.J.P.; ALLAN, D.L.; RUSELLE, M.P. Differences in response to available phosphorus among white clovers cultivars. **Agronomy Journal**, Madison, **85**(2):296-301, 1993.
- HAJABBASI, N.A. & SCHUMACHER, T.E. Phosphorus effects on root growth and development in two maize genotypes. **Plant and Soil**, Dordrecht, **158**(1):39-46, 1994.
- HARRISON, A.F. & HELLIWELL, D.R. A bioassay for comparing phosphorus availability in soils. **Journal of Applied Ecology**, Oxford, **16**(6):497-505, 1979.
- HECHT-BUCHHOLZ, Ch. Light and electron microscopic investigation of the reactions of various genotypes to nutritional disorders. In: SARÍC, M.R. & LOUGHMAN, B.C. ed. **Genetic aspects of plant nutrition**. The Hague, Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk, 1983. p.17-31.

- HELDT, H.W.; CHON, C.J.; MARONDE, D.; HEROLD, A.; STANKOVIC, Z.C.; WALKER, D.A.; KRAMINER, A.; KIRK, M.R.; HEBER, U. Role of orthophosphate and others factors in the regulation of starch formation in leaves and isolated chloroplast. **Plant Physiology**, Rockville, **59**(6):1146-1155, 1977.
- HEWITT, E.J. & TATHAN, P. Interaction of mineral deficiency and nitrogen source on acid phosphatase activity in leaf extracts. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, **11**(3):367-376, 1960.
- JARREL, W.M. & BEVERLY, R.B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in Agronomy**, New York, **34**:197-224, 1981.
- JOHNSON, C.M.; STOUT, P.R.; BROYER, T.C.; CARLTON, A.B. Comparative chlorine requirement of different plant species. **Plant and Soil**, The Hague, **8**(4):337-353, 1957.
- JUMA, N.G. & TABATABAI, M.A. Phosphatase activity in corn and soybean roots: conditions for assay and effects of metals. **Plant and Soil**, Dordrecht, **107**(1):39-47, 1988.
- KATZ, D.; GERLOFF, G.; GABELMAN, W. Effect of phosphorus stress on the rate of phosphate uptake during resupply to deficient tomato plants. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, **67**(1):23-28, 1986.

- KUMMEROVA, M. & BURESOVA, I. The effect of exogenous phosphate deficiency on the activity of acid phosphatase of the root of two mayze genotypes. **Biologia Plantarum**, Praga, **32**(1):1-7, 1990.
- LEFEBVRE, D.D. & GLASS, A.D.M. Regulation of phosphate influx in barley roots. Effects of phosphate deprivation and reduction of influx with provision of orthophosphate. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, **54**:199-200, 1982.
- LEIGH, R.A. & STOREY, R. Nutrient compartmentation in cells and its relevance to the nutrition of the whole plant. In: PORTER, J.R. & LAWLOR, D.W. eds. **Plant Growth Interactions with Nutrition and Environment**. Cambridge, Cambridge University Press, 1991. p.33-54.
- LOCKMAN, R.B. Mineral composition of grain sorghum plants. II. As affected by soil acidity, soil fertility, stage of growth, variety, and climate factors. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, **3**(4):283-293, 1972a.
- LOCKMAN, R.B. Mineral composition of grain sorghum plants. III. Suggested nutrient sufficiency limits at various stages of growth. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, **3**(4):295-303, 1972b.
- LOUGHMAN, B.C.; ROBERTS, S.C.; GOODWIN-BAILEY, C.I. Varietal differences in physiological and biochemical responses to changes in the ionic environment. In: SARIC, M.R. & LOUGHMAN, B.C., ed. **Genetic Aspects of Plant Nutrition**, The Hague, Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk, 1983. p.173-187.

- LOUGHMAN, B.C. The application of *in vivo* techniques in the study of metabolic aspects of ion absorptio in crop plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, **99**(1):63-74, 1987.
- LUNDEGÅRDH, H. The growth of roots as influenced by pH and salt content of the medium. **Annals of the Agricultural College**, Stockholm, **10**:31-55, 1942.
- LYNCH, J.; LAÜCHLY, A.; EPSTEIN, E. Vegetative growth of the common bean in response to phosphorus nutrition. **Crop Science**, Madison, **31**(2):380-387, 1991.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo, Editora Agronômica Ceres, 1980. 251p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201p.
- MALAVOLTA, E.; BOARETTO, A.E.; MURAOKA, T. **Avaliação do estado nutricional do arroz e feijoeiro**. Piracicaba, CENA/USP, 1993. 28p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. New York, Academic Press, 1986. 674p.

