

UFRRJ
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO

DISSERTAÇÃO

Escória de Siderurgia e a Nutrição Fosfatada de
Milho Inoculado com Fungos Micorrízicos
Arbusculares

Anita Bueno de Camargo

2009



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**ESCÓRIA DE SIDERURGIA E A NUTRIÇÃO FOSFATADA DE MILHO
INOCULADO COM FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES**

ANITA BUENO DE CAMARGO

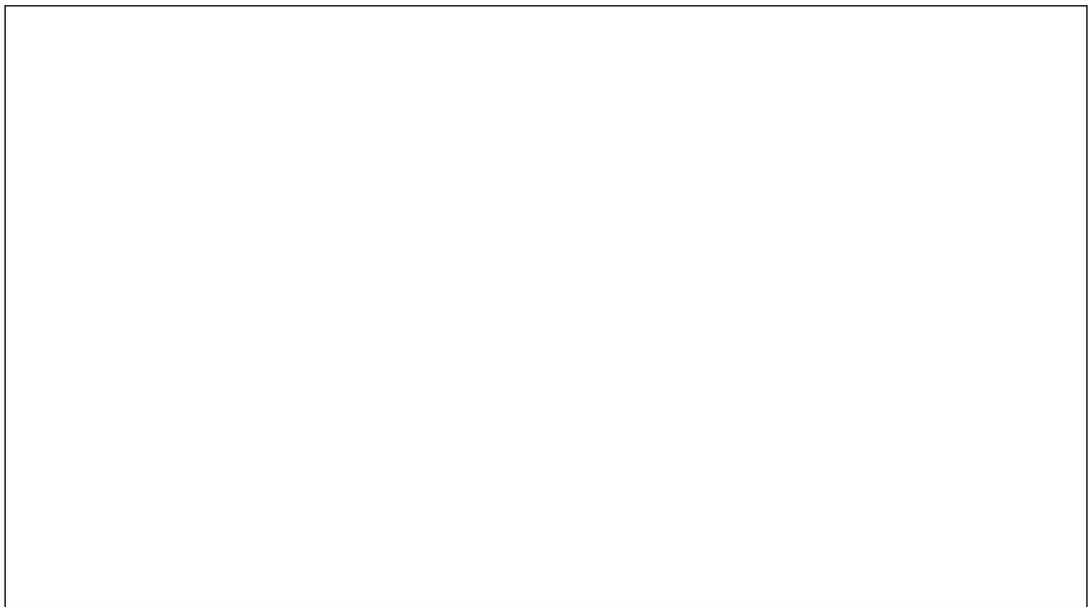
Sob a Orientação do Pesquisador
Orivaldo José Saggin Júnior

e Co-orientação da Professora
Eliane Maria Ribeiro da Silva

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Ciência do Solo

Seropédica, RJ
Março de 2009

ficha catalográfica a ser elaborada pela Biblioteca Central

A large, empty rectangular box with a thin black border, occupying the lower half of the page. It is intended for a catalog card to be created by the Central Library.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO**

ANITA BUENO DE CAMARGO

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-graduação em Agronomia, área de concentração em Ciência do Solo.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM ---DATA??-/-----

Orivaldo José Saggin Júnior. Dr. EMBRAPA Agrobiologia
(Orientador)

Ricardo Luis Louro Berbara. Ph.D. UFRRJ

Marco Aurélio Carbone Carneiro. Dr. ???

AGRADECIMENTOS

Deus nos dá opções na vida e o livre arbítrio para fazer nossas escolhas. Agradeço a Ele pelas minhas terem me dado a chance de vir até este ponto.

Agradeço também a UFRRJ, na figura do CPGA-CS, pela oportunidade de crescimento profissional e pelo engrandecimento pessoal. Aos queridos Luciene, Marquinhos e Roberto, obrigada pela amizade. Professora Lúcia, obrigada pelo apoio.

Agradeço enormemente a CAPES, pela bolsa concedida, a Embrapa Agrobiologia, pelo apoio durante a jornada.

Aos Doutores Orivaldo José Saggin Júnior e Eliane Maria Ribeiro da Silva, agradeço a orientação e co-orientação. Agradeço os conselhos, as dicas e as críticas.

Ao Doutor Nilton Curi, agradeço o apoio e o auxílio na escolha e coleta do solo utilizado neste estudo.

Aos membros da banca, Doutores Ricardo Louro Berbara e Marco Aurélio Carbone Carneiro, por se disponibilizarem ao árduo trabalho de correção e avaliação. Muito obrigada pelas preciosas dicas.

Ao querido Itamar Garcia Ignácio, pela proteção e ensinamentos diários.

A Guilherme Augusto, Cristiane, Marinei, Ricardo, Raphael, Tiara, Liana e Dyego, pela companhia e companheirismo, nos bons e maus momentos.

A Luisinho, Naldo, Serginho, Marildo e, em especial, Claudinho, pelo auxílio nas horas difíceis.

A Wilson, Lúcio e Luis Carlos, pela boa vizinhança e as “xícaras de açúcar”.

A Monalisa, Selmo e Gisele, pelos métodos, cálculos e demais ensinamentos, mesmo nas horas mais impróprias.

A Natália Zatorre, Carlos Bucher, Waldemir, Rosa, Mirian, Ana Maria, e tantos outros, pelas noites em claro devorando livros, artigos e afins.

A Andréa, por tudo.

A Isis e Bueno, por quem sou, e por me conduzirem pela vida até aqui, e a Beatriz, pelo incentivo e admiração.

A Francis Alex e Raul, pelo companheirismo na reta final.

E a tantos outros, que não caberiam aqui, mas que estão no meu coração.

Muito obrigada!

BIOGRAFIA

Anita Bueno de Camargo nasceu no Rio de Janeiro, em 1979. Filha de militar, aos 9 anos de idade mudou-se com a família para Presidente Epitácio, SP, aonde viveram por um ano. Em seguida transferiu-se para Campo Grande, MS. Sua família aventureira lhe apresentou o Pantanal nesta época, e aos 14 anos transferiu-se para a Amazônia Legal, na cidade de Imperatriz, MA. Em novembro de 1995 chegaram ao Espírito Santo, na cidade de Vila Velha, aonde residem seus pais até o presente. Lá cursou Licenciatura em Ciências Biológicas na UFES, dando ênfase curricular às disciplinas da área de Botânica, e realizando estágio voluntário na área de Anatomia Vegetal e Germinação de Sementes, no Setor de Botânica da UFES e remunerado em Gestão de Recursos Naturais e Educação Ambiental, na PMVV. Graduiu-se em novembro de 2003 e ingressou em sua primeira especialização, em Solos e Meio Ambiente, na UFLA, no ano seguinte. Foi professora efetiva de Ciências da rede municipal de Vila Velha por três anos, lecionando ainda em um Curso Técnico em Meio Ambiente da rede particular e em outras instituições de Ensino Fundamental e Médio. Neste período concluiu sua segunda especialização, em Gerenciamento de Tecnologias Ambientais para a Produção Mais Limpa, na UFES. Em 2007 foi selecionada pela UFRRJ/CPGA-CS para cursar o Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo, ciclo que se encerra com a presente dissertação.

RESUMO

CAMARGO, Anita Bueno de. **Escória de siderurgia e a nutrição fosfatada de milho inoculado com fungos micorrízicos arbusculares**. 2009. 63f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2009.

Com o objetivo de avaliar o uso da escória de siderurgia como corretivo da acidez do solo e seu efeito sobre a disponibilidade de fósforo e a simbiose micorrízica foram aplicados a um Latossolo Vermelho Distrófico, quatro corretivos de pH, sendo eles: escória ($4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$), calcário ($4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$), mistura 50% de calcário com 50% de escória ($2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de escória e $2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de calcário) e uma testemunha sem correção de pH. As dosagens de cada corretivo foram determinadas por meio de curvas de calibração do solo mantido a 80% da capacidade de retenção de água por 59 dias. A cada tratamento de corretivo foram aplicadas 5 doses de P (0, 42, 95, 231 e 480 mg dm^{-3} de solo) na forma de super fosfato triplo. Os tratamentos de corretivos e dosagens de P foram combinados com a presença e ou ausência de inóculo de fungos micorrízicos arbusculares (contendo cerca de $100 \text{ esporos}\cdot\text{mL}^{-1}$ de cada uma das espécies, *Glomus clarum* e *Gigaspora margarita*), formando um esquema fatorial $4 \times 5 \times 2$, com cinco repetições, em vasos de 3 kg de solo. Foram cultivadas plantas de milho (*Zea mays*, variedade Eldorado) sendo mantida uma planta em cada vaso após o desbaste. Foram medidas a altura e o diâmetro das plantas semanalmente, e foi retirado um disco de 8 mm da 2ª folha expandida quinzenalmente, para análise do conteúdo de fósforo. Setenta e sete dias após o plantio, as plantas foram colhidas, separando-se parte aérea e raízes (por peneiramento do solo dos vasos). Foi avaliada a taxa de colonização micorrízica das raízes e o número de esporos contidos em 50 mL de solo dos vasos, além da área foliar e da massa seca de raízes e parte aérea e do teor de nutrientes na parte aérea (P, Si, Ca, Cu, Mg, Mn, Zi e Al). Foram realizadas ainda análises para avaliação do teor de metais pesados (Cr, Co, Ni, Cd e Pb) na parte aérea, não tendo havido a detecção dos mesmos. A densidade de esporos elevou-se juntamente com a elevação das doses de P até os 95 mg dm^{-1} , havendo queda nas doses mais elevadas. A colonização micorrízica foi maior em plantas sem fósforo e tratadas com 95 mg dm^{-1} na presença de calcário, escória e na testemunha; e na dose de 42 mg P dm^{-1} solo, no tratamento misto de calcário e escória. Houve maior crescimento das plantas em altura, diâmetro, área foliar e massa seca de parte aérea e raízes das plantas inoculadas com FMAs, havendo interação entre a inoculação e as doses de fósforo aplicadas na área foliar e massa seca da parte aérea e raízes. De maneira geral, a dose mais elevada de fósforo (480 mg P dm^{-3}) inibiu o crescimento de plantas inoculadas, que exibiram, nesta condição, menor crescimento em massa seca de raízes que as não inoculadas. O P no disco de folha aos 75 dias apresentou efeito da interação entre inoculação micorrízica e doses de P, onde plantas não inoculadas exibiram aumento linear no conteúdo de P com o aumento das doses, e tiveram decréscimo no conteúdo de P na dose mais elevada de P aplicado ao solo. Quanto aos nutrientes na parte aérea, plantas inoculadas cresceram mais rapidamente, e exibiram um efeito de diluição do conteúdo. Quando comparados os conteúdos totais de nutrientes na parte aérea, plantas inoculadas apresentaram maiores quantidades absolutas de nutrientes até a dose de 213 mg dm^{-1} , desaparecendo o efeito benéfico da inoculação micorrízica na dose mais elevada de P. Não foi observado efeito dos diferentes corretivos no desenvolvimento das plantas.

Palavras-chave: Adsorção de P. Escória silicatada. Micorrizas. *Zea mays*

ABSTRACT

CAMARGO, Anita Bueno de. **Steel basic slag and phosphorus nutrition of maize inoculated with mycorrhizal fungi**. 2009. 63p. Dissertation (Master Science in Agronomy, Soil Science) Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2009.

To evaluate the use of steel basic slag as a corrective of soil acidity and its effect on phosphorus availability and mycorrhizal symbiosis, they were applied to an Rhodic Udox soil four corrective for pH, being: steel basic slag (4 Mg.ha⁻¹), lime (4 Mg.ha⁻¹), mixed 50% lime with 50% slag (2 Mg.ha⁻¹ slag and 2 Mg.ha⁻¹ lime), and a control without pH correction. The dosages of each material were determined by means of calibration curves of soil maintained at 80% field water capacity for 59 days. For each treatment there were applied 5 doses of P (0, 42, 95, 231 and 480 mg dm⁻³ of soil), as triple super phosphate. The corrective and P treatments were combined with the presence or absence of inoculums of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) (containing about 100 spores.mL⁻¹ of each species, *Glomus clarum* and *Gigaspora margarita*), forming a 4x5x2 factorial with five replicates, in pots of 3 kg of soil. Maize (*Zea mays*, variety Eldorado) plants were cultivated in the pots, with one plant in each pot after thinning. The height and diameter of the plants were measured weekly, and it was taken a disk of 8 mm from the 2nd leaf, expanded every 15 days, to analyze phosphorus content. Seventy-seven days after planting, the plants were harvested, separated the shoots and roots (by sieving the soil in the pots). The rate of roots colonization and the number of spores contained in 50 mL soil of pots, the leaf area, dry mass of roots and shoots, and the nutrient content in shoots (P, Si, Ca, Cu, Mg, Mn, Zn e Al) were evaluated. There were also tests for the content of heavy metals (Cr, Co, Ni, Cd and Pb) in the shoot, although they were not detected in the plants. The spore density increased with the increasing levels of P up to 95 mg dm⁻¹, and then reduced in the highest P dosages. The fungi colonization was highest in plants without phosphorus and treated with 95 mg P dm⁻¹ soil, in the presence of limestone, slag and in the control; and for the dosage of 42 mg P dm⁻¹ soil in the mixed limestone and slag treatment. It was observed the greatest plant growth in height, diameter, leaf area, and dry weight of shoots and roots of plants inoculated with AMF, with interaction between inoculation and phosphorus levels in leaf area and dry mass of shoots and roots. In general, the highest dosage of phosphorus (480 mg P dm⁻³) inhibited the growth of inoculated plants that exhibited, in this condition, lesser growth in dry mass of roots than the non-inoculated. The P in the leaf disc at 75 days showed a significant interaction between inoculation and P levels, where non-inoculated plants showed a linear increase in P content with increasing doses, and they showed decrease in P content at the highest dose of P applied to soil. For the nutrients in shoots, inoculated plants grew faster and they exhibit a dilution effect of the content. When comparing the total nutrient content in shoots, inoculated plants had highest absolute amounts of nutrients up to the dose of 213 mg P dm⁻¹ soil, and the beneficial effect of mycorrhizal inoculation disappeared at the highest P dosage. There was no effect of the different corrective in plant development.

Key words: P adsorption. Slag silicates. Mycorrhiza. *Zea mays*

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Capacidade de neutralização das diferentes espécies neutralizantes, em relação ao CaCO_3	7
Tabela 02. Características químicas e textural do material de Latossolo Vermelho Distrófico coletado em Lavras, MG.....	11
Tabela 03. Caracterização do calcário.....	11
Tabela 04. Caracterização da escória quanto aos seus componentes relativos à neutralização da acidez.....	12
Tabela 05. Caracterização da escória de siderurgia, de acordo com a ABNT NBR 10004:2004.....	12
Tabela 06. Fósforo remanescente (P-rem) em amostras de solo submetidas aos tratamentos de corretivos da acidez antes da condução do experimento.....	15
Tabela 07. Características químicas do solo submetido a diferentes combinações de tratamentos de corretivos de acidez e de doses de fósforo (P) por ocasião do plantio (início) e na colheita (fim) do experimento.....	16
Tabela 08. Resumo das análises de variância apresentando o nível de significância pelo teste F das variáveis analisadas em milho cultivado com ou sem inoculação de fungos micorrízicos arbusculares sob diferentes tratamentos de corretivos de acidez do solo e de doses de fertilizante fosfatado.....	20
Tabela 09. Altura das plantas de milho inoculadas e não inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares em diferentes épocas de avaliação.....	21
Tabela 10. Altura das plantas de milho cultivado em solo com diferentes tratamentos de corretivos de acidez em diferentes épocas de avaliação.....	21
Tabela 11. Diâmetro do caule das plantas de milho inoculadas e não inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares em diferentes épocas de avaliação.....	23
Tabela 12. Diâmetro do caule das plantas de milho cultivado em solo com diferentes tratamentos de corretivos de acidez em diferentes épocas de avaliação.....	24
Tabela 13. Diâmetro do caule, aos 63 e 70 DAP, de plantas de milho inoculadas ou não inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares cultivadas em solo com diferentes tratamentos de corretivos da acidez.....	26
Tabela 14. Massa de raízes secas e área foliar de plantas de milho inoculadas e não inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares cultivadas em solo com diferentes tratamentos de corretivos da acidez.....	30
Tabela 15. Quantidade de fósforo em discos de folha de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em diferentes épocas de avaliação.....	32
Tabela 16. Quantidade de fósforo em discos de folha de milho cultivado em solo com diferentes tratamentos de corretivos de acidez em diferentes épocas de avaliação.....	32
Tabela 17. Quantidade de fósforo em discos de folha de milho cultivado em solo com diferentes tratamentos de doses de fósforo em diferentes épocas de avaliação.....	33

Tabela 18. Quantidade de manganês na parte aérea de milho cultivado em solo com diferentes tratamentos de corretivos de acidez em diferentes doses de fósforo.....	50
Tabela 19. Quantidade de alumínio na parte aérea de milho inoculado ou não com fungos micorrízicos arbusculares, cultivado em solo com diferentes tratamentos de corretivos de acidez em diferentes doses de fósforo.....	51
Tabela 20. Densidade de esporos de fungos micorrízicos na rizosfera de milho inoculado com mistura de <i>Glomus clarum</i> e <i>Gigaspora margarita</i> cultivado em solo com diferentes tratamentos de corretivos de acidez em diferentes doses de fósforo.....	52
Tabela 21. Colonização micorrízica nas raízes de milho inoculado com mistura de <i>Glomus clarum</i> e <i>Gigaspora margarita</i> cultivado em solo com diferentes tratamentos de corretivos de acidez em diferentes doses de fósforo.....	53

LISTA DE FIGURAS

- Figura 01.** Curva de Neutralização de dosagens de Escória de Aciaria (a) e Calcário (b) ao longo do tempo de incubação.....13
- Figura 02.** Curva ajustada do pH em função da dose de escória (a) e calcário (b) após 59 dias de incubação com material de Latossolo Vermelho Distrófico.....14
- Figura 03.** Altura das plantas de milho em diferentes épocas de avaliação em função das doses de fósforo aplicadas ao solo.....22
- Figura 04.** Altura ao final da condução do experimento (77 dias após o plantio) de plantas de milho inoculadas ou não inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de fósforo aplicadas ao solo.....23
- Figura 05.** Diâmetro do caule das plantas de milho em diferentes épocas de avaliação em função das doses de P aplicadas ao solo.....25
- Figura 06.** Diâmetro do caule das plantas de milho inoculadas ou não inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo.....27
- Figura 07.** Massa da parte aérea seca de plantas inoculadas ou não inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo.....28
- Figura 08.** Massa de raízes secas de plantas inoculadas ou não inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo.....29
- Figura 09.** Área foliar de plantas de milho inoculadas ou não inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo.....29
- Figura 10.** Massa de raízes secas de milho cultivado sobre solo com diferentes tratamentos corretivos em função das doses de P aplicadas ao solo.....31
- Figura 11.** Quantidade de fósforo, aos 45 dias após o plantio (DAP), em discos de folha de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo.....33
- Figura 12.** Quantidade de fósforo, aos 75 dias após o plantio (DAP), em discos de folha de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo.....34
- Figura 13.** Quantidade de fósforo, aos 30 dias após o plantio (DAP), em discos de folha de milho cultivado sobre solo com diferentes tratamentos corretivos em função das doses de P aplicadas ao solo.....35
- Figura 14.** Quantidade de fósforo, aos 60 dias após o plantio (DAP), em discos de folha de milho cultivado sobre solo com diferentes tratamentos corretivos em função das doses de P aplicadas ao solo.....36
- Figura 15.** Teor e quantidade total de fósforo na parte aérea de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo.37
- Figura 16.** Teor e quantidade de fósforo na parte aérea de milho cultivado sobre solo com diferentes tratamentos corretivos de acidez.....38