MAYNARD, D.N. Nutritional disorders of vegetable crops: a review. **Journal of Plant Nutrition**, Washington, 1(1):1-23, 1979.

McLACHLAN, K.D. Leaf acid phosphatase activity and the phosphorus status of field-grown wheat. **Australian Journal of Agriculture Research**, Melbourne, 33(3):453-464, 1982.

McLACHLAN, K.D. Effect of drowght, aging and phosphorus status of leaf phosphatase activity in wheat. **Australian Journal of Agriculture Research**, Melbourne, 35(6):777-787, 1984.

McLACHLAN, K.D.; ELLIOT, D.E.; De MARCO, D.G.; GARRAN, J.H. Leaf acid phosphatase isozymes in the diagnosis of phosphorus status in field growth wheat. **Australian Journal of Agriculture Research**, Melbourne, 38(1):1-13, 1987.

MENGEL, K. & KIRKBY, E.A. Principles of plant nutrition. Bern, International Potash Institute, 4.ed., 1987. 665p.

MIMURA, T. Homeostasis and transport of inorganic phosphate in plants. **Plant Cell Physiology**, Tokyo, 36(1):1-7, 1995.

MOHR, H. & SCHOPFER, P. Plant Physiology. Berlin, Springer-Verlag, 1995. 629p.

NOUR, A. & WEIBEL, D. Evaluation of root characteristics in grain sorghum. **Agronomy Journal**, Madison, 70(2):217-218, 1984.

- POLLE, A. & RENNENBERG, H. Significance of antioxidants in plant adaptation to environmental stress. In: FOWDEN, L.; MANSFIELD, T.; STODDART, J. (Ed.). **Plant adaptation to Environmental Stress**. Chap. 15, London, Chapman & Hall, 1993. p.263-273.
- PRITCHARD, J. The control of cell expansion in roots. **New Phytologist**, Cambridge, **127**:3-26, 1994.
- RAGAJOPALAN , A.V.; DEVI, M.T.; RAGHAVENDRA, A.S. Molecular biology of C₄ phosphoenolpyruvate carboxylase: structure, regulation and genetic engineering. **Photosynthesis Research**, Dordrecht, **39**(2):115-135, 1994.
- RAO, I.M. & TERRY, N. Leaf phosphate status and photosynthesis *in vivo* in sugar beet. I. Changes in growth, photosynthesis and Calvin cycle enzymes. **Plant Physiology**, Rockville, **90**(3):814-819, 1989.
- REID, M.S. & BIELESKI, R.L. Changes in phosphatase activity in phosphorus deficient *Spirodela*. **Planta**, New York, **94**:273-284, 1970.
- REZENDE, P. & BARBER, S.A. Crescimento do sistema radicular e cinética da absorção de fósforo pelo tomateiro afetados por concentrações de fósforo na solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, **19**(10):1203-1210, 1984.

- ROSOLEM, C.A. Nutrição e adubação do feijoeiro. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. 91p. (Boletim Técnico, 8).
- RUSSEL, R.S. Plant root systems, their function and interaction with the soil. In: RUSSELL, R.S.; IGUE, K.; MEHTA, Y.R., ed. **The soil/root system in relation to Brazilian Agriculture**. Curitiba, Fundação Instituto Agrônômico do Paraná, 1981. p.3-20.
- RYCHTER, A.M. & RANDALL, D. The effect of phosphate deficiency on carbohydrate metabolism in bean roots. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, **91**:383-388, 1994.
- SAARELA, I. Inorganic leaf phosphorus as an indicator of phosphorus nutrition in cereals. In: van BEUSICHEM, M.L., ed. **Plant Nutrition: Physiology and applications**. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1990. p.779-784.
- SACHAY, J.E.; WALLACE, R.I.; JOHNS, M.A. Phosphate stress response in hydroponically grow maize. **Plant and Soil**, Dordrecht, **135**(1):85-90, 1991.
- SAKANO, K.; MATSUMOTO, M.; YAZAKI, Y.; KIYOTA, S.; OKIHARA, K. Inorganic phosphate as a negative conditioning factor in plant cell culture. **Plant Science**, Amsterdam, **107**(1):117-124, 1995.