Figura 17. a: Teor de cálcio na parte aérea de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo. b: Quantidade de cálcio na parte aérea de milho cultivado sobre solo com diferentes tratamentos corretivos de acidez em função de doses de fósforo aplicadas ao solo.....	40
Figura 18. Teor e quantidade total de magnésio na parte de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo.....	41
Figura 19. Dispersão das médias de matéria da parte aérea seca de milho plotadas em função da relação Ca:Mg no solo após a condução do experimento. a): separação por tratamento de inoculação ou não inoculação com fungos micorrízicos arbusculares; b): separação por tratamentos de corretivos de acidez; c): separação por tratamentos de doses de P aplicadas ao solo.....	43
Figura 20. a: Teor de cobre na parte aérea de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo.....	44
Figura 21. Teor e quantidade total de zinco na parte de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo.....	46
Figura 22. Teor e quantidade de zinco na parte aérea de milho cultivado sobre solo com diferentes tratamentos corretivos de acidez.....	47
Figura 23. Quantidade de ferro na parte aérea de milho cultivado sobre solo com diferentes tratamentos corretivos de acidez, inoculado ou não com fungos micorrízicos arbusculares....	48
Figura 24. Teor e quantidade total de manganês na parte aérea de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo.....	49
Figura 25. Teor de silício na parte aérea de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo.....	51
Figura 26. Densidade de esporos de fungos micorrízicos arbusculares na rizosfera de milho cultivado sobre solo com diferentes tratamentos corretivos em função das doses de P aplicadas ao solo.....	53
Figura 27. Colonização micorrízica das raízes de milho cultivado sobre solo com diferentes tratamentos corretivos em função das doses de P aplicadas ao solo.....	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Fósforo na Planta e no Solo.....	2
2.2 Formação de Solos Tropicais Ácidos	3
2.3 Solos Ácidos e a Alta Capacidade de Adsorção de Fósforo.....	4
2.4 Correção da Acidez do Solo com Calcário ou Escória de Siderurgia	5
2.5 Ação Neutralizante do Calcário e da Escória	5
2.6 Ação Fertilizante do Calcário ou Escória de Siderurgia.....	7
2.7 Redução da Adsorção de Fósforo pelo solo com o uso de Escória.....	8
2.8 Fungos Micorrízicos Arbusculares e a Absorção de Fósforo.....	8
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	11
3.1 Material de Solo	11
3.2 Caracterização dos materiais corretivos	11
3.2.1 Calcário	11
3.2.2 Escória.....	11
3.3 Pré-Ensaio para Estabelecimento de Dosagens de Corretivos de Acidez.....	12
3.4 Pré-Ensaio para Estabelecimento de Dosagens de Fósforo	14
3.5 Tratamentos e Delineamento Experimental	15
3.6 Experimento em Casa de Vegetação	15
3.7 Avaliações Microbiológicas	17
3.7.1 Determinação da densidade de esporos de fungos micorrízicos.....	17
3.7.2 Avaliação da colonização micorrízica das raízes.....	17
3.8 Avaliações Químicas	17
3.8.1 Análise de fósforo no disco de folha.....	17
3.8.2 Análise do teor de silício na parte aérea	17
3.8.3 Análise de fósforo na parte aérea.....	17
3.8.4 Análise de cálcio, magnésio, alumínio, cobre, ferro, manganês, zinco, cromo, cobalto, níquel, cádmio e chumbo na parte aérea	18
3.9 Avaliações Biométricas	18
3.10 Análises Estatísticas	18
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
4.1 Altura das Plantas	19
4.2 Diâmetro do Caule.....	23
4.3 Desenvolvimento Vegetativo das Plantas ao Final do Experimento.....	27
4.4 Fósforo no Disco de Folha (PDF)	31
4.5 Nutrientes na Parte Aérea	35
4.6 Esporulação e Colonização de Fungos Micorrízicos.....	52
5 CONCLUSÕES.....	55
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

É consenso na comunidade científica que, de modo geral, os solos tropicais apresentam baixo nível natural de fósforo (P), uma vez que possuem baixo teor de bases trocáveis e considerável acidez, o que acarreta uma alta fixação deste nutriente. Grandes quantidades de adubos fosfatados são empregadas para sanar esta deficiência.

A aplicação de P geralmente se dá através de fosfatos altamente solúveis (p.ex. superfosfatos e fosfatos de amônio). Esses adubos, em contato com a água, liberam ácido fosfórico (H_3PO_4) e fosfato ácido de cálcio ($CaHPO_4$), formando solução ácida, que leva a dissolução dos óxidos de ferro, alumínio e manganês do solo, aumentando a fixação de P (BELTRÁN et al., 1998). Portanto, em lavouras de grande exigência de P, como o milho, a adubação fosfatada deve ser criteriosa e priorizadas técnicas que aumentem a disponibilidade deste nutriente sem a necessidade de grandes aplicações, minimizando o desperdício (o IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas - estimou, em 1990, perdas de até 98% desse elemento, desde a lavra até a assimilação pelas culturas) e a indisponibilidade pela fixação.

Cálculos estimam que, se considerado acréscimo de 5% na demanda anual por P, as reservas nacionais limitar-se-iam a não mais que 40 anos (IPT, 1990). O uso de resíduos industriais pode contribuir para racionalizar as reservas minerais não renováveis, preservando-as e promovendo sua economia. Em todo o mundo têm sido feitos ensaios em casa de vegetação e campo para avaliar a possibilidade de reaproveitamento de materiais antes considerados resíduos sem uso, como a lama cal, os lodos de esgoto e a escória de aciaria. Se aplicados de maneira racional, estes materiais podem ser utilizados para finalidades agrícolas, preservando as poucas reservas minerais naturais e gerando uma alternativa mais nobre e promissora para a disposição destes materiais no ambiente, que não os aterros controlados.

A resistência ao uso destes materiais em larga escala está na presença de patógenos e metais pesados em sua constituição, ocasionando risco de contaminação principalmente do lençol freático. Isto mostra a necessidade de estudos sobre os materiais a serem aproveitados, suas doses de aplicação e a influência dos constituintes no sistema solo-planta e organismos associados. Há uma ampla gama de estudos realizados a respeito da utilização de escória de aciaria na correção do pH de solos ácidos. Sua composição (predominantemente silicatos de cálcio) exibe um padrão de comportamento químico semelhante ao do calcário.

Entretanto, há poucos estudos que relacionam a correção da acidez do solo com estas escórias e a disponibilidade de P no solo. É possível que haja interação entre os silicatos aplicados e o fosfato, havendo uma reação competitiva entre íons silicato e íons fosfato pelo mesmo sítio de adsorção (MATICHENKOV & BOCHARNIKOVA, 2001). Além disso, para o cultivo da maioria dos solos tropicais há a necessidade de adequação do pH da solução do solo, prática que quando realizada visando uma maior disponibilidade de P, deve resultar em valores na faixa de 6,0 – 6,5 (pH ótimo para a disponibilidade deste nutriente) (RAIJ, 1991).

O uso de fungos micorrízicos arbusculares associados às raízes das culturas beneficia nutricionalmente a planta, funcionando como finíssimas extensões radiculares, que aumentam a interceptação do P difundido na solução do solo, alcançando áreas do solo inacessíveis às raízes e levando a absorção do nutriente além da zona de depleção radicular, recebendo em troca fotoassimilados da planta como fonte de carbono. Assim, estes organismos podem ser considerados como auxiliares à adubação fosfatada pois, em geral, plantas micorrizadas exibem uma maior absorção deste e outros nutrientes do que as não micorrizadas.

O objetivo deste estudo é avaliar o uso de escórias de siderurgia como corretivo de acidez do solo, visando um melhor aproveitamento da adubação fosfatada na presença e ausência de fungos micorrízicos, sobre o crescimento e nutrição de plantas de milho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Fósforo na Planta e no Solo

Atuando na fotossíntese, respiração e transferência de energia, divisão celular, crescimento das células e em outros diversos processos metabólicos celulares, o fósforo promove a formação e crescimento das raízes, melhora a qualidade de muitas frutas e verduras, sendo essencial para a formação de sementes e maturação de frutos, para o desenvolvimento mais rápido das plantas e, para aumentar sua resistência a estresses bióticos e abióticos. (OLIVEIRA & BISCARO, 2007).

O fósforo ocorre no solo através de compostos derivados do ácido ortofosfórico e, comumente, dos pirofosfatos, sendo as apatitas os minerais primários fosfatados mais comumente encontrados nas rochas e que são liberados pela intemperização, originando minerais secundários mais estáveis, ou incorporados biologicamente a compostos orgânicos (DOS SANTOS et al., 2008).

Em solos altamente intemperizados, como os latossolos, as formas inorgânicas de fósforo encontram-se predominantemente ligadas com alta energia à fração mineral e formas orgânicas, física e quimicamente estabilizadas, e o grau de estabilidade destes compostos os classifica como lábeis e não-lábeis, onde a fração lábil é o conjunto de compostos fosfatados capazes de repor rapidamente a solução do solo, uma vez que este for absorvido pelas plantas e microrganismos (WALKER & SYERS, 1976; CROSS & SCHLESINGER, 1995).

É raro observar solos não fertilizados que liberam P rapidamente para sustentar a alta taxa de desenvolvimento das plantas cultivadas. Em muitos agrossistemas em que a aplicação de P no solo é necessária para assegurar a produtividade, a absorção do P aplicado ao solo pelas plantas é muito baixa, porque mais de 80% torna-se imóvel e indisponível devido à adsorção na superfície de óxidos de Fe e Al ou a precipitação como fosfatos de cálcio ou, ainda, pela conversão para forma orgânica pela incorporação na biomassa microbiana (SCHACHTMAN et al., 1998). A falta de P no solo se reflete na diminuição das colheitas sem maiores sintomas, conhecida como “fome oculta” e em casos extremos, a planta mostra “sintoma de deficiência” que são caracterizados por folhas velhas de cor verde-azulada, chegando à tonalidade púrpura nas folhas e caule, muitas vezes acompanhada de raízes alongadas e mais finas que o normal (BLEVINS, 1999; OLIVEIRA & BISCARO, 2007).

Baixos níveis de P disponível no solo são uma condição muito comum no mundo todo, mesmo que o P total do solo seja alto, pois este nutriente é fixado muito fortemente aos compostos orgânicos e inorgânicos do solo e torna-se indisponível para a absorção radicular. Uma fonte solúvel de fósforo adicionada ao solo na forma de solução apresenta mais de 90% de adsorção e precipitação na primeira hora de contato, e com o tempo a continuidade da reação leva à fixação do fósforo, tornando-o não-lábil, principalmente em condições tropicais (GONÇALVES, 1988). A calagem pode reduzir a adsorção/precipitação de fósforo em muitos casos, pois com o aumento do pH a carga superficial do plano de adsorção se torna progressivamente mais negativa, aumentando a repulsão entre esta superfície e o ânion fosfato (NOVAIS & SMYTH, 1999).

Para ter acesso ao P fixado, as plantas desenvolveram estratégias, como a associação com fungos micorrízicos e a secreção de ácidos orgânicos como o cítrico e o málico, que complexam o Al e o Fe do solo, liberando o P (BLEVINS, 1999).

2.2 Formação de Solos Tropicais Ácidos

A acidez é o principal fator de degradação química do solo, abrangendo áreas extensas nas zonas temperadas e nos trópicos (NOLLA & ANGUINONI, 2003). Os solos ácidos ocupam aproximadamente 30% dos solos de todo o mundo, sendo o maior fator de degradação dos solos em áreas extensivas nas zonas tropicais (BALIGAR & FAGERIA, 1997). No Brasil, cerca de 70% do território é composto por solos ácidos, com capacidade de reduzir o potencial produtivo das culturas em cerca de 40% (QUAGGIO, 2000).

A formação dos solos ácidos, de maneira geral, é o resultado da combinação de muitos fatores, onde as condições climáticas exercem grande influência devido à alta temperatura e intensidade de chuvas, que favorecem a rápida decomposição da rocha com a lixiviação de bases trocáveis e a consequente intemperização do solo e formação da acidez. Baligar & Fageria (1997) comentam que a eficiência na aquisição, transporte e utilização de nutrientes pelas plantas é controlada pela capacidade do solo em suprir os nutrientes e pela capacidade das plantas para absorver, utilizar, e remover os nutrientes, fatores estes que variam com o solo, tipo de planta e com as condições climáticas. A associação das características dos solos ácidos e da nutrição da planta é complexa e envolve o conhecimento de muitas áreas.

De acordo com Meurer (2006), solos que se encontram nas zonas de clima quente e com altas precipitações pluviométricas são, na maioria, ácidos ($\text{pH} < 5,5$), mesmo que seus materiais de origem tenham reação básica na água. Isto ocorre por vários processos descritos a seguir.

A princípio, ocorre a solubilização da rocha através da água da chuva que é ácida devido à dissolução do CO_2 da atmosfera:



Os íons H^+ formados nessa reação reagem com os minerais que constituem a rocha, liberando cátions e ânions que irão servir de nutrientes para os organismos que começam a se estabelecer sobre a rocha, promovendo reações bioquímicas dos microrganismos que crescem sobre as rochas, como na reação de nitrificação ($\text{NH}_4^+ + 2 \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + 2 \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$), e ácidos orgânicos produzidos por estes também liberam íons H^+ para o meio, o que aumenta a dissolução da rocha e a liberação de cátions (MEURER, 2006).

Além da dissociação do ácido carbônico pela água da chuva, a dissociação de prótons de grupamentos carboxílicos e fenólicos da matéria orgânica e de restos culturais, a adição de fertilizantes nitrogenados, e a lixiviação de cátions como cálcio, potássio e magnésio, contribuem efetivamente para a acidez dos solos (SÁ, 1993, WIETHÖLTER, 2000 e 2002).

Concentrações de cátions na rocha matriz diferem das de seus solos correspondentes, já que, nos solos, os teores são muito mais baixos para Ca, Mg, Na e K, e os teores de Fe e Al são quase sempre altos, demonstrando que, no processo de formação dos solos, alguns cátions, por formarem compostos mais solúveis, podem ser facilmente percolados no perfil do solo e lixiviados enquanto que o alumínio e o ferro concentram-se devido às suas propriedades de formarem compostos de muito baixa solubilidade nos solos que se formam em boas condições de oxigenação (MEURER, 2006). Durante a formação do solo originam-se minerais e substâncias húmicas que têm a capacidade de atrair íons, o que evita que parte dos íons da rocha matriz sejam percolados e lixiviados no solo. Entretanto, a atração é dependente da valência dos íons (MEURER, 2006). Assim, por exemplo, íons como alumínio (valência +3) são mais fortemente atraídos para as proximidades das partículas com carga negativa, em detrimento do sódio e do potássio (valência +1) e do cálcio e magnésio (valência +2). Com isso, o alumínio permanece mais no solo, enquanto os outros cátions tendem a ser mais

percolados no perfil. Essa é a razão que faz os solos tropicais terem muito alumínio e ferro e baixos teores de cálcio, magnésio, sódio e potássio na forma trocável.

Cálcio e Magnésio que são lixiviados têm reação básica em contato com a água, enquanto os íons de Ferro e Alumínio que permanecem no solo têm reações ácidas liberando íons H^+ , que pode abaixar ainda mais o pH do solo. O íon alumínio em solução aquosa, através de uma seqüência de reações de hidrólise, precipita sob a forma de $Al(OH)_3$, produzindo, em cada etapa, íons H^+ , de acordo com a reação simplificada:



Assim, este conjunto de fatores transformam mesmo uma rocha com reação básica (rica em Ca, Mg e K) em um solo ácido rico em Fe e Al.

2.3 Solos Ácidos e a Alta Capacidade de Adsorção de Fósforo

A formação de um solo é um processo complexo e depende do clima, biota, composição química da rocha matriz, tempo e relevo, de forma que não pode ser descrito como uma única reação, mas sim várias reações simultâneas ou em seqüência. Desta forma, paralelamente às perdas de cátions básicos e reações que acidificam o solo ocorre a transformação dos minerais primários por liberação da sílica, a qual é parte lixiviada e parte forma minerais secundários com o Fe e Al, como a caulinita e a gibsita, chamados minerais 1:1, que têm estabilidade alta em meio ácido, e se acumulam na fração argila dos solos tropicais altamente intemperizados e lixiviados, rica em caulinita, gibsita, óxidos e hidróxidos de Fe e Al possuem cargas dependentes de pH e em um meio ácido apresenta a protonação dos grupos hidroxilas, o que aumenta as cargas positivas do solo e a retenção de fosfato (MEURER, 2006).

Em geral, o teor total de fósforo dos solos é de 200 a 3000 $mg\ kg^{-1}$, dos quais menos de 0,1% se encontram na solução do solo, e em solos agrícolas os valores de fósforo em solução situam-se entre 0,002 e 2 $mg\ L^{-1}$ (FALCÃO & DA SILVA, 2004).

O termo “fixação de fósforo” envolve mecanismos de adsorção, através de ligações eletrostáticas ou covalentes; precipitação com formação de compostos insolúveis, indisponibilizando o elemento para as plantas (ALCARDE et al., 1992). Ocorrem diferenças entre solos e quanto à eficiência do processo de utilização de fósforo pelas plantas que se relacionam aos processos de adsorção (FARDEAU, 1996).

Desta maneira, fósforo pode ser considerado como um dos nutrientes que mais limitam a produtividade das culturas nos solos com grande quantidade de cargas variáveis com o pH, que predominam nas regiões tropicais e subtropicais. RAIJ (1991) explica que, em solos ácidos, as condições que favorecem a imobilização em formas menos lábeis dos fosfatos adicionados ao solo, são os maiores teores de argila, maior ocorrência na fração argila de óxidos e hidróxidos de Fe e Al e valores mais baixos do pH.

Segundo Raij (1991), o fósforo tem tendência a formar compostos de solubilidade muito baixa com Fe e Al em condições ácidas e com cálcio em condições básicas devido à sua afinidade com esses três cátions, tão abundantes nos solos. A imobilização do fósforo pode-se ocorrer na solução do solo, com formação de precipitados pouco solúveis com esses metais, ou pode ocorrer na superfície das partículas sólidas de argila, óxidos de ferro e alumínio. A natureza da ligação que se estabelece é do tipo covalente, de alta energia. A adsorção de fosfatos no solo dá-se por um processo praticamente irreversível, não tendo, assim, relação com o processo de troca iônica.

MOREIRA et al. (2006) comprovaram que a adsorção de fósforo ocorre principalmente na fração argila do solo, e solos com argila de baixa atividade, como caulinita e gibsitita, exibem maior tendência à adsorção deste nutriente. Os óxidos e hidróxidos de ferro encontrados nos solos são, de maneira geral, minerais secundários, abundantes em solos intemperizados de regiões tropicais e subtropicais úmidas. Nestes solos, a adsorção de fosfato é bastante relacionada com a presença destes óxidos (SAMBATTI et al., 2007). Latossolos são solos muito intemperizados, caracterizados pela presença de Horizonte B latossólico, constituído por minerais secundários como os argilo-minerais do tipo 1:1, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, funcionando como “dreno de P” (RESENDE et al., 2006). Segundo FALCÃO & DA SILVA (2004), na fase inicial de rápida adsorção de P no solo, há uma atração eletrostática, seguida pela adsorção por oxi-hidróxidos, por meio de troca de ligantes. Segundo essa reação, denominada quimissorção, há troca de ligantes da superfície dos óxidos por fosfato da solução. É uma ligação predominantemente covalente (“adsorção específica”), ao contrário do NO_3^- ou do Cl^- , adsorvidos por atração eletrostática (“adsorção não específica”).

Estima-se que o índice de aproveitamento do fósforo dos fertilizantes seja de 5 a 20%, sendo a pronta solubilização dos fertilizantes um dos fatores que contribuem substancialmente para essa perda (LOPES, 2003). Quando uma fonte solúvel de fósforo é adicionada ao solo na forma de solução, particularmente para solos de regiões tropicais, mais de 90 % do P aplicado é adsorvido/precipitado na primeira hora de contato com o solo e, o passar do tempo, a continuidade da reação leva à fixação do fósforo, com sua passagem da forma lábil para não-lábil, ou seja, ocorre a estabilização do composto formado, sendo fósforo fixado considerado “indisponível” para as plantas (GUARÇONI & MENDONÇA, 2003).

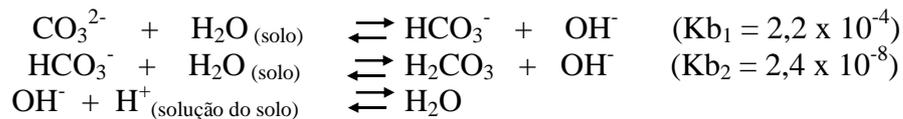
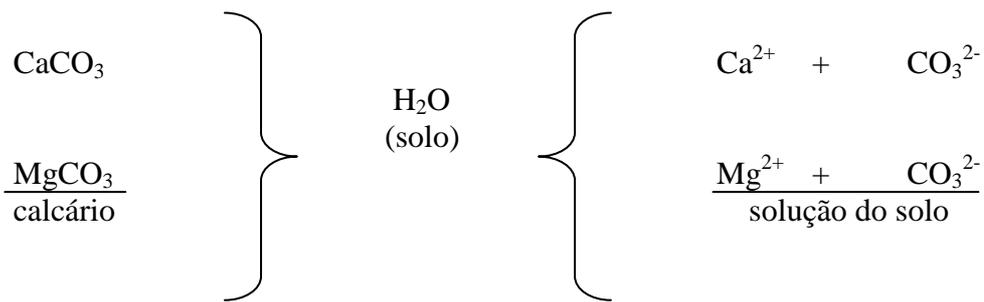
2.4 Correção da Acidez do Solo com Calcário ou Escória de Siderurgia

Segundo ALCARDE (1992), os materiais que podem ser usados na correção da acidez dos solos são aqueles que contêm como constituintes neutralizantes óxidos, hidróxidos, carbonatos e silicatos de cálcio ou de magnésio.

O corretivo da acidez do solo mais utilizado no Brasil é o calcário dolomítico, que é freqüente e abundante e se constitui em fonte de carbonato de cálcio e magnésio. As escórias de siderurgia podem ser utilizadas em solos ácidos de baixa fertilidade e seus componentes neutralizantes são os silicatos de cálcio e magnésio (MELLONI et al., 2001; PRADO et al., 2002) que, segundo estudos (PIAU, 1991; PEREIRA, 1978), comportam-se de modo semelhante ao calcário, sendo que algumas escórias possuem teores relativamente elevados de micronutrientes. O comportamento e a eficiência desses materiais no solo dependem de suas características reativas como natureza química dos neutralizantes, poder de neutralização, solubilidade, granulometria e outros. (VELOSO et al, 1992; PRADO, 2001).

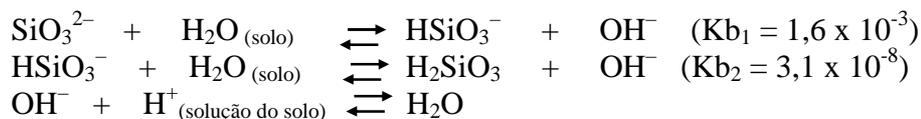
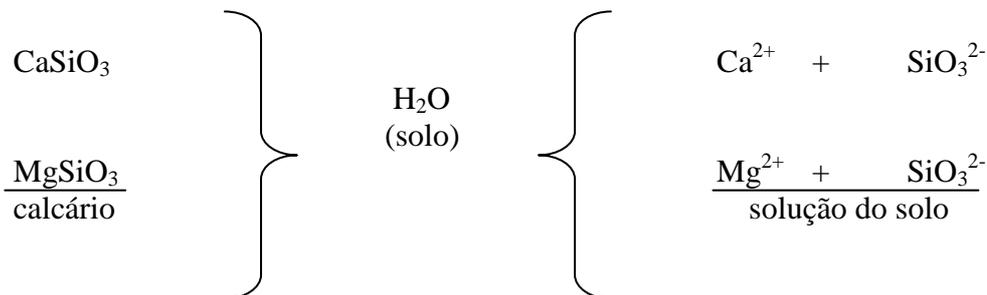
2.5 Ação Neutralizante do Calcário e da Escória

O calcário é obtido através da moagem da rocha calcária, constituída de carbonato de cálcio CaCO_3 e carbonato de magnésio MgCO_3 . Sua reação de neutralização da acidez do solo ocorre da seguinte forma:



Segundo ALCARDE (1992), as reações acima mostram que no solo o calcário libera Ca^{2+} , Mg^{2+} e CO_3^{2-} . Sua reação básica proporciona a formação de OH^- a partir de CO_3^{2-} . O valor da constante de ionização (Kb_1) mostra que o CO_3^{2-} é uma base fraca, indicando reação relativamente lenta de formação de OH^- , que neutralizará o H^+ , responsável pela acidez.

A escória é um subproduto da indústria do ferro e do aço. Constituída de silicatos de cálcio (CaSiO_3) e de magnésio (MgSiO_3). Sua reação de neutralização da acidez do solo ocorre da seguinte forma:



De acordo com ALCARDE (1992), a ação neutralizante da escória é muito semelhante à do calcário, porém neste caso ocorre a formação de SiO_3^{2-} que é base fraca, ($\text{Kb}_1 = 1,6 \times 10^{-3}$), mas é mais forte que a base CO_3^{2-} ($\text{Kb}_1 = 2,2 \times 10^{-4}$).

Com a aplicação de calcário ou escória no solo, o pH aumenta, os teores de Al^{+3} diminuem, a saturação por bases (cátions básicos) aumenta e a saturação por Al diminui. As melhorias nas características químicas do solo decorrem da ação neutralizante do silicato ou carbonato e, conseqüentemente, da elevação do pH e dos teores de Ca e Mg, e da diminuição da concentração de H + Al (PRADO & FERNANDES, 2000; PRADO et al., 2002; FIORI, 2006).

De modo geral, a capacidade corretiva da acidez do solo das escórias é semelhante à do calcário (RAMOS et al., 2006). Apesar desses dois tipos de corretivos diferirem quanto ao poder de neutralização (Tabela 01). O poder corretivo das escórias pode ser superior ao do calcário, se suas partículas forem mais finas. Quando se aplicam calcário e escória com

granulometrias semelhantes, no entanto, as escórias são menos eficientes na elevação do pH do solo (RAMOS et al., 2006). Além da correção do pH do solo, a utilização de escórias eleva os teores de Ca e Mg, CTC e V%, reduzindo ainda a concentração de H+Al (PRADO & FERNANDES, 2000, 2003; PRADO et al., 2002).

Tabela 01. Capacidade de neutralização das diferentes espécies neutralizantes, em relação ao CaCO₃ (ALCARDE, 1992).

Espécies Neutralizantes	Capacidade de neutralização relativa ao CaCO₃
CaCO ₃	1,00
MgCO ₃	1,19
CaSiO ₃	0,86
MgSiO ₃	1,00

Segundo PRADO et al. (2003), a escória de siderurgia apresenta efeito residual prolongado no solo, o que favorece as culturas perenes, que apresentam maior potencial de resposta à sua aplicação. Estes autores em experimento com doses crescentes de escória de siderurgia na produção de mudas de goiabeira, confirmaram suas propriedades corretivas e sua influência sobre alguns atributos do solo, com aumento significativo dos teores de Ca e Mg.

2.6 Ação Fertilizante do Calcário ou Escória de Siderurgia

Para seu cultivo agrícola, os solos ácidos dependem da aplicação de corretivos, os quais, ao elevarem seu pH, neutralizam o efeito dos elementos tóxicos e fornecem cálcio e magnésio como nutrientes. Estes nutrientes, segundo FAQUIN (2001), têm importantes papéis estruturais nas plantas, e por isso são exigidos em grandes quantidades pelas culturas. O cálcio é essencial para o desenvolvimento radicular e absorção dos nutrientes, sendo um constituinte que confere estabilidade à parede celular e membrana plasmática, atuando nos processos de crescimento e divisão celular, polimerização das proteínas e como regulador enzimático (CARVALHO-PUPATTO et al., 2003). O magnésio, além de componente da clorofila, está associado às proteínas vegetais, atuando como ativador das enzimas, sendo necessário também em outros processos fisiológicos, como a produção de açúcares e amido, aumentando a resistência das plantas ao frio e facilitando a absorção e translocação de fósforo (FIORI, 2006).

RAMOS et al. (2006) afirmam que, além de Ca e Mg, a aplicação de escórias de siderurgia ao solo pode liberar silício na solução do solo, que também atualmente é considerado um nutriente essencial para algumas plantas. O Si é o segundo elemento mais abundante na litosfera e está presente em minerais primários e secundários e, com a intemperização (ou adição de materiais ricos no mesmo), torna-se disponível na forma de H₄SiO₄ (ácido monossilícico) na solução do solo (a pH abaixo de 9,0), sendo absorvido pelas plantas num processo ativo e, transportado no xilema, sua distribuição na planta relaciona-se com a taxa respiratória das diferentes partes, dependendo muito da espécie, pois há grande variação na capacidade de acumular Si nos tecidos, existindo plantas denominadas acumuladoras (como o arroz, a cana de açúcar e alguns cereais) e não-acumuladoras (como a maioria das dicotiledôneas, em especial as leguminosas) (FAQUIN, 2001).

A correção do solo com calcário ou escória pode modificar a fertilidade do solo não apenas pela adição de Ca, Mg e Si. A modificação química do solo altera a disponibilidade de outros nutrientes no solo, como os micronutrientes e o fósforo. No caso dos micronutrientes, a aplicação de grandes quantidades de corretivo pode causar um novo equilíbrio dos íons na

solução do solo em detrimento dos micronutrientes e, conseqüentemente, reduzir a absorção destes pelas plantas (MOREIRA et al., 2003). Neste caso é necessário compensar a carência desses nutrientes com uso de fertilizantes que os contenham. Já a disponibilidade de fósforo é aumentada pelo uso de corretivos.

Um dos fatores mais importantes a afetar a disponibilidade de fósforo é a acidez e o fósforo nativo, ou aquele aplicado com fosfatos solúveis, apresenta maior disponibilidade a valores de pH em torno de 6 (RAIJ et al., 1982).

A calagem é, então, uma prática que afeta a eficiência de uso do fósforo, significando que para conseguir determinadas produções, pode-se usar combinações diferentes de fósforo ou calcário. Como o calcário é, normalmente, mais barato que o fósforo, há vantagens em se aplicar o calcário em doses mais elevadas, reduzindo as aplicações de fertilizantes fosfatados (RAIJ et al., 1982).

2.7 Redução da Adsorção de Fósforo pelo solo com o uso de Escória

PRADO & FERNANDES (2001) afirmam que uma das formas para aumentar a eficiência da fertilização fosfatada seria a utilização de ânions (silicatos) competidores com fosfato pelos mesmos sítios de adsorção do solo. Avaliando o efeito da escória de siderurgia como condicionador do solo e isolando seu efeito como corretor de pH, os autores voltaram seu trabalho para o efeito da aplicação de escórias de siderurgia no incremento da eficiência da adubação fosfatada. Seus resultados sugerem que o efeito da escória no fósforo disponível do solo se deve mais ao efeito do silicato em competir com os sítios de adsorção do P do que ao efeito do pH em diminuir o número de sítios de adsorção de P.

Segundo Lima Filho & Silva (2007), silicatos e fosfatos são adsorvidos por mecanismos semelhantes sobre superfícies minerais oxídicas em solos, o que implica que a adubação com silício pode reduzir a adsorção de P e aumentar a disponibilidade e eficácia de adubos fosfatados. Aplicação de silicatos aumenta o fósforo solúvel em água, a despeito do fato de que o pH do solo também aumenta. Os aumentos observados no teor de P pela aplicação da escória, em solo corrigido ou não com calcário, sugere que o efeito do silício não é reduzir a formação de fosfatos de cálcio insolúveis, mas reduzir a adsorção de fósforo por hidróxidos de ferro e alumínio precipitados recentemente. Estes hidróxidos, precipitados de metais polivalentes, tais como alumínio e ferro, são altamente efetivos na adsorção do silício. Então, possivelmente a escória tenha um efeito pronunciado sobre a simbiose micorrízica, que é grandemente influenciada pelo fósforo disponível no solo. Uma pequena parcela das publicações científicas tem atentado para esta particularidade das escórias de siderurgia, o que justifica haver mais estudos neste sentido.

2.8 Fungos Micorrízicos Arbusculares e a Absorção de Fósforo

Fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) são importantes simbioses de raízes que estão presentes em todos os solos (READ et al., 1976; SPARLING & TINKER, 1978; JOHNSON et al., 2002), representando mais de 90% de sua atividade biológica (SIDDIQUI et al., 2008). São considerados os organismos mais importantes do solo (OLSSON et al., 1999), colonizando a maioria das espécies de plantas, em vários ecossistemas (SMITH & READ, 1997). FMAs são de importância particular nos trópicos, onde ocorrem com grande frequência e estão bem distribuídas (SMITH & READ, 1997), sendo importantíssimos para cerca de 90% das espécies de plantas (SIQUEIRA, 1991), colonizando as raízes de quase todos os gêneros das plantas superiores, além de representantes das briófitas e pteridófitas (MOREIRA & SIQUEIRA, 2002), constituindo, desta forma, uma regra, e não exceção, na natureza (SAGGIN JÚNIOR & SIQUEIRA, 1996). É provável que essa associação

simbiótica tenha possibilitado a colonização do ambiente terrestre pelas plantas (PIROZYNSKI & MALLOCH, 1975; REDECKER *et al.*, 2000). Estimativas sugerem que esta simbiose dataria do Devoniano (398 milhões de anos atrás), e provavelmente os FMAs evoluíram associados às plantas (GADKAR *et al.*, 2001).

Simbiontes obrigatórios, os FMAs recebem produtos da fotossíntese na forma de açúcares simples, em quantidade equivalente a aproximadamente cinco bilhões de toneladas de carbono por ano – estimativa do consumo por fungos, para completar o seu ciclo de vida – (BAGO *et al.*, 2000). Em contrapartida, o fungo absorve nutrientes para a planta (SOLAIMAN & SAITO 1997; SMITH & READ, 1997), além de aumentar a tolerância a estresses, através do favorecimento ao acesso à umidade, e da formação e estabilidade dos agregados do solo (SYLVIA & JARSTFER, 1992; AUGÉ *et al.*, 2001) aumentando, ainda, a eficiência fotossintética (BROWN & BETHLENFALVAY, 1987). Muitas vezes controlam patógenos das plantas, melhorando o crescimento do sistema radicular e da planta como um todo (ALLEN, 1991; HWANG *et al.*, 1992; NEWSHAM *et al.*, 1995; BOROWICZ, 2001; PARNISKE, 2008).

É indiscutível a importância da simbiose para fungos micorrízicos, uma vez que os FMAs dependem do hospedeiro para sua própria existência. Para as plantas, existe uma ampla faixa de resposta simbiótica (BERBARA *et al.*, 2006), sendo as espécies vegetais apresentam diferentes graus de dependência micorrízica (SIQUEIRA & SAGGIN JÚNIOR, 2001). Nas associações micorrízicas ocorre perfeita integração morfológica e fisiológica entre os parceiros, resultando em uma alta compatibilidade funcional (CARNEIRO *et al.*, 1998).

As associações micorrízicas atuam como mecanismo biológico benéfico para as plantas, principalmente em situações de estresse edafoclimático, apresentando potencial para serem utilizadas no aumento de produção agrícola e nas atividades silviculturais nos trópicos (SMITH & SMITH, 1990). No Brasil, devido às grandes áreas de solos pobres ou degradados pela ação antrópica e ao grande número de espécies vegetais economicamente importantes que apresentam dependência micorrízica, as micorrizas assumem papel extremamente importante (MENDONÇA & OLIVEIRA, 1996).

A colonização micorrízica tem início com a chegada da hifa fúngica na superfície da raiz, geralmente com a formação de um apressório em sua epiderme. A hifa resultante do apressório cresce entre as células e então se ramifica entre e dentro das células do córtex, formando arbúsculos e vesículas, que permanecem sempre envolvidos pelo plasmalema da célula vegetal. Também há formação de um micélio extra-radicular, que dá origem a novos pontos de penetração nas raízes (AZCÓN-AGUILLAR & BAREA, 1997). A planta se beneficia pelo aumento na absorção de água e nutrientes (principalmente de fósforo) proporcionada pelas hifas fúngicas, que funcionam como extensões do sistema radicular (SIQUEIRA & FRANCO, 1988).

Devido à crescente preocupação mundial pela preservação de ecossistemas nativos e da crise energética, que implica no aumento do custo ou falta de fertilizantes, tem se intensificado o interesse pelas micorrizas (MENDONÇA & OLIVEIRA, 1996).

A grande rede de hifas lançadas ao solo pelas micorrizas aumenta o volume de solo explorado pelo sistema radicular, incrementando extraordinariamente a superfície de contato com o solo, o que melhora a absorção de nutrientes, particularmente daqueles pouco móveis como o fósforo. Plantas não micorrizadas crescendo em condições de baixa disponibilidade de fósforo, em geral necessitam de mais fertilizantes fosfatados do que plantas eficientemente micorrizadas (WINCKLER CALDEIRA *et al.*, 1997). Em geral, nos solos com baixa disponibilidade de fósforo, as plantas colonizadas com fungos micorrízicos têm crescimento maior que as não colonizadas, pois os fungos micorrízicos, além de captar P além da região de depleção próxima às raízes, são mais eficientes do que as raízes na

absorção desse elemento, absorvendo-o mesmo quando ele se encontra em concentrações muito baixas na solução do solo (PAUL & CLARK, 1989).

Como o P é um dos elementos mais limitantes ao crescimento vegetal, o benefício obtido com a associação micorrízica é variável e dependente do suprimento desse elemento. Quando o P é extremamente limitante, o crescimento dos dois simbiontes é inibido (DIGTHON, POSKITT & BROWN, 1993). Quando a disponibilidade de P é baixa, ocorre o aumento do crescimento da planta hospedeira graças à ação benéfica do fungo (SMITH & READ, 1997); em doses maiores de P, a proliferação do fungo pode ocorrer às expensas do hospedeiro, não havendo benefícios nutricionais para este último (BOUGHER, GROVE & MALAJCZUK, 1990).

Os efeitos benéficos desta simbiose no aumento do crescimento e na melhoria do estado nutricional de plantas de milho já foram demonstrados (SIQUEIRA et al., 1989; MIRANDA & MIRANDA, 1997), além de melhorias no sistema radicular, com aumento do número de raízes laterais primárias e secundárias e do teor de P na planta (BRESSAM & VASCONCELOS, 2002).

Pesquisas realizadas testando a eficiência dos FMAs em solos com altos níveis de fósforo mostraram haver menor colonização de raízes e pouco ou nenhum benefício à planta hospedeira (MENGE et al., 1978; MOSSE, 1973), havendo casos com depressão do crescimento das plantas micorrizadas (BUWALDA & GOH, 1982; SIQUEIRA & COLLOZI-FILHO, 1986; COOPER, 1975). Entretanto, níveis muito baixos de P podem dificultar o estabelecimento da associação (RHEINHEIMER, 1991; SIQUEIRA & COLLOZZI-FILHO, 1986). Desta forma, o caráter da associação mutualística, neutralística ou parasítica depende, basicamente, da disponibilidade de fósforo no solo, embora características genéticas da planta e do FMA possam interferir (SANTOS et al., 1996).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material de Solo

O material de solo utilizado foi coletado de Latossolo Vermelho Distrófico proveniente de Lavras, MG, selecionado por suas características químicas de alta capacidade de adsorção de fosfatos e baixo nível de fósforo disponível. Foi coletado no Campus da Universidade Federal de Lavras a 21°13'40,1'' de Latitude Sul e a 44°58'46,4'' de Longitude Oeste, numa área originalmente sob vegetação de Cerrado e há pelo menos 50 anos reflorestada com eucalipto.