- SALAMA, A.M.S. EI-D & WAREING, P.F. Effects of mineral nutrition on endogenous cytokinins in plant of sunflower (*Helianthus annus* L.). **Journal of Experimental Botany**, Oxford, **30**(118):971-981, 1979.
- SANCHEZ, P.A. & SALINAS, J.G. **Suelos ácidos**: estrategias para su manejo con bajos insumos en América Tropical. Bogotá, Montoya & Araujo, 1983. 93p.
- SCHMALSTIG, J.G. & COSGROVE, D.J. Coupling of solute transport and cell expansion in pea stems. **Plant Physiology**, Rockville, **94**(4):1625-1633, 1990.
- SHARP, R.E.; SILK, W.K.; HSIAO, T.C. Growth of the primary maize root at low water potentials. I. Spatial distribution of expansive growth. **Plant Physiology**, Rockville, **87**(1):50-57, 1988.
- SHIMOGAWARA, K. & USUDA, H. Uptake of inorganic phosphate by suspension-cultural tobacco cells: kinetics and regulation by Pi starvation. **Plant Cell Physiology**, Tokyo, **36**(2):341-351, 1995.
- SIGMA. Biochemicals organic compounds for research and diagnostic reagents. 1983, São Paulo. 2508p.
- SILK, W.K. & WAGNER, K.K. Growth sustaining water potential distribution in the primary corn root. **Plant Physiology**, Rockville, **66**(4):859-863, 1980.

- SILVA, F.C. da & BASSO, L.C. Avaliação da atividade *in vivo* da fosfatase ácida da folha na diagnose da nutrição fosfórica em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, **17**(3):371-375, 1993.
- SKIDMORE, E.L. & SIDDOWAY, F.H. Crop residue requirements to control wind erosion. In: OSSHWALD, W.R. ed. **Crop residue management systems**. Madison, ASA, CSSA, SSSA, special publication n°16, 1978. p.17-33.
- TAYLOR, B.K. & GOUBRAN, F.H. Effects of phosphate and pH stress on the growth and function of apple roots. **Plant and Soil**, Dordrecht, **44**(1):149-162, 1976.
- TERRY, N. & RAO, I.M. Nutrient and photosynthesis: iron and phosphorus as case studies. In: PORTER, J.R. & LAWLORD, D.W. (Ed.). **Plant Growth: interactions with nutrition and environment**. Cambridge, 1991. p.55-79.
- TOWNSEND, C.E. Recurrent selection for extended plant height and herbage yield in cicer milkreth. **Crop Science**, Madison, **35**(2):415-421, 1995.
- USUDA, H. & SHIMOGAWARA, K. Phosphate deficiency in maize. I. Leaf phosphate status, growth, photosynthesis and carbon partitioning. **Plant Cell Physiology**, Tokyo, **32**(4):497-504, 1991a.
- USUDA, H. & SHIMOGAWARA, K. Phosphate deficiency in mayze. II. Enzyme activities. **Plant Cell Physiology**, Tokyo, **32**(8):1313-1317, 1991b.

- USUDA, H. & SHIMOGAWARA, K. Phosphate deficiency in mayze. III. Changes in enzyme activities during the course of phosphate deprivation . **Plant Physiology**, Rockville, **99**(4):1680-1685, 1992.
- VANDERLIP, R.L. & REEVES, H.E. Growth stages of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Agronomy Journal**, Madison, **64**(1):13-16, 1972.
- VICENT, J.B.; CROWDER, M.W.; AVERRIL, B.A. Hydrolysis of phosphates monoesters: a biological problems with multiple chemical solutions. **Trends Biochemical of the Science**, **17**(1):105-110, 1991.
- WALLACE, T. **The diagnosis of mineral deficiencies in plants by visual symptoms**. 3.ed. London, Mejesty's Stationary Office, 1961. 125p.
- YAGODIN, B.A.; SMIRNOV, P.; PETERBURGSKI, A. Agroquímica. Moscú, Editorial Mir Moscú. Cap.6, 1982. p.336-392.
- YAN, X.; LYNCH, J.P.; BEEBE, S.E. Genetic variation for phosphorus efficiency of common bean in costrasting soil types. I. Vegetative response. **Crop Science**, Madison, **35**(4):1086-1093, 1995.
- ZAINI, Z. & MERCADO, R.T. Phosphorus nutrition and phosphatase activity of rice seedling. I. Levels of phosphorus and phosphate activity of the roots. **The Philippine Agriculturist**, Laguna, **68**(2):211-216, 1985.