O material foi analisado quanto à fertilidade no Laboratório de Solos da Embrapa Agrobiologia e quanto a textura no laboratório de Física do Solo da UFRRJ. Os resultados destas análises são apresentados na Tabela 02. O material de solo teve sua capacidade de campo estimada em 49,6%.

Tabela 02. Características químicas e textural do material de Latossolo Vermelho Distrófico coletado em Lavras, MG.

pH	MO	P (Mehlich I)	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	Areia	Silte	Argila
(água) 2:1	g kg ⁻¹	-----mg dm ⁻³ -----		----- cmol _c dm ⁻³ -----			----- g kg ⁻¹ -----		
5,3	1,575	**	20	0,9	0,83	0,1	130,8	23,6	842,5

** Abaixo do limite de detecção do método.

3.2 Caracterização dos materiais corretivos

3.2.1 Calcário

Foi utilizado um calcário dolomítico, cujas características químicas e granulométricas constam na Tabela 03. Teores de óxidos informados pelo fabricante e análise granulométrica realizada no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) do Ministério da Ciência e Tecnologia.

Tabela 03. Caracterização do calcário.

CaO	MgO	Peneira	Material Retido	Material Retido	Limite de retenção*
----- % -----	----- % -----	ABNT	----- g -----	----- g -----	----- % -----
		10		0,000	0-5
		20		0,050	30
25	17	50		3,899	50
		Amostra total		96,337	

*de acordo com BRASIL, Instrução Normativa n° 35, de 04 de julho de 2006.

3.2.2 Escória

A escória de siderurgia utilizada foi doada pela empresa Acelor-Mittal, sediada no município de Serra – ES. O material é proveniente da fabricação de aço e foi escolhido por sua natureza silicatada e por possuir óxidos de cálcio e magnésio em sua composição. Os resultados que se seguem foram cedidos pela empresa doadora do material, com exceção do ensaio granulométrico, que foi realizado no CETEM.

Tabela 04. Caracterização da escória quanto aos seus componentes relativos à neutralização da acidez.

CaO	MgO	SiO	Peneira	Material Retido	Material Retido	Limite de retenção *
----- % -----	----- % -----		ABNT	----- g -----	----- % -----	-----
			10	0,574	0,00	0-5
40	9	11	20	21,668	0,05	30
			50	29,472	3,89	50
			Amostra total	100,309		

* de acordo com BRASIL, Instrução Normativa nº 35, de 04 de julho de 2006.

Apesar da detecção de metais na massa bruta (Tabela 5), foram realizados testes toxicológicos que, de acordo com a ABNT NBR 10007:2004, classificaram o material como não perigoso, o que corrobora com os ensaios com extratos lixiviados e solubilizados, que indicaram um baixo potencial de migração dos componentes do resíduo ao ambiente, sendo o mesmo classificado como Resíduo Classe II B – Não perigoso – inerte.

Tabela 05. Caracterização da escória de siderurgia, de acordo com a ABNT NBR 10004:2004.

Matriz	Metais	Concentração	Limite permitido*
		----- mg/kg -----	-----
Massa bruta	Arsênio	3,15	Presença
	Chumbo	4,53	Presença
	Cromo total	446,65	Presença
	Selênio	6,70	Presença
	Cromo hexavalente	0,73	Presença
		----- mg/L -----	-----
Extrato lixiviado	Bário	0,84	70,00
	Chumbo	0,02	1,00
	Cromo	0,07	5,00
	Fluoreto	0,84	150,00
		----- mg/L -----	-----
Extrato solubilizado	Alumínio	0,11	0,20
	Bário	0,40	0,70
	Sódio	1,64	200,00
	Cloreto	226,00	250,00
	Fluoreto	1,22	1,50
	Sulfato	5,02	250,00

* de acordo com ABNT, NBR 10004:2004.

3.3 Pré-Ensaio para Estabelecimento de Dosagens de Corretivos de Acidez

As curvas de neutralização foram obtidas através da incubação do material de solo com as dosagens de 0; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0; 8,0 e 16,0 Mg.ha⁻¹ de escória e calcário. A umidade foi elevada a 75-80% da capacidade de campo e o pH foi acompanhado diariamente por uma semana e depois com intervalos de tempo crescentes, até os 59 dias.

Na Figura 01 são apresentadas as curvas de neutralização com a variabilidade do pH durante o período de incubação. Verifica-se que a partir de 20 dias de incubação houve tendência de estabilização do pH no material de solo. Foi considerado como ponto final de

equilíbrio do pH no solo o tempo de incubação de 59 dias, conforme metodologia utilizada na rotina do Laboratório de Fertilidade da UFRRJ. Com os valores de pH neste tempo de incubação foram ajustadas as curvas em função das dosagens de corretivos, utilizando o programa Table Curve 3.0 (Figura 02). Como segundo Raij et al. (1982) a faixa de pH do solo que mantém maior quantidade de P disponível às plantas é em torno de 6, procurou-se a menor dose de calcário e escória que mantivesse o pH dentro desta faixa, optando-se (Figura 2), pela dose de 4.0 Mg.ha⁻¹ de escória ou calcário.

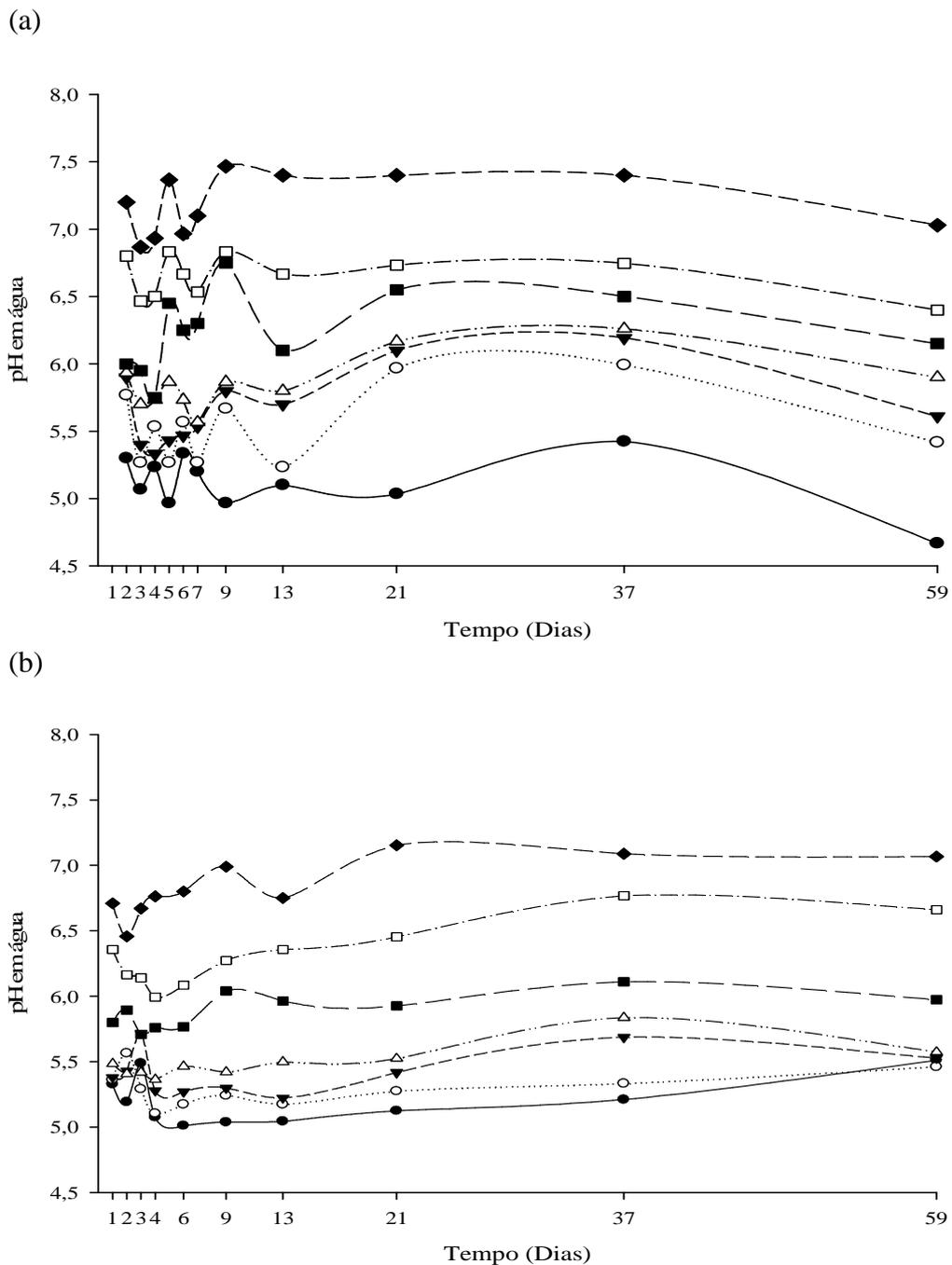
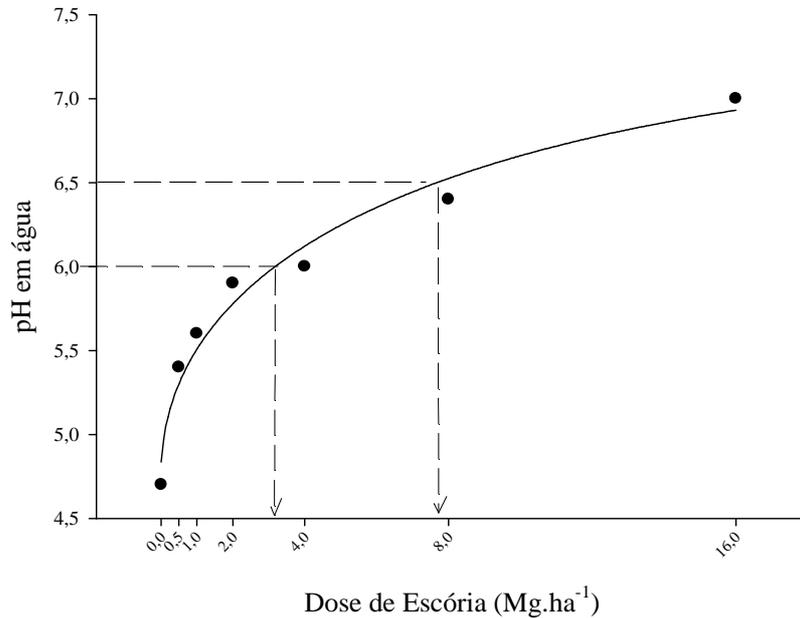


Figura 01. Curva de Neutralização de dosagens de Escória de Aciaria (a) e Calcário (b) ao longo do tempo de incubação. ●: sem corretivo; ○: 0,5 Mg.ha⁻¹; ▼: 1,0 Mg.ha⁻¹; △: 2,0 Mg.ha⁻¹; ■: 4,0 Mg.ha⁻¹; □: 8,0 Mg.ha⁻¹; ◆: 16,0 Mg.ha⁻¹.

(a)



(b)

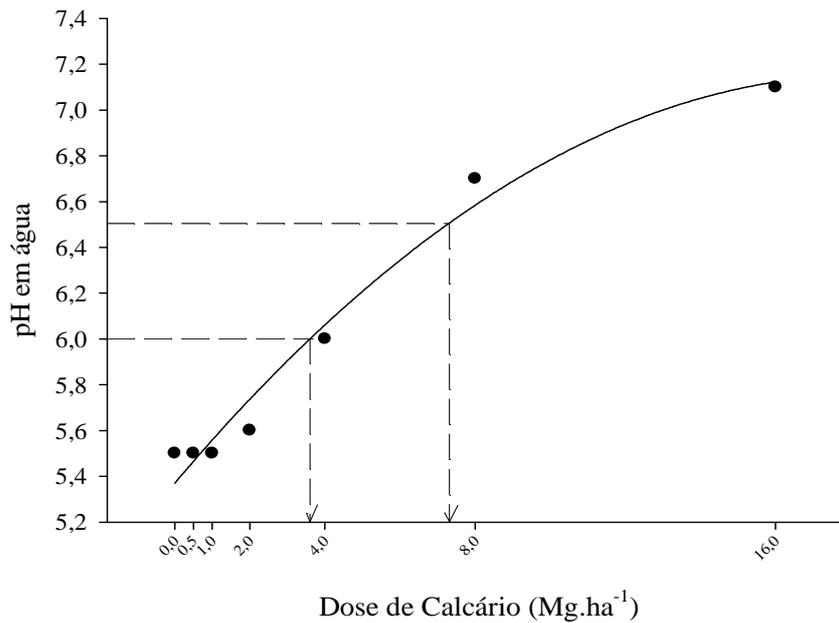


Figura 02. Curva ajustada do pH em função da dose de escória (a) e calcário (b) após 59 dias de incubação com material de Latossolo Vermelho Distrófico. (a): $y = 5,2169 + 0,4451x^{-0,5} + 0,0564x^{-0,5}$, $R^2 = 0,99$; (b): $y = 5,37 + 0,194x - 0,0053x^2$, $R^2 = 0,98$.

3.4 Pré-Ensaio para Estabelecimento de Dosagens de Fósforo

As doses de fósforo a serem aplicadas no experimento em casa de vegetação foram definidas com base no fósforo remanescente, conforme Alvarez V. *et al.* (2000). Para isso, o material do solo Latossolo Vermelho Distrófico que recebeu os diferentes tratamentos corretivos foi colocado em contato em uma mesa agitadora por uma hora com uma solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$, contendo 60 mg.L^{-1} de P. Após agitação, foram separadas as fases sólida

e líquida, e na solução de equilíbrio foi determinada a concentração de P remanescente. O resultado deste pré-ensaio pode ser visualizado na Tabela 06. Para definir a dose de fósforo a ser utilizada no experimento, optou-se pelo resultado do P remanescente da testemunha sem corretivos, o qual foi $19,84 \text{ mg.L}^{-1}$, permanecendo no limite da faixa de $10\text{-}19 \text{ mg.L}^{-1}$ o que, segundo Alvarez V. et al. (2000), as doses de P a serem usadas em experimentos em casa de vegetação devem estar compreendidas entre 0 e 480 mg dm^{-3} de P.

Tabela 06. Fósforo remanescente (P-rem) em amostras de solo submetidas aos tratamentos de corretivos da acidez antes da condução do experimento

Tratamento	Repetições	P-rem ----- mg.L ⁻¹ -----	média±DP*
Testemunha	1	20,75	19,84±0,93
	2	19,87	
	3	18,89	
Escória	1	20,75	25,29±4,03
	2	28,45	
	3	26,68	
Calcário	1	23,67	22,08±1,80
	2	22,43	
	3	20,13	
Calcário+Escória	1	20,31	23,79±8,02
	2	18,10	
	3	32,96	

*DP = desvio padrão

3.5 Tratamentos e Delineamento Experimental

Foram estabelecidos no solo 4 tratamentos de corretivos, sendo:

C1 – Correção tradicional com calcário dolomítico na dosagem 4 Mg ha^{-1} ;

C2 – Correção alternativa com escória de siderurgia na dosagem 4 Mg ha^{-1} ;

C3 – Correção combinada, com metade da dose de calcário dolomítico e a outra metade de escória de siderurgia ($2 \text{ Mg ha}^{-1} + 2 \text{ Mg ha}^{-1}$);

C4 – Testemunha sem correção de pH.

Para cada tratamento de aplicação de corretivo foram estabelecidos cinco tratamentos de doses de fósforo, aplicadas ao solo após o período de incubação dos corretivos. Foram elas:

P1 – Testemunha, sem aplicação de P;

P2 – Aplicação de 42 mg dm^{-3} de P (0,22g de Superfosfato Triplo por kg de solo);

P3 – Aplicação de 95 mg dm^{-3} de P (0,49g de Superfosfato Triplo por kg de solo);

P4 – Aplicação de 213 mg dm^{-3} de P (1,11g de Superfosfato Triplo por kg de solo);

P5 – Aplicação de 480 mg dm^{-3} de P (2,50g de Superfosfato Triplo por kg de solo).

As combinações de corretivo agrícola e dose de P foram ainda combinadas com a presença ou ausência de fungos micorrízicos arbusculares, num esquema fatorial $4 \times 5 \times 2$ (4 corretivos x 5 doses de fósforo x 2 tratamentos de inoculação com FMAs) com cinco repetições dispostas num delineamento em blocos casualizados, com 5 repetições.

3.6 Experimento em Casa de Vegetação

Foi disposto em casa de vegetação um experimento com milho (*Zea mays*), variedade Eldorado, utilizando os tratamentos de solo descritos, em vasos de 2,6L com 3kg de solo. O material de solo foi autoclavado por uma hora a 120°C por duas vezes consecutivas, com um

intervalo de 48 horas, para eliminação da comunidade de fungos micorrízicos presentes. Em seguida, o solo foi mantido seco e aerado por uma semana para a oxidação do manganês que possivelmente foi reduzido no processo.

Após este período, o pH do solo foi corrigido de acordo com os tratamentos já descritos. O solo foi umedecido e incubado por um período de 40 dias, mantendo-se a umidade do solo a 75-80% da capacidade de campo, aplicando-se água deionizada. Em seguida, foram aplicados os tratamentos de fertilizante fosfatado (superfosfato triplo) e seguiu-se mais 15 dias de incubação úmida antes do plantio do experimento. A análise química do solo resultante da combinação dos tratamentos de corretivos e fósforo, por ocasião do plantio e na colheita das plantas, é apresentada na Tabela 07.

Tabela 07. Características químicas do solo submetido a diferentes combinações de tratamentos de corretivos de acidez e de doses de fósforo (P) por ocasião do plantio (início) e na colheita (fim) do experimento.

Corretivo	P	pH		P		K		Al		Ca		Mg		Ca:Mg	
		(água) 2:1		-----mg dm ⁻³ -----		-----		----- cmol _c dm ⁻³ -----		-----		-----		-----	
		Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim	Início	Fim
C1	0	6,4	6,2	0,0	0,3	30,0	29,5	0,0	0,0	2,6	2,6	0,7	1,4	3,7	1,8
C2	0	6,2	6,2	2,3	1,3	33,0	26,5	0,0	0,0	2,9	2,4	0,2	1,1	14,5	2,3
C3	0	6,3	6,4	1,6	1,6	33,0	22,0	0,0	0,0	3,1	2,5	0,5	1,1	6,2	2,2
C4	0	5,3	5,7	0,9	0,8	26,0	23,5	0,1	0,1	1,2	0,9	0,1	0,6	12,0	1,6
C1	42	6,7	6,5	1,3	0,8	27,0	19,7	0,0	0,0	2,9	2,8	0,7	1,7	4,1	1,7
C2	42	6,2	5,9	4,2	2,9	27,0	22,0	0,0	0,0	3,0	2,6	0,2	1,0	15,0	3,5
C3	42	6,4	6,3	2,2	1,7	26,0	22,0	0,0	0,0	2,9	2,6	0,5	0,8	5,8	3,4
C4	42	5,3	5,4	1,9	0,8	25,0	12,5	0,1	0,1	1,1	0,8	0,1	0,3	11,0	1,1
C1	95	6,8	6,4	6,2	2,0	27,0	19,0	0,0	0,0	3,2	3,2	0,7	1,3	4,6	2,4
C2	95	6,0	5,9	7,3	3,2	19,0	21,0	0,0	0,0	3,0	2,8	0,2	0,7	15,0	3,4
C3	95	6,3	6,3	7,0	3,0	26,0	20,5	0,0	0,0	3,3	2,9	0,5	1,1	6,6	4,0
C4	95	5,3	5,3	6,6	1,2	24,0	10,5	0,1	0,1	1,3	1,0	0,1	0,4	13,0	1,4
C1	213	6,5	6,5	18,4	5,9	32,0	19,5	0,0	0,0	3,7	3,5	0,8	1,2	4,6	2,8
C2	213	6,0	5,9	12,9	13,1	25,0	16,5	0,1	0,0	3,3	3,1	0,2	1,4	16,5	4,5
C3	213	6,2	6,1	30,5	6,8	30,0	15,0	0,0	0,0	4,1	3,3	0,5	1,0	8,2	4,3
C4	213	5,2	5,3	26,1	4,8	33,0	8,5	0,1	0,1	2,2	1,6	0,1	0,4	22,0	2,0
C1	480	6,3	6,2	36,4	20,3	27,0	11,5	0,0	0,0	4,9	4,2	0,7	1,1	7,0	3,8
C2	480	5,8	5,7	63,7	22,2	40,0	19,0	0,0	0,0	4,4	2,1	0,3	0,5	14,7	2,5
C3	480	6,2	6,0	45,8	16,5	27,0	11,5	0,0	0,0	4,4	4,2	0,5	0,9	8,8	5,1
C4	480	5,1	5,1	60,9	14,5	31,0	8,5	0,1	0,1	3,1	2,7	0,1	0,6	31,0	3,3
χ ₁	0	6,1	6,1	1,2	1,0	30,5	25,4	0,0	0,0	2,5	2,1	0,4	1,0	6,5	2,0
χ ₁	42	6,2	6,0	2,4	1,6	26,3	19,0	0,0	0,0	2,5	2,2	0,4	1,0	6,6	2,3
χ ₁	95	6,1	6,0	6,8	2,4	24,0	17,8	0,0	0,0	2,7	2,5	0,4	0,9	7,2	2,8
χ ₁	213	6,0	5,9	22,0	7,7	30,0	14,9	0,1	0,0	3,3	2,9	0,4	1,0	8,3	2,9
χ ₁	480	5,9	5,7	51,7	18,4	31,3	12,6	0,0	0,0	4,2	3,3	0,4	0,8	10,5	4,2
C1	χ ₂	6,5	6,4	12,5	6,4	28,6	19,8	0,0	0,0	3,5	3,3	0,7	1,4	4,8	2,4
C2	χ ₂	6,0	5,9	18,1	8,6	28,8	21,0	0,0	0,0	3,3	2,6	0,2	0,9	15,1	2,8
C3	χ ₂	6,3	6,2	17,4	5,9	28,4	18,2	0,0	0,0	3,6	3,1	0,5	1,0	7,1	3,1
C4	χ ₂	5,2	5,4	19,3	4,4	27,8	12,7	0,0	0,0	1,8	1,4	0,1	0,5	17,8	3,1

C1: Calcário; C2: Escória; C3: Calcário + Escória 1:1; C4: testemunha sem corretivo de acidez; Doses de P: 0, 42, 95, 213 e 480 mg dm⁻³ de P aplicado no solo; χ₁: média dos quatro tratamentos de corretivos; χ₂: média das cinco doses de fósforo.

Para aplicação dos tratamentos de inoculação micorrízica foi utilizado um inóculo misto de FMAs, contendo uma mistura de esporos de *Glomus clarum* e *Gigaspora margarita* já testada para milho e que demonstraram boa taxa de colonização e eficiência da simbiose (RAMOS, 2001). Os inóculos utilizados foram multiplicados individualmente por espécie em vasos de cultura cultivados com *Brachiaria decumbens*. De acordo com a densidade de esporos de cada espécie, foi feita a mistura para que no inóculo estivesse presente proporção igual de cada espécie. Assim, em cada vaso foi aplicado 10 mL de inóculo que continha aproximadamente 80 esporos de *Glomus clarum* e 80 esporos de *Gigaspora margarita*. Nos tratamentos sem inoculação foi aplicado um filtrado do inóculo de FMAs com função de equilibrar a biota entre os tratamentos.

As plantas permaneceram em casa de vegetação por 77 dias, de 10 de julho a 18 de setembro de 2008. Os vasos foram irrigados diariamente com água deionizada com o auxílio de um regador. Uma vez por semana foi aplicado aos vasos solução nutritiva sem fontes de Ca, Mg e P, contendo os seguintes reagentes em mg.L⁻¹: K₂SO₄ - 104,559; KCl - 22,367; (NH₄)₂SO₄ - 99,104; NH₄NO₃ - 120,065; C₁₀H₁₂FeN₂NaO₈ - 11,012; H₃BO₃ - 0,927; MnCl₂.4H₂O - 0,495; ZnSO₄.7H₂O - 0,072; CuSO₄.5H₂O - 0,250; Na₂MoO₄.2H₂O - 0,005. Nas primeiras três semanas foram aplicados 10 mL de solução nutritiva por vaso, da 4^a a 6^a semana aplicaram-se 20 mL e da 7^a a 10^a semana foram aplicados 40 mL.

3.7 Avaliações Microbiológicas

3.7.1 Determinação da densidade de esporos de fungos micorrízicos

Os esporos de FMAs foram extraídos do solo seguindo a metodologia de peneiramento úmido (GERDEMANN & NICOLSON, 1963) seguido de centrifugação em água e sacarose 45% (JENKINS, 1964). Em seguida a densidade de esporos no solo foi quantificada por contagem em placas caneladas sob microscópio estereoscópico com aumento de 30x.

3.7.2 Avaliação da colonização micorrízica das raízes

Em torno de 0,5 g de raízes finas e frescas de cada planta foram clarificadas e coradas de acordo com as metodologias de Grace & Stribley (1991) e Koske & Gemma (1989). A colonização micorrízica nas raízes foi avaliada dispondo as raízes coradas sobre lâmina para microscopia e estas foram observadas em um aumento de 200x, conforme McGonigle et al. (1990). Realizou-se a contagem de 100 segmentos de raízes observados quanto a presença de colonização para a estimativa da percentagem de colonização radicular.

3.8 Avaliações Químicas

3.8.1 Análise de fósforo no disco de folha

Seguindo metodologia proposta por Aziz & Habte (1987) foi determinado o conteúdo de fósforo no disco de folha de 8 mm, aos 15, 30, 45, 60 e 75 dias após o plantio, queimando-o em mufla a 500°C por 3 horas, seguindo de determinação por colorimetria em espectrofotômetro.

3.8.2 Análise do teor de silício na parte aérea

O Silício na parte aérea das plantas foi analisado pelo método descrito por Korndörfer et al. (1999), que consiste na extração do Si do material vegetal por digestão com água oxigenada e hidróxido de sódio em autoclave. A determinação foi feita pela formação do complexo BETA-molibdosilicato amarelo e leitura em espectrofotômetro.

3.8.3 Análise de fósforo na parte aérea

O teor de P na parte aérea das plantas foi analisado por espectrofotometria com azul-de-molibdênio, em extrato nitroperclórico, segundo EMBRAPA, 1999.

3.8.4 Análise de cálcio, magnésio, alumínio, cobre, ferro, manganês, zinco, cromo, cobalto, níquel, cádmio e chumbo na parte aérea

Os teores de Ca, Mg, Al, Cu, Fe, Mn, Zn, Cr, Co, Ni, Cd e Pb presente na parte aérea das plantas foi determinado no extrato da digestão nitroperclórica em blocos digestores (MALAVOLTA et al., 1989) com determinação analítica realizada em espectrômetro óptico de emissão por plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

3.9 Avaliações Biométricas

Foi acompanhado o crescimento das plantas através da medida da altura (com régua milimetrada) e do diâmetro do caule das plantas na altura do colo (com paquímetro digital) ao longo da condução do experimento. Por ocasião do final do experimento, foram mensurados a área foliar, através de um Integrador de Área Foliar.

O peso seco da parte aérea e raízes foram mensurados após a secagem do material em estufa com ventilação forçada a 65°C, até peso constante.

3.10 Análises Estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância com aplicação do teste F e as médias foram comparadas pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade ou por análise de regressão para as doses de fósforo. Utilizou-se para estas análises, o programa SISVAR (Sistema de Análise de Variância, versão 5.0 – Universidade Federal de Lavras).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um resumo das análises de variâncias de todas as variáveis analisadas é apresentado na Tabela 08. Verifica-se que houve poucas interações triplas significativas, ou seja, houve pouca interação de efeitos entre os tratamentos de inoculação micorrízica, corretivos de solo e níveis de fósforo (MxCxF). Esta interação foi observada apenas em uma variável isolada de avaliação da altura das plantas aos 56 dias após o plantio (DAP), uma variável isolada de avaliação de fósforo no disco de folha (aos 60 DAP), no Teor de Zn da parte aérea e na quantidade total de Al e Fe na parte aérea.

As interações duplas significativas foram abundantes entre os tratamentos de inoculação micorrízica (M) e de doses de fósforo aplicadas ao solo (F), principalmente nas variáveis analisadas após os 70 DAP. As interações entre inoculação micorrízica (M) e corretivos do solo (C) foram menos comuns, sendo verificadas em variáveis de crescimento, como diâmetro do caule aos 63 e 70 DAP, área foliar e massa de raízes secas, além das variáveis teor de Zn e Al, quantidade de Fe e Al e colonização radicular. Já a interação entre os corretivos do solo (C) e os níveis de fósforo (F) praticamente não foi verificada nas variáveis de crescimento, exceto na massa das raízes secas, mas afetando a quantidade de fósforo analisada em disco de folha aos 30 e 60 DAP, o teor de Mg, a quantidade de Ca e Mn na parte aérea, e a densidade de esporos e a colonização micorrízica.

Os efeitos principais dos tratamentos foram significativos na maioria das variáveis, mostrando grande efeito dos tratamentos sobre o crescimento e nutrição da planta e sobre a micorrização de suas raízes. Os tratamentos de inoculação micorrízica apresentaram efeitos no crescimento desde as primeiras avaliações, enquanto que os tratamentos de corretivos do solo e níveis de fósforo apresentaram efeitos a partir das avaliações de 42 DAP para altura e 35 DAP para o diâmetro do caule. Os tratamentos de corretivos tenderam a não apresentar efeitos nas quantidades de fósforo medida nos discos de folha e na parte aérea, e uma tendência de não apresentar redução de efeito nas últimas avaliações de crescimento.

4.1 Altura das Plantas

Para o crescimento em altura, avaliado semanalmente após a terceira semana do plantio, houve poucas interações significativas entre os fatores estudados (Tabela 08). Além da interação tripla significativa aos 56 DAP, houve apenas a interação significativa entre a inoculação micorrízica (M) e as doses de fósforo (F) aos 70 e 77 DAP. Entretanto, os efeitos isolados dos tratamentos (efeitos principais) foram bastante significativos, particularmente para o efeito dos tratamentos de inoculação micorrízica (M) e níveis de fósforo (P) que apresentaram níveis de significância do teste de F inferiores a 0,01 (1%). Desta forma optou-se por apresentar apenas os resultados dos efeitos principais em todas as avaliações de altura de plantas, exceto o desdobramento da interação M x F aos 77 DAP.

O efeito principal da inoculação de FMAs sobre a altura das plantas nas diversas épocas de avaliação é apresentado na Tabela 09. Observa-se que a partir dos 28 DAP as plantas inoculadas cresceram mais em altura que as plantas não inoculadas. Ao final da condução do experimento as plantas inoculadas apresentavam, em média, uma altura aproximadamente 67% maior que as não inoculadas. RAMOS (2001), em ensaio com plantas de milho inoculadas com *Glomus clarum* e *Gigaspora margarita* separadamente, também registrou maior altura das plantas inoculadas quando comparadas com o tratamento sem inoculação, corroborando o presente resultado positivo da inoculação de plantas de milho com a mistura de *G. margarita* e *G. clarum*.

Tabela 08. Resumo das análises de variância apresentando o nível de significância pelo teste F das variáveis analisadas em milho cultivado com ou sem inoculação de fungos micorrízicos arbusculares sob diferentes tratamentos de corretivos de acidez do solo e de doses de fertilizante fosfatado.

Variável	Fontes de variação								CV (%)
	M	C	F	BL	MxC	MxF	CxF	MxCxF	
Altura aos 21 DAP	0,13	0,78	0,00*	0,00*	0,77	0,10	0,35	0,63	38,11
Altura aos 28 DAP	0,02*	0,29	0,11	0,00*	0,87	0,13	0,11	0,37	35,41
Altura aos 35 DAP	0,00*	0,11	0,88	0,00*	0,80	0,18	0,44	0,19	31,21
Altura aos 42 DAP	0,00*	0,15	0,09	0,00*	0,68	0,21	0,36	0,14	30,89
Altura aos 49 DAP	0,00*	0,01*	0,00*	0,00*	0,93	0,59	0,17	0,08	31,22
Altura aos 56 DAP	0,00*	0,09	0,00*	0,00*	0,57	0,51	0,31	0,03*	34,45
Altura aos 63 DAP	0,00*	0,01*	0,00*	0,00*	0,77	0,07	0,17	0,09	31,85
Altura aos 70 DAP	0,00*	0,08	0,00*	0,00*	0,61	0,02*	0,30	0,16	33,46
Altura aos 77 DAP	0,00*	0,10	0,00*	0,00*	0,37	0,02*	0,26	0,24	38,68
Diâmetro aos 21 DAP	0,00*	0,24	0,00*	0,07	0,19	0,00*	0,25	0,20	49,89
Diâmetro aos 28 DAP	0,03*	0,17	0,00*	0,04*	0,36	0,10	0,66	0,95	24,55
Diâmetro aos 35 DAP	0,01*	0,05*	0,00*	0,00*	0,50	0,37	0,72	0,98	29,87
Diâmetro aos 42 DAP	0,00*	0,02*	0,30	0,00*	0,17	0,30	0,40	0,86	36,82
Diâmetro aos 49 DAP	0,00*	0,01*	0,00*	0,00*	0,48	0,17	0,50	0,97	31,51
Diâmetro aos 56 DAP	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,36	0,44	0,86	0,79	26,15
Diâmetro aos 63 DAP	0,00*	0,04*	0,00*	0,00*	0,04*	0,31	0,95	0,91	25,44
Diâmetro aos 70 DAP	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,03*	0,00*	0,85	0,65	25,79
Diâmetro aos 77 DAP	0,00*	0,06	0,00*	0,18	0,13	0,01*	0,33	0,43	23,30
Área Foliar	0,00*	0,16	0,00*	0,04*	0,01*	0,00*	0,58	0,93	24,73
Massa da PA Seca	0,00*	0,01*	0,00*	0,00*	0,19	0,01*	0,49	0,61	60,19
Massa das Raízes Secas	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,02*	0,00*	0,01*	0,18	58,34
PDF aos 15 DAP	0,04*	0,33	0,00*	0,43	0,45	0,17	0,72	0,11	34,36
PDF aos 30 DAP	0,90	0,71	0,00*	0,06	0,75	0,58	0,00*	0,93	24,44
PDF aos 45 DAP	0,23	0,57	0,00*	0,13	0,52	0,02*	0,73	0,19	34,69
PDF aos 60 DAP	0,00*	0,10	0,00*	0,51	0,98	0,16	0,02*	0,04*	21,93
PDF aos 75 DAP	0,00*	0,27	0,00*	0,07	1,00	0,00*	0,62	0,08	30,62
Teor de P na PA	0,00*	0,02*	0,00*	0,00*	0,17	0,00*	0,24	0,07	50,75
Teor de Ca na PA	0,00*	0,01*	0,00*	0,01*	0,24	0,00*	0,52	0,70	54,57
Teor de Mg na PA	0,00*	0,00*	0,00*	0,02*	0,10	0,00*	0,01*	0,51	68,63
Teor de Cu na PA	0,00*	0,02*	0,05*	0,20	0,16	0,02*	0,37	0,47	63,89
Teor de Zn na PA	0,00*	0,00*	0,00*	0,00*	0,04*	0,00*	0,35	0,02*	62,77
Teor de Fe na PA	0,00*	0,00*	0,00*	0,33	0,10	0,23	0,10	0,64	100,30
Teor de Mn na PA	0,01*	0,00*	0,00*	0,08	0,71	0,03*	0,59	0,90	67,52
Teor de Al na PA	0,01*	0,01*	0,00*	0,39	0,04*	0,08	0,19	0,15	103,85
Teor de Si na PA	0,03*	0,00*	0,00*	0,51	0,45	0,03*	0,16	0,45	100,91
Qdd. de P na PA	0,00*	0,27	0,00*	0,07	0,24	0,00*	0,49	0,13	26,24
Qdd. de Ca na PA	0,00*	0,63	0,64	0,02*	0,73	0,12	0,04*	0,25	25,02
Qdd. de Mg na PA	0,69	0,00*	0,01*	0,37	0,40	0,01*	0,09	0,09	21,57
Qdd. de Cu na PA	0,74	0,01*	0,15	0,38	0,09	0,06	0,53	0,71	46,16
Qdd. de Zn na PA	0,94	0,00*	0,00*	0,01*	0,89	0,01*	0,14	0,08	31,07
Qdd. de Fe na PA	0,02*	0,00*	0,38	0,53	0,00*	0,07	0,40	0,04*	82,51
Qdd. de Mn na PA	0,00*	0,00*	0,01*	0,25	0,96	0,00*	0,02*	0,30	34,78
Qdd. de Al na PA	0,00*	0,06	0,00*	0,18	0,00*	0,00*	0,13	0,00*	81,33
Qdd. de Si na PA	0,00*	0,00*	0,00*	0,05*	0,28	0,06	0,06	0,95	63,69
Densidade de esporos**	0,00*	0,15	—	0,42	—	—	0,01*	—	53,54
Colonização micorrízica**	0,00*	0,00*	—	0,58	—	—	0,00*	—	26,31

*: Variâncias significativas pelo teste F ($P < 0,05$); M: Tratamentos de inoculação com fungos micorrízicos; C: Tratamentos de corretivo de solo; F: Tratamento de níveis de P aplicado ao solo; BL: Blocos; CV: coeficiente de variação; DAP: dias após o plantio; PA: Parte Aérea; PDF: fósforo no disco de folha; P: Fósforo; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; Cu: Cobre; Zn: Zinco; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Al: Alumínio; Si: Silício; Qdd.: Quantidade total. **: Analisadas apenas para os tratamentos C e F e sua interação.

Tabela 09. Altura das plantas de milho inoculadas e não inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares em diferentes épocas de avaliação.

Inoculação micorrízica	Idade das plantas (DAP)								
	21	28	35	42	49	56	63	70	77
----- milímetros -----									
Inoculado	74	a 105	a 136	a 154	a 177	a 202	a 257	a 312	a 367
Não inoculado	68	a 93	b 120	b 132	b 147	b 165	b 184	b 210	b 239

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5%. DAP: dias após o plantio

O efeito principal da aplicação dos tratamentos de corretivos sobre a altura das plantas nas diversas épocas de avaliação é apresentado na Tabela 10. Os tratamentos corretivos apresentaram efeito significativo apenas aos 49 e 63 DAP, não sendo significativos ao final da condução do experimento. Isto provavelmente ocorreu devido à possibilidade de ter havido limitação da quantidade de água disponível para transpiração da planta pelo pequeno tamanho do vaso. Ray & Sinclair (1998) verificaram que o tamanho do vaso influencia o crescimento do milho a partir de 34 DAP e isto se relaciona com a transpiração cumulativa. Plantas de milho em vasos de 4 L apresentam uma taxa de transpiração de 56% da observada em plantas em vasos de 16 L. A limitação da transpiração possivelmente altera também o movimento dos nutrientes até às raízes, particularmente de Ca e Mg, que se movem grandemente por fluxo de massa (XU *et al.*, 1996) e são os principais nutrientes fornecidos pelos corretivos.

Tabela 10. Altura das plantas de milho cultivado em solo com diferentes tratamentos de corretivos de acidez em diferentes épocas de avaliação.

Corretivo	Idade das plantas (DAP)								
	21	28	35	42	49	56	63	70	77
-----milímetros-----									
Calcário (C)	70a	95a	121a	136a	149b	174a	201b	241a	275a
Escória (E)	68a	97a	123a	135a	152b	170a	206b	251a	297a
C+E	74a	107a	139a	153a	178a	198a	240a	278a	330a
Sem corretivo	70a	98a	131a	147a	169a	192a	237a	278a	319a

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5%. DAP: dias após o plantio.

O efeito principal dos níveis de fósforo aplicados ao solo sobre a altura das plantas nas diversas épocas de avaliação é apresentado na Figura 03. É visível o aumento da resposta aos níveis de fósforo, em crescimento das plantas, ao longo da condução do experimento. Verifica-se uma ausência de resposta ou uma resposta muito pequena nas três primeiras avaliações (até os 35 DAP). Nas avaliações seguintes a resposta às doses de P passam a ser lineares, se mantendo assim até os 49 DAP. A partir dos 63 DAP verifica-se que as respostas passam a ter ajustes raiz-quadrada, onde o incremento de crescimento entre as doses 0 e 95 mg dm⁻³ de P aplicado é proporcionalmente maior do que entre as doses 213 e 480 mg dm⁻³. Aos 77 DAP verifica-se um incremento da altura de 56% entre as doses 0 e 95 mg dm⁻³ de P aplicado e de 19% entre as doses 213 e 480 mg dm⁻³. Este comportamento é comum, sendo que Souza *et al.* (2008) também registraram aumento na altura de plantas de milho com a

elevação das doses de fósforo aplicadas a um ARGISSOLO VERMELHO AMARELO, com tendência de estabilização do efeito em doses superiores a 200 mg dm⁻³.

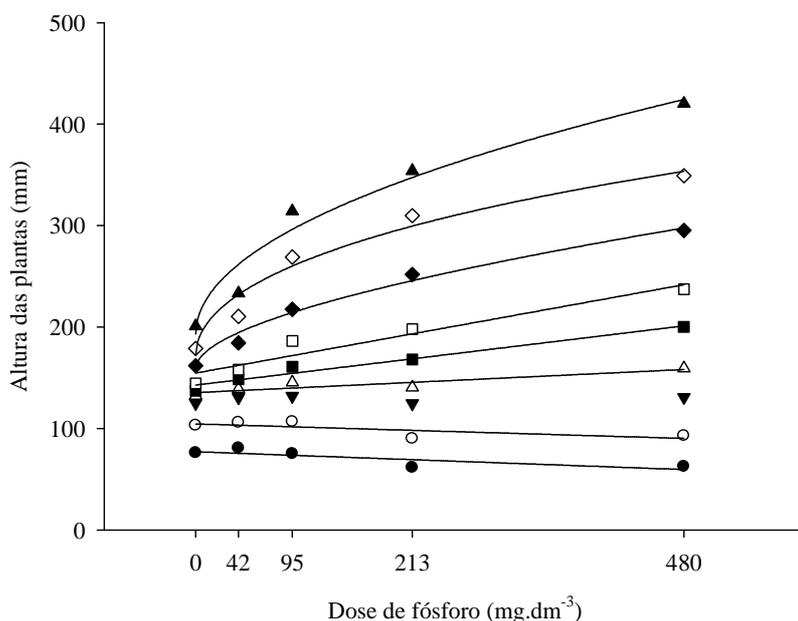


Figura 03. Altura das plantas de milho em diferentes épocas de avaliação em função das doses de fósforo aplicadas ao solo. ●: 21 DAP, $y = 77,12066 - 0,036547 x$, $R^2 = 0,93$; ○: 28 DAP, $y = 178,23283 + 0,264755 x$, $R^2 = 0,92$; ▼: 35 DAP: sem ajuste; △: 42 DAP: $y = 135,40939 + 0,047428 x$, $R^2 = 0,83$; ■: 49 DAP, $y = 142,870245 + 0,121483 x$, $R^2 = 0,97$; □: 56 DAP, $y = 154,698127 + 0,181375 x$, $R^2 = 0,93$; ◆: 63 DAP, $y = 58,502961 + 0,051467 x - 5,228005 x^{0,5}$, $R^2 = 0,98$; ◇: 70 DAP, $y = 172,151606 - 0,062018 x + 9,633113 x^{0,5}$, $R^2 = 0,96$; ▲: 77 DAP, $y = 193,059123 - 0,002947 x + 10,618433 x^{0,5}$, $R^2 = 0,96$.

O desdobramento da interação entre a inoculação micorrízica (M) e as doses de fósforo (F) na última época de avaliação (77 DAP) é apresentado na Figura 04. A inoculação micorrízica promoveu sempre plantas mais altas que a testemunha não inoculada, particularmente nas doses de 95 e 213 mg dm⁻³, onde o efeito foi altamente significativo. Desta forma, para o solo utilizado no estudo, a simbiose micorrízica do milho com a mistura *G. margarita* e *G. clarum* apresenta-se mais eficiente em um nível de P localizado na faixa que abrange as doses de 42, 95 e 213 mg dm⁻³ de P aplicado. Estas doses representavam em fósforo disponível no solo extraído por Mehlich I, 2,8; 6,8 e 22,0 mg dm⁻³, logo após a incubação com o fertilizante e 1,6; 2,4 e 7,7 mg dm⁻³, após a condução do experimento. O nível de P disponível logo após a incubação com o fertilizante está muito próximo da faixa de P disponível onde, segundo Saggin Júnior & Silva (2005), se verifica a resposta máxima à inoculação em diferentes estudos com espécies arbóreas, que é entre 9 e 27 mg dm⁻³. Na dose mais elevada de fósforo (480 mg dm⁻³) a altura das plantas inoculadas já não apresentava diferença estatisticamente significativa sobre o tratamento não inoculado.

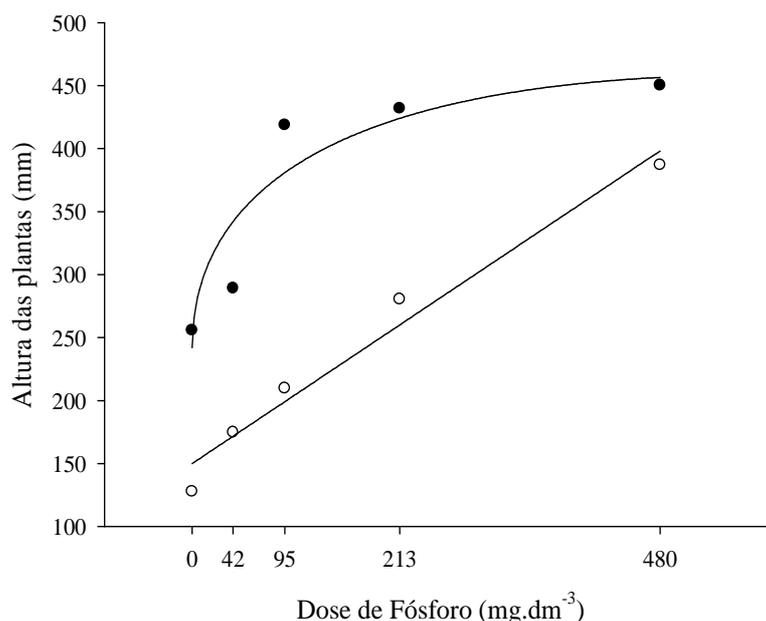


Figura 04. Altura ao final da condução do experimento (77 dias após o plantio) de plantas de milho inoculadas ou não inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de fósforo aplicadas ao solo. ●: inoculado, $y = 241,931083 - 0,367513x + 17,847372x^{0,5}$, $R^2 = 0,86$; ○: não inoculado, $y = 150,043856 + 0,517022x$, $R^2 = 0,97$.

4.2 Diâmetro do Caule

No diâmetro do caule das plantas foi verificado comportamento similar à altura, no que se refere à baixa ocorrência de interações significativas entre os tratamentos aplicados. Não houveram interações triplas e, em relação às interações duplas, aos 63 e 70 DAP ocorreram interações significativas entre a inoculação micorrízica (M) e os corretivos (C), e aos 21, 70 e 77 DAP houveram interações significativas entre a inoculação micorrízica (M) e as doses de fósforo (F) (Tabela 08). Devido ao exposto optou-se, em todas as avaliações de diâmetro, por apresentar em primeiro plano, os resultados dos efeitos principais, e depois o desdobramento apenas algumas interações mais ilustrativas do efeito apresentado.

O efeito principal da inoculação micorrízica no diâmetro do caule das plantas de milho ao longo da condução do experimento é apresentado na Tabela 11. Observa-se que a inoculação micorrízica provocou aumento do diâmetro do caule em todas as avaliações realizadas a partir dos 21 DAP, indicando que para o milho o diâmetro do caule é uma variável que mostra a resposta à inoculação micorrízica mais rapidamente que a altura das plantas.

Tabela 11. Diâmetro do caule das plantas de milho inoculadas e não inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares em diferentes épocas de avaliação.

Inoculação micorrízica	Idade das plantas (DAP)								
	21	28	35	42	49	56	63	70	77
----- milímetros -----									
Inoculado	3,11 a	3,99 a	3,73 a	4,29 a	5,23 a	4,91 a	4,90 a	5,17 a	5,32 a
Não inoculado	2,87 b	3,58 b	3,13 b	3,77 b	4,46 b	4,38 b	4,29 b	4,32 b	4,63 b

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5%. DAP: dias após o plantio

Os efeitos dos tratamentos de corretivos do solo sob o diâmetro do caule ao longo da condução do experimento são apresentados na Tabela 12. Foi verificado que a aplicação do tratamento com mistura dos corretivos calcário e escória (C+E) promoveu maior diâmetro do caule aos 28, 35, 42 e 63 DAP. Aos 56 e 63 DAP o diâmetro do caule das plantas no solo corrigido com C+E continuou maior que os demais tratamentos, porém não diferiu estatisticamente do tratamento sem aplicação de corretivos. Na primeira avaliação (21 DAP) e nas duas últimas avaliações (70 e 77 DAP) não houve diferenças entre os tratamentos de corretivos. No final do experimento, possivelmente a limitação do tamanho do vaso já provocava uma rápida diminuição de disponibilidade de água (RAY & SINCLAIR, 1998), afetando o efeito nutricional dos corretivos.

Tabela 12. Diâmetro do caule das plantas de milho cultivado em solo com diferentes tratamentos de corretivos de acidez em diferentes épocas de avaliação.

Corretivo	Idade das Plantas (DAP)								
	21	28	35	42	49	56	63	70	77
	-----milímetros-----								
Calcário (C)	3,06 a	3,69 b	3,38 b	3,90 b	4,50 b	4,35 b	4,46 b	4,52 a	4,80 a
Escória (E)	2,88 a	3,53 b	3,08 b	3,73 b	4,59 b	4,49 b	4,22 b	4,57 a	4,77 a
C+E	3,15 a	4,14 a	3,86 a	4,54 a	5,36 a	5,00 a	5,08 a	5,06 a	5,28 a
Sem corretivo	2,88 a	3,75 b	3,38 b	3,92 b	4,94 a	4,75 a	4,63 b	4,84 a	5,08 a

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5%. DAP: dias após o plantio.

O efeito principal das doses de P aplicadas ao solo no crescimento em diâmetro do caule nas plantas de milho ao longo da condução do experimento é apresentado na Figura 05. Nas primeiras avaliações (21 a 35 DAP) havia clara tendência de redução do diâmetro do caule com o aumento da dose de P aplicado, e entre 28 e 35 DAP foi observado afinamento do caule, apesar do crescimento da planta em altura (Tabelas 09 e 10). Isto indica um problema de estiolamento das plantas, o qual se agravava com a dose de fósforo, possivelmente relacionado ao maior crescimento em altura das plantas nas maiores doses.

Por ocasião da avaliação aos 35 DAP procedeu-se um afastamento dos vasos e o estaqueamento das plantas mais estioladas, manejo este que demonstrou seus efeitos na avaliação dos 42 DAP, quando o diâmetro do caule passou a apresentar aumento relacionado com a elevação da dose de P aplicado. A partir desta avaliação o diâmetro do caule recuperou o crescimento esperado, ajustando respostas lineares ao P aplicado, com coeficientes de determinação mais altos. Possivelmente o estiolamento ocorrido durante a condução do experimento deveu-se à sua condução durante o inverno (julho a setembro), quando os dias apresentam menor insolação.

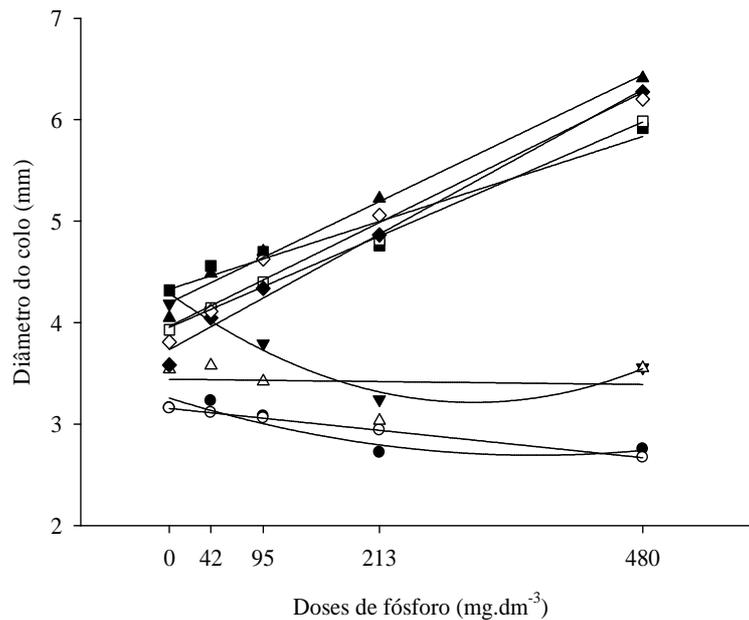


Figura 05. Diâmetro do caule das plantas de milho em diferentes épocas de avaliação em função das doses de P aplicadas ao solo. ●: 21 DAP, $y = 3,154775 - 0,001012x$, $R^2 = 0,69$; ○: 28 DAP, $y = 4,288315 - 0,006962x + 0,000011x^2$, $R^2 = 0,95$; ▼: 35 DAP: $y = 3,649894 - 0,004245x + 0,000008x^2$, $R^2 = 0,81$; △: 42 DAP: $y = 3,679269 + 0,002102x$, $R^2 = 0,85$ (não significativo); ■: 49 DAP, $y = 4,330135 + 0,003134x$, $R^2 = 0,95$; □: 56 DAP, $y = 3,954074 + 0,004214x$, $R^2 = 1,00$; ◆: 63 DAP, $y = 3,738946 + 0,005282x$, $R^2 = 0,99$; ◇: 70 DAP, $y = 3,964314 + 0,004801x$, $R^2 = 0,98$; ▲: 77 DAP, $y = 4,197027 + 0,004678x$, $R^2 = 0,99$.

O desdobramento da interação entre inoculação micorrízica (M) e corretivos (C), registrado apenas aos 63 e 70 DAP (Tabela 08), é apresentado na Tabela 13. Aos 63 DAP, plantas inoculadas em solo corrigido com a mistura de calcário e escória exibiram maior diâmetro do caule que as dos demais tratamentos de corretivos. As plantas não inoculadas apresentaram menor diâmetro do caule quando cultivadas em solo corrigido com escória pura. Entretanto, uma semana depois, aos 70 DAP, não havia diferenças significativas entre os tratamentos de corretivos, tanto nas plantas inoculadas, como nas não inoculadas com FMAs.

Quanto à resposta a inoculação, verifica-se aos 63 DAP benefício das micorrizas nos tratamentos com escória e com a mistura calcário + escória. Aos 70 DAP, além do benefício da inoculação micorrízica ocorrer nesses tratamentos, ocorria também no tratamento sem corretivo. O tratamento apenas com calcário não apresentou respostas à inoculação de FMAs. Estas modificações das respostas apresentadas pelo diâmetro do caule em curto espaço de tempo indicam que esta variável em milho é bastante sensível, sendo muito alterada pelas condições ambientais (como insolação) e pelos próprios tratamentos, sendo a primeira variável a mostrar benefício da inoculação micorrízica (Tabela 11). Quanto ao fato de apenas no solo corrigido com calcário puro não ter havido resposta da inoculação de FMAs, a compreensão do efeito não é clara. Pode haver fatores nutricionais envolvidos, inclusive por variação na disponibilidade de Ca, Mg e Si, ou por variação na disponibilidade de P.

Tabela 13. Diâmetro do caule, aos 63 e 70 DAP, de plantas de milho inoculadas ou não inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares cultivadas em solo com diferentes tratamentos de corretivos da acidez.

Corretivos	Inoculação micorrízica							
	Inoculado		Não inoculado					
	63 DAP		70 DAP					
	-----milímetros-----							
Calcário (C)	4,44	bA	4,48	aA	4,69	aA	4,36	aA
Escória (E)	4,91	bA	3,53	bB	5,23	aA	3,89	aB
C+E	5,46	aA	4,68	aB	5,58	aA	4,52	aB
Sem corretivo	4,79	bA	4,46	aA	5,17	aA	4,50	aB

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5%. C+E: mistura 1:1 de calcário e escória. DAP: dias após o plantio.

A interação entre os tratamentos de inoculação micorrízica (M) e de doses de fósforo (F) foi significativa aos 21, 70 e 77 DAP (Tabela 08). Por ser mais ilustrativa, no presente trabalho será desdobrada apenas a interação verificada ao final da condução do experimento (aos 77 DAP) que é apresentada na Figura 06. Verifica-se que as plantas inoculadas apresentaram maior diâmetro que as não inoculadas, até a dose de 213 mg dm⁻³ de P aplicado ao solo. Contudo, na dose máxima aplicada de P (480 mg dm⁻³) não foi observada diferença significativa entre plantas inoculadas e não inoculadas, havendo em valores absolutos, uma inversão no padrão, exibindo as plantas não inoculadas um valor numérico maior que as inoculadas. A redução da resposta à inoculação micorrízica com o aumento do nível de P disponível no solo é amplamente conhecida (KOIDE, 1991). Este efeito deve-se ao fato do nível de fósforo no solo interagir com a planta, sinalizando para que ela estimule ou diminua a entrada do fungo em suas raízes, seu espalhamento no córtex radicular e, conseqüentemente, sua esporulação (AMIJEE *et al.*, 1989). O mecanismo bioquímico que faz a planta exercer este controle não é totalmente evidenciado, sendo atribuído a três mecanismos básicos: diminuição da sinalização química produzida pela planta para estimular a infecção; emissão de compostos químicos de defesa que limitam o nível de infecção e regulação pela planta da taxa de transferência de carboidratos ou outros compostos essenciais ao crescimento do fungo (KOIDE & SCHREINER, 1992). Plantas micorrizadas em solo com alto nível de fósforo crescem menos que as não micorrizadas devido ao gasto de carboidrato para sustento do fungo sem retorno nutricional (KOIDE, 1991).

Desta forma, dentro de ponto de vista prático de utilização na agricultura, os níveis de fósforo devem ser mantidos no solo dentro de uma faixa que não iniba a eficiência da simbiose micorrízica. Porém este nível varia com a combinação solo x fungo x planta, mas é notavelmente influenciado pela planta, por sua característica genética de grau de dependência micorrízica (SIQUEIRA & SAGGIN JÚNIOR, 2001).

Para o cafeeiro, estima-se que a inibição do crescimento da planta micorrizada em relação à sem micorriza ocorra em valores de P disponível no solo (Mehlich I) superiores a 100 mg dm⁻³ (SIQUEIRA & COLOZZI-FILHO, 1986). No presente experimento, a inibição do crescimento em diâmetro do caule ocorreu com valores de P disponível (Mehlich I) em torno de 50 mg dm⁻³, indicando que o milho provavelmente possui um grau de dependência micorrízica menor que do cafeeiro. Esta característica genética do milho pode ser atribuída a décadas de trabalho de seleção genética feita de maneira inadequada, sob altos níveis de fósforo disponível no solo. Quando o melhoramento genético é feito em tais condições,

selecionando-se plantas de maior crescimento e produção, automaticamente selecionam-se plantas menos dependentes de micorrizas, sendo aquelas que conseguiram diminuir ao máximo a infecção do fungo em suas raízes e gastar menos carboidratos na nutrição deste (SAGGIN JÚNIOR & SILVA, 2005).

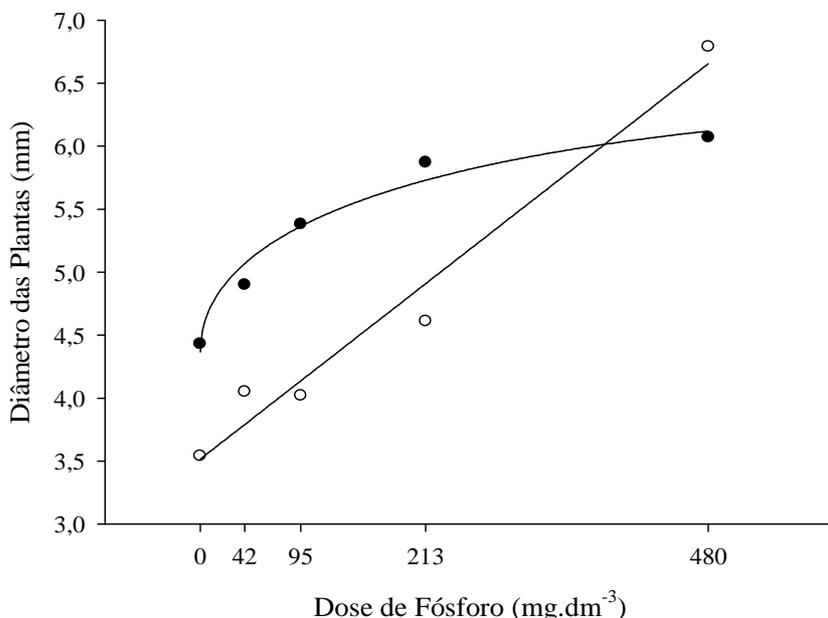


Figura 06. Diâmetro do caule das plantas de milho inoculadas ou não inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo. ●: inoculado, $y = 4,366569 - 0,001832x + 0,120127x^{0,5}$, $R^2 = 0,97$; ○: não inoculado, $y = 3,517117 + 0,006538x$, $R^2 = 0,97$.

4.3 Desenvolvimento Vegetativo das Plantas ao Final do Experimento

Em relação ao desenvolvimento das plantas ao final da condução do experimento, avaliado na forma de massa da parte aérea e raízes secas e de área foliar, verifica-se na Tabela 08, que todas estas variáveis exibiram interação entre a inoculação micorrízica (M) e as doses de fósforo (F). Houve ainda interações significativas entre a inoculação micorrízica (M) e os tratamentos de corretivos (C) para a massa de raízes secas e a área foliar e entre os corretivos (C) e as doses de fósforo (F) para a massa de raízes secas. Não ocorreram interações triplas.

Os efeitos da interação entre inoculação micorrízica (M) e as doses de fósforo aplicadas ao solo (F) a sobre a massa da parte aérea seca são apresentados na Figura 07. Tanto em plantas micorrizadas como nas não micorrizadas, houve aumento na massa da parte aérea seca em função da progressão das doses de P aplicadas ao solo, sendo os maiores valores absolutos obtidos na dose máxima. Entretanto, o benefício da inoculação micorrízica foi observado apenas até a dose de 213 mg dm⁻³ de P aplicado ao solo, não havendo benefício significativo na maior dose de P. Em função do fósforo aplicado ao solo, as plantas micorrizadas apresentaram uma resposta ajustada a uma equação raiz quadrada, enquanto as não inoculadas, a uma equação linear. Estes tipos de ajustes são comuns de serem obtidos em experimentos com plantas micorrizadas e não micorrizadas (SAGGIN JÚNIOR & SIQUEIRA, 1995; ROCHA et al., 2006). Entretanto, se fosse possível em todos os experimentos uma maior subdivisão dos níveis de fósforo aplicados ao solo, particularmente nas doses mais baixas, ajustes de curvas mais detalhados poderiam ser obtidos. Os modelos

teóricos de resposta a P de plantas não colonizadas por fungos micorrízicos são tidos como sendo de uma curva sigmoidal (SMITH & READ, 1997; JANOS, 1988). Uma curva do tipo sigmoidal pode ser obtida por uma equação logística e, quando ajustada para plantas não colonizadas por FMAs, pode até ser utilizada para a estimativa de sua dependência micorrízica (JANOS, 2007).

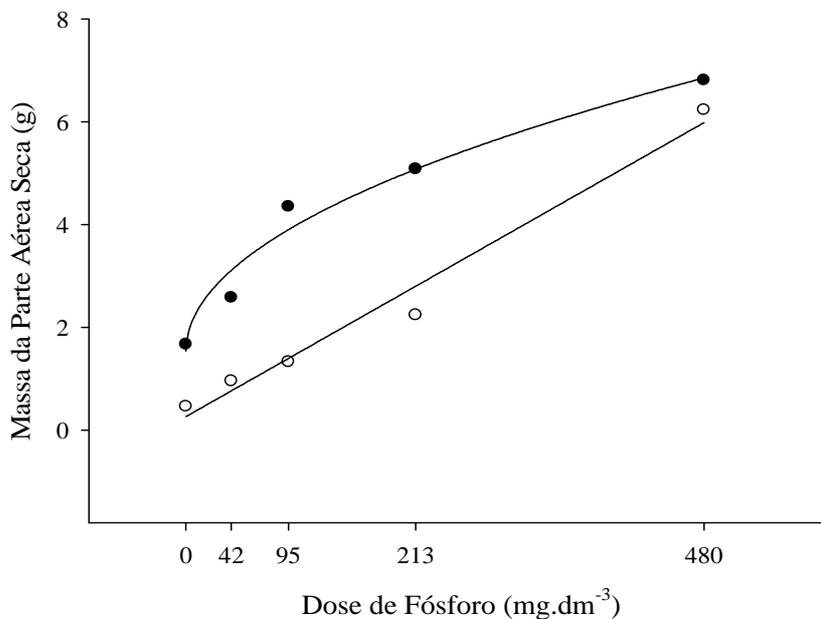


Figura 07. Massa da parte aérea seca de plantas inoculadas ou não inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo. ●: inoculado, $y = 1,539908 + 0,000035x + 0,241830x^{0,5}$, $R^2 = 0,97$; ○: não inoculado, $y = 0,270233 + 0,011907x$, $R^2 = 0,98$.

A massa das raízes secas é apresentada na Figura 08 desdobrando-se a interação entre a inoculação micorrízica (M) e as doses de P aplicadas ao solo (F). A resposta das plantas micorrizadas também apresentou um ajuste raiz-quadrada e das plantas não micorrizadas, linear, com um comportamento semelhante ao observado para a parte aérea (Figura 07), também não apresentando diferenças entre plantas micorrizadas e não micorrizadas na dose máxima de fósforo.

Analisando-se a equação raiz-quadrada obtida, pode-se calcular que o ponto máximo da curva ocorreu na dose 354 mg dm^{-3} de P, produzindo $1,69 \text{ g}$ de raízes secas. Entretanto, a maior resposta à inoculação (maior distância entre as curvas) foi calculada ser na dose 110 mg dm^{-3} , produzindo $1,45 \text{ g}$ de raízes secas. Esta produção representa 86% da produção máxima e pode ser obtida utilizando 31% da dose de P necessária para a produção máxima. Isto claramente sugere que a aplicação de doses de fósforo em um nível que maximize a eficiência da simbiose micorrízica é o mais econômico para a produção agrícola.

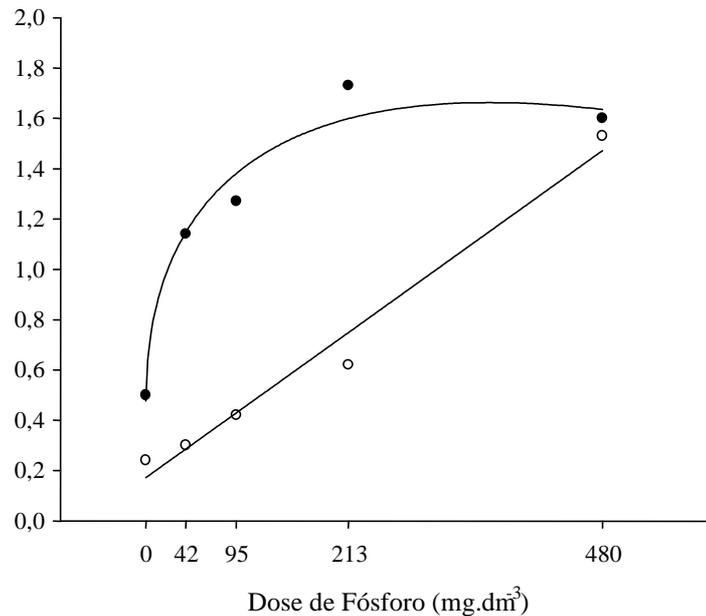


Figura 08. Massa de raízes secas de plantas inoculadas ou não inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo. ●: inoculado, $y = 0,479493 - 0,003414x + 0,128446x^{0,5}$, $R^2 = 0,96$; ○: não inoculado, $y = 0,182903 + 0,002712x$, $R^2 = 0,98$.

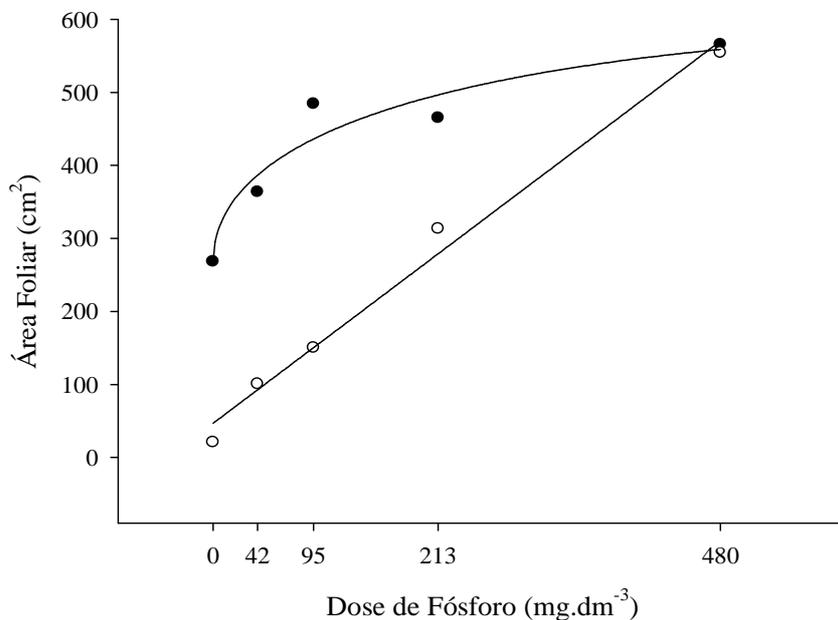


Figura 09. Área foliar de plantas de milho inoculadas ou não inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo. ●: inoculado, $y = 268,039570 - 0,326093x + 20,417894x^{0,5}$, $R^2 = 0,93$; ○: não inoculado, $y = 46,867603 + 1,090077x$, $R^2 = 0,99$.

A área foliar das plantas de milho em função do P aplicado e da inoculação micorrízica é apresentada na Figura 09. O resultado observado é bastante similar aos já apresentados para massa de parte aérea seca (Figura 07) e raízes secas (Figura 08), mostrando

ajuste raiz-quadrada para as plantas micorrizadas e linear para as plantas não micorrizadas, e deixando de apresentar resposta a inoculação micorrízica na maior dose de P aplicada.

O efeito da interação entre a inoculação micorrízica (M) os corretivos (C) sobre a massa de raízes secas e a área foliar é apresentado na Tabela 14. Verifica-se que na massa de raízes secas houve maior crescimento das plantas micorrizadas em relação às não micorrizadas, exceto no tratamento corrigido apenas por calcário. Já para a área foliar o benefício da inoculação foi verificado para todos os tratamentos de corretivos.

O efeito dos tratamentos de corretivos do solo foi pequeno para as variáveis de crescimento avaliadas depois da colheita das plantas, sendo a massa da parte aérea seca a única que apresentou efeito principal dos corretivos, onde o tratamento corrigido com a mistura calcário + escória apresentou massa maior (4,01 g) que os demais tratamentos (calcário, 2,64 g; escória, 3,00 g e testemunha sem corretivos, 3,30 g). Para a interação inoculação micorrízica (M) x corretivos (C) desdobrada na Tabela 14, verifica-se que efeito dos tratamentos corretivos foi observado somente para a massa das raízes secas das plantas inoculadas com FMAs, sendo que neste caso a aplicação apenas de calcário promoveu menor crescimento radicular que os demais tratamentos, inclusive que a testemunha sem corretivos. Como este efeito não ocorreu em outras variáveis de crescimento, é provável que tenha sido ocasionado por variabilidade nos dados da matéria seca de raízes, promovendo um erro estatístico do tipo I.

Tabela 14. Massa de raízes secas e área foliar de plantas de milho inoculadas e não inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares cultivadas em solo com diferentes tratamentos de corretivos da acidez.

Corretivos	Inoculação micorrízica							
	Inoculado		Não inoculado					
	Massa das raízes secas (g)		Área foliar (cm ²)					
	-----milímetros-----							
Calcário (C)	0,81	bA	0,64	aA	360,8	aA	242,0	aB
Escória (E)	1,23	aA	0,42	aB	447,9	aA	191,3	aB
C+E	1,48	aA	0,71	aB	456,7	aA	229,7	aB
Sem corretivo	1,45	aA	1,45	aB	448,8	aA	286,3	aB

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5%. C+E: mistura 1:1 de calcário e escória. DAP: dias após o plantio.

O efeito da interação entre os corretivos (C) e as doses de P (F) sobre a massa de raízes secas é apresentado na Figura 10. Verificou-se um aumento linear do crescimento das plantas em função do P naquelas cultivadas em solo corrigido com calcário e na testemunha sem corretivos. Nos tratamentos contendo escória os ajustes foram quadráticos. Não houve diferença entre os corretivos dentro de cada dose de P, apenas na dose 213 mg dm⁻³ o tratamento corrigido apenas com calcário (círculo preenchido) foi menor que os demais e na dose 480 mg dm⁻³ o tratamento com escória apenas (círculo não preenchido) foi menor que os demais. Estes efeitos descritos por último foram interpretados com cautela no presente trabalho, pois podem ter sido causados por variabilidade dos dados de massa seca das raízes.

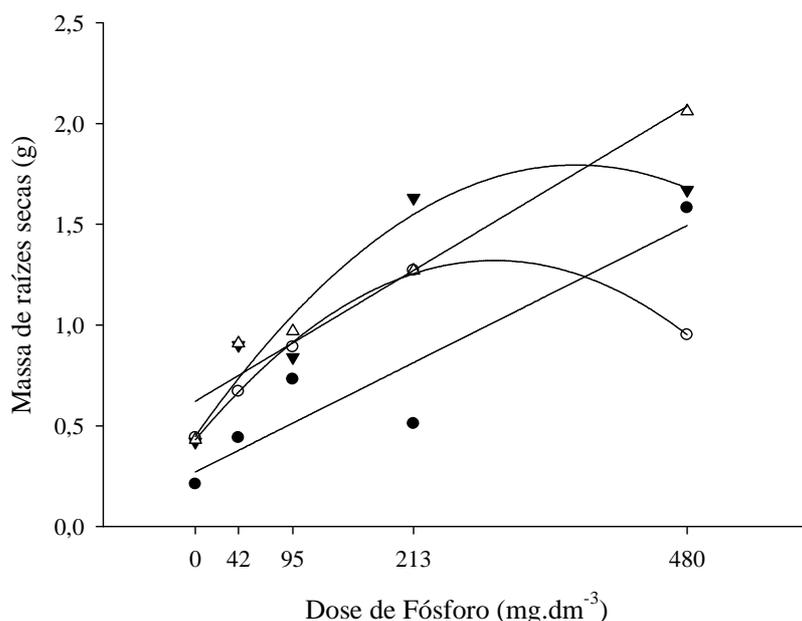


Figura 10. Massa de raízes secas de milho cultivado sobre solo com diferentes tratamentos corretivos em função das doses de P aplicadas ao solo. ●: calcário, $y = 0,275029 + 0,002567x$, $R^2 = 0,86$; ○: escória, $y = 0,436795 + 0,00606x - 0,000011x^2$, $R^2 = 0,99$; ▼: calcário e escória em mistura 1:1, $y = 0,448032 + 0,007432x + 0,0000x^2$, $R^2 = 0,93$; Δ: testemunha sem corretivos, $y = 0,650712 + 0,003043x$, $R^2 = 0,93$.

4.4 Fósforo no Disco de Folha (PDF)

Na quantidade de fósforo em discos de folha amostrados em diferentes épocas de condução do experimento, verificaram-se interações significativas entre a inoculação micorrízica (M) e as doses de P aplicadas (F) aos 45 e 75 DAP; interação entre os corretivos (C) e as doses de P aplicadas (F) aos 30 e 60 DAP e uma interação tripla (MxCxF) aos 60 DAP (Tabela 08). Em relação aos efeitos principais, não foram observados efeitos dos tratamentos corretivos (C) sobre o PDF. Houve efeito da inoculação micorrízica (M) e das doses de P (F) (Tabela 08). Optou-se por apresentar os efeitos principais e desdobrar apenas as interações duplas, devido a pouca ocorrência de interação tripla no experimento.

O efeito principal da inoculação de FMAs sobre a quantidade de fósforo no disco de folha nas diversas épocas de avaliação é apresentado na Tabela 15. Observa-se que aos 15 DAP as plantas micorrizadas apresentavam quantidade de P no disco ligeiramente menor que as não micorrizadas. Nas avaliações dos 30 e 45 DAP não se observou ainda efeito da inoculação, sendo que somente a partir dos 60 DAP é que o benefício nutricional das micorrizas foi detectado na quantidade de P em disco de folha. A melhora da nutrição fosfatada é o principal efeito benéfico das micorrizas arbusculares (SAGGIN JÚNIOR & SILVA, 2005).

Tabela 15. Quantidade de fósforo em discos de folha de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em diferentes épocas de avaliação

Inoculação micorrízica	Idade das plantas (DAP)				
	15	30	45	60	75
	----- mg.disco ⁻¹ -----				
Inoculado	0,080b	0,057a	0,040a	0,059a	0,064a
Não inoculado	0,088a	0,057a	0,038a	0,042b	0,046b

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5%. DAP: dias após o plantio

O efeito principal dos tratamentos de corretivos sobre a quantidade de fósforo no disco de folha nas diversas épocas de avaliação é apresentado na Tabela 16. Os tratamentos corretivos não apresentaram diferenças entre si, confirmando o resultado do teste de F (Tabela 08). Isto sugere que os tratamentos de corretivos não alteraram sensivelmente a nutrição fosfatada do milho.

O efeito principal dos tratamentos de doses de fósforo sobre a quantidade de fósforo no disco de folha nas diversas épocas de avaliação é apresentado na Tabela 17. Verifica-se que as dosagens de fósforo aplicadas ao solo resultaram em aumentos lineares significativos da quantidade fósforo no disco de folha em todas as épocas de avaliação. Isto indica que os tratamentos foram aplicados com sucesso e que a variável fósforo no disco de folha é sensível às variações nutricionais a que a planta é submetida.

Tabela 16. Quantidade de fósforo em discos de folha de milho cultivado em solo com diferentes tratamentos de corretivos de acidez em diferentes épocas de avaliação.

Corretivo	Idade das plantas (DAP)				
	15	30	45	60	75
	----- mg.disco ⁻¹ -----				
Calcário (C)	0,083a	0,056a	0,037a	0,049a	0,059a
Escória (E)	0,082a	0,056a	0,039a	0,049a	0,053a
C+E	0,080a	0,059a	0,041a	0,052a	0,056a
Sem corretivo	0,090a	0,055a	0,040a	0,053a	0,052a

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5%. DAP: dias após o plantio.

Os efeitos da interação entre a inoculação micorrízica (M) e as doses de fósforo aplicadas ao solo (F) a sobre a quantidade de fósforo no disco de folha aos 45 DAP são apresentados na Figura 11. Ambas, plantas inoculadas e não inoculadas exibiram aumento linear na quantidade de P no disco de folha em função do P aplicado ao solo, entretanto a resposta das micorrizadas foi maior, apresentando um ajuste de reta com maior inclinação que o das não inoculadas. Assim, na maior dose de P (480 mg dm⁻³) o disco de folha de plantas micorrizadas apresentavam quantidade de P superior ao das não inoculadas. Como aos 45 DAP ainda não havia um benefício claro da micorrização sobre a quantidade de P no disco de folha (Tabela 15), esta interação mostra que este benefício iniciou-se na maior dose de P no solo. Ou seja, é possível que na maior dose de P o estabelecimento da simbiose se inicie de uma forma normal, sendo a inibição da simbiose promovida pela alta dose de fósforo um evento posterior à penetração na raiz. Isto pode ser um indicativo da validade da proposta de Olsson et al., (2002) que em culturas *in vitro* de FMA's submetidas a níveis extremos de P disponível verificaram que a inibição do crescimento das hifas ocorria somente depois,

quando as raízes alcançam a solução com alto P, sugerindo que é a raiz que reduz o fluxo de carbono para o fungo.

Tabela 17. Quantidade de fósforo em discos de folha de milho cultivado em solo com diferentes tratamentos de doses de fósforo em diferentes épocas de avaliação.

Doses de P aplicadas ao solo	Idade das plantas (DAP)				
	15	30	45	60	75
mg dm ⁻³	mg.disco ⁻¹				
0	0,066	0,049	0,026	0,033	0,041
42	0,067	0,046	0,027	0,041	0,046
95	0,080	0,050	0,032	0,047	0,054
213	0,094	0,057	0,043	0,057	0,062
480	0,112	0,081	0,069	0,078	0,072
Ajuste	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear
a	0,067842	0,044784	0,024323	0,036513	0,044532
b	0,000097	0,000072	0,000092	0,000088	0,000062
R ²	0,95	0,96	1,00	0,98	0,92
Pr> t	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

DAP: dias após o plantio; Ajuste: ajuste de regressão obtida; a: interceptação do eixo y pelo ajuste linear; b: inclinação do ajuste linear; R²: coeficiente de determinação; Pr>|t|: Probabilidade do ajuste linear não ser significativo.

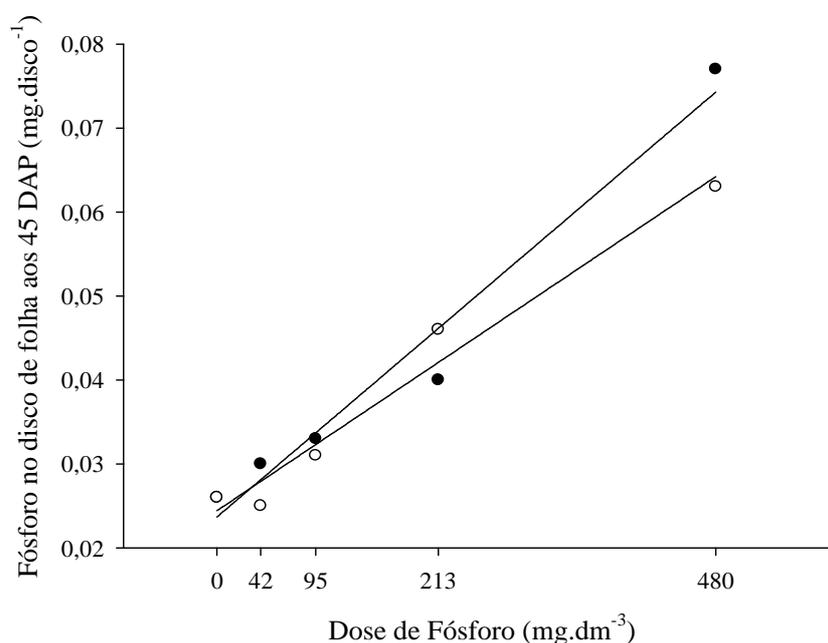


Figura 11. Quantidade de fósforo, aos 45 dias após o plantio (DAP), em discos de folha de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo. ●: inoculado, $y = 0,023975 + 0,000105x$, $R^2 = 0,97$; ○: não inoculado, $y = 0,024488 + 0,000082x$, $R^2 = 0,97$.

Já os efeitos da interação entre a inoculação micorrízica (M) e as doses de fósforo aplicadas ao solo (F) na quantidade de fósforo no disco de folha aos 75 DAP (Figura 12) mostram o efeito da simbiose completamente estabelecida na planta. Observam-se curvas típicas de plantas micorrizadas e não inoculadas em resposta ao P do solo (SAGGIN JÚNIOR & SIQUEIRA, 1995; ROCHA et al., 2006). As plantas não inoculadas continuavam

apresentando aumento linear na quantidade de fósforo presente nos discos foliares enquanto as plantas micorrizadas exibiram uma curva raiz-quadrada, com aumento mais pronunciado nas doses iniciais de P e tendência à estabilidade nas mais elevadas. SANTOS *et al.*, (1996), em experimento com milho e fungos micorrízicos nativos, comentam que aos 46 DAP as plantas ainda se encontram em fase de estabelecimento da simbiose. Em geral, o estabelecimento da fase “Plateau” da colonização micorrízica demora pelo menos 40 dias (McGONIGLE, 2001).

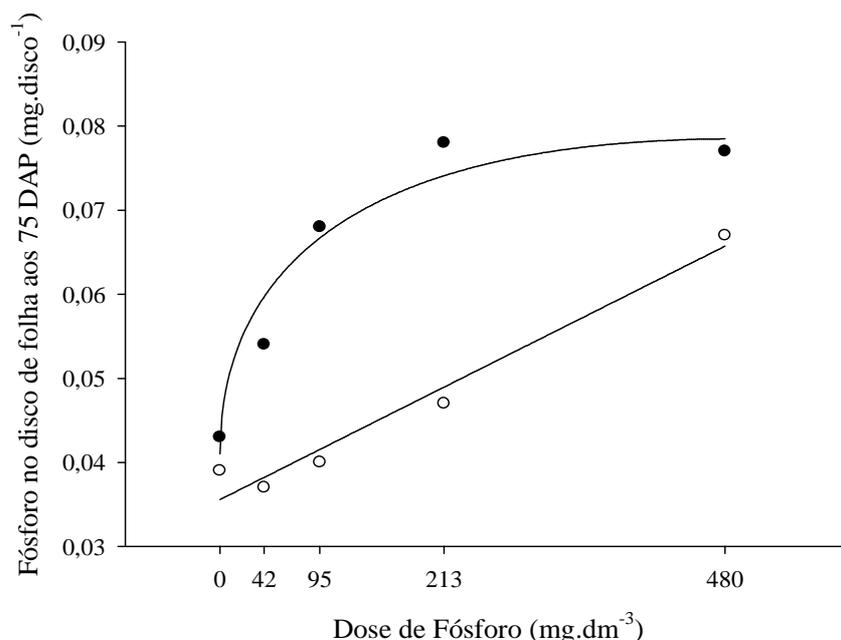


Figura 12. Quantidade de fósforo, aos 75 dias após o plantio (DAP), em discos de folha de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo. ●: inoculado, $y = 0,040899 - 0,000077x + 0,0034x^2$, $R^2 = 0,94$; ○: não inoculado, $y = 0,035590 + 0,000062x$, $R^2 = 0,97$.

Os efeitos da interação entre os tratamentos de corretivos (C) e as doses de fósforo aplicadas ao solo (F) na quantidade de fósforo no disco de folha aos 30 e 60 DAP são apresentadas nas Figuras 13 e 14, respectivamente. Os efeitos dos corretivos sobre o nível de P no disco foram somente observados na maior dose de P aplicada (480 mg dm⁻³). Aos 30 DAP observa-se que o tratamento de mistura de calcário + escória promoveu maior quantidade de P no disco que os demais tratamentos de corretivos (Figura 13). Enquanto que aos 60 DAP observa-se que o tratamento com escória pura promoveu menor quantidade de P no disco de folha que os demais corretivos (Figura 14).

Aos 30 DAP, verificou-se aumento linear da quantidade de P no disco foliar nos tratamentos com escória (pura e combinada ao calcário) e na testemunha sem corretivo. O calcário puro exibiu um ajuste quadrático com tendência de queda no conteúdo de fósforo no disco de folha até a dose de 213 mg dm⁻³, mostrando novo aumento na maior dose de P. Estes efeitos parecem estar relacionados com uma interação entre o fósforo e o Ca, que é o principal nutriente acompanhante do fertilizante fosfatado utilizado. As modificações induzidas pelas doses de superfosfato triplo e corretivos modificaram as relações Ca:Mg e o pH do solo logo após a aplicação dos diferentes tratamentos (Tabela 07). Aos 60 DAP, todos os tratamentos de corretivos mostraram aumentos lineares às doses de P aplicadas.

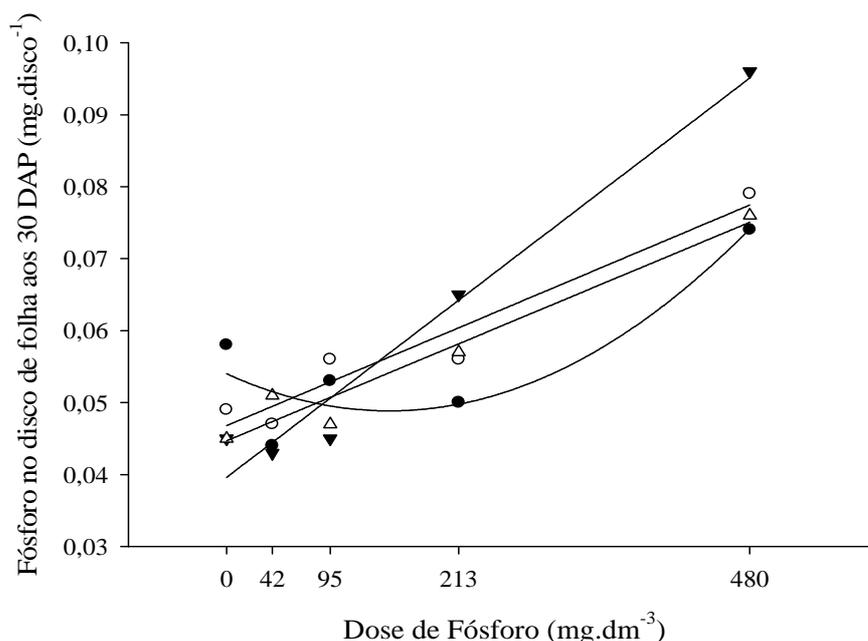


Figura 13. Quantidade de fósforo, aos 30 dias após o plantio (DAP), em discos de folha de milho cultivado sobre solo com diferentes tratamentos corretivos em função das doses de P aplicadas ao solo. ●: calcário, $y = 0,054396 - 0,000076x + 0,0000001x^2$, $R^2 = 0,86$; ○: escória, $y = 0,046628 + 0,000064x$, $R^2 = 0,95$; ▼: calcário + escória: $y = 0,039379 + 0,000117x$, $R^2 = 0,97$; Δ: testemunha sem corretivo, $y = 0,044715 + 0,000064x$, $R^2 = 0,96$.

4.5 Nutrientes na Parte Aérea

Para os teores e quantidades da maioria dos nutrientes analisados na parte aérea após a colheita das plantas houve efeito significativo da interação entre a inoculação micorrízica (M) e as doses de fósforo (F) (Tabela 08). Esta interação foi significativa para os teores de P, Ca, Mg, Cu, Zn Mn e Si e para as quantidades acumuladas na parte aérea de P, Mg, Zn Mn e Al. Houve também interação significativa entre os corretivos (C) e as doses de fósforo (F) para o teor de Mg e para a quantidade acumulada de Fe e Al.

A interação entre tratamentos de inoculação micorrízica (M) e corretivos (C) foi significativa para os teores de Zn e Al e para as quantidades acumuladas de Ca e Mn. Interação tripla MxCxF foi verificada apenas para as variáveis teor de Zn e quantidade acumulada de Fe e Al, entretanto, como houve tendência geral neste experimento das interações triplas não serem significativas, será desdobrada apenas a interação tripla da quantidade acumulada de Al, que foi altamente significativa, desconsiderando-se as interações duplas desta variável. Para as demais variáveis serão apresentadas apenas os desdobramentos das interações duplas descritas acima.

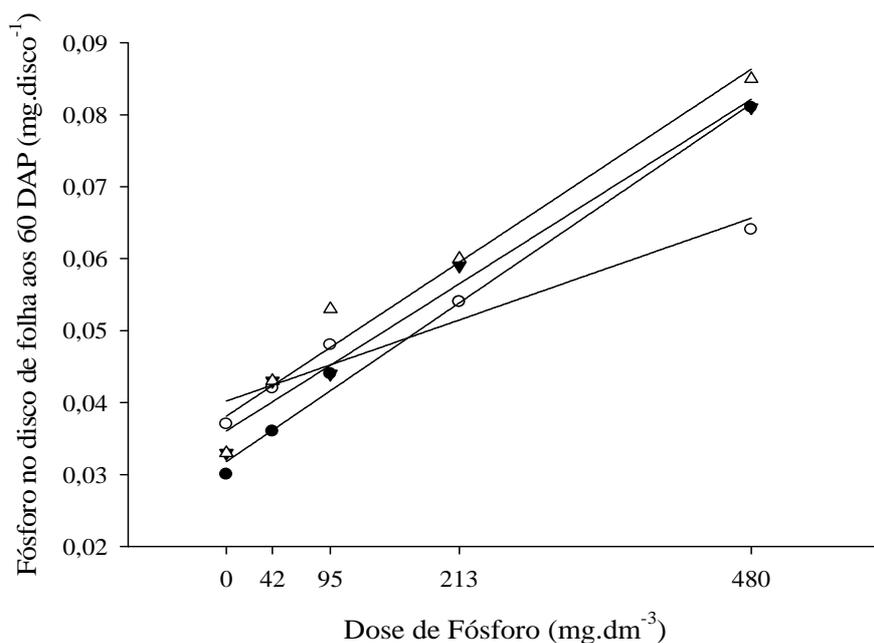


Figura 14. Quantidade de fósforo, aos 60 dias após o plantio (DAP), em discos de folha de milho cultivado sobre solo com diferentes tratamentos corretivos em função das doses de P aplicadas ao solo. ●: calcário, $y = 0,031757 + 0,000104x$, $R^2 = 0,99$; ○: escória, $y = 0,040062 + 0,000052x$, $R^2 = 0,95$; Δ calcário + escória: $y = 0,036303 + 0,000096x$, $R^2 = 0,98$; ▼: testemunha, $y = 0,037927 + 0,000101x$, $R^2 = 0,96$.

Verifica-se na Figura 15 que tanto para o teor quanto para a quantidade acumulada, os ajustes de regressão são típicos de plantas micorrizadas e não inoculadas em função do fósforo no solo (SAGGIN JÚNIOR & SIQUEIRA, 1995; ROCHA et al., 2006), e refletem as respostas verificadas de crescimento das plantas micorrizadas seguindo um modelo raiz quadrada e das plantas não inoculadas um modelo linear ou próximo ao linear de resposta ao P aplicado ao solo. Isto indica que a nutrição fosfatada foi o que mais influenciou as respostas das plantas aos tratamentos de inoculação micorrízica e doses de fósforo, confirmando o esperado, pois o efeito das micorrizas sobre a nutrição fosfatada é amplamente conhecido (BOLAN et al., 1991).

Quanto aos tratamentos de corretivos, verifica-se que não apresentaram efeitos sobre o teor de P na parte aérea (Figura 16). Entretanto, na quantidade acumulada de P na parte aérea, verifica-se que os tratamentos cujo solo foi corrigido apenas com escória, ou a testemunha sem corretivos, apresentou maior acúmulo. Isto reflete o resultado obtido em massa da parte aérea seca, onde o tratamento de mistura de corretivos (C + E) apresentou maior crescimento que os demais, portanto não indicando efeito direto dos corretivos sobre a nutrição fosfatada.

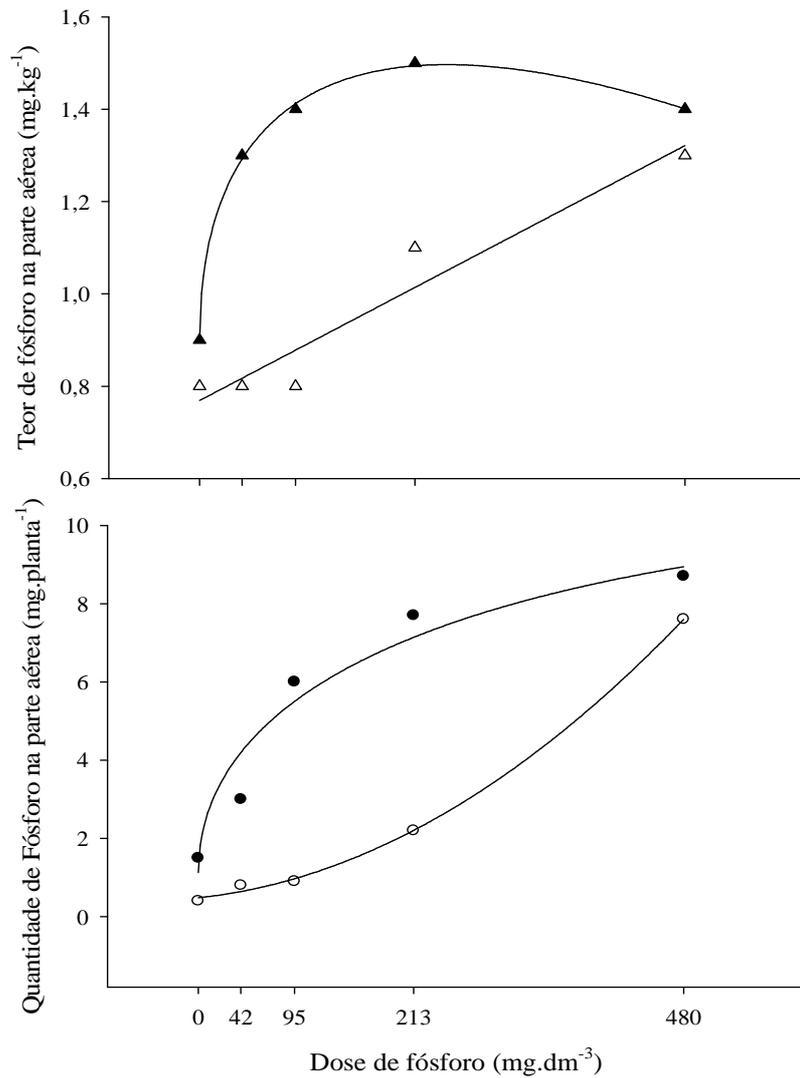


Figura 15. Teor e quantidade total de fósforo na parte aérea de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo. ▲: inoculado, $y = 0,918969 - 0,002001x + 0,066895x^{0,5}$, $R^2 = 0,99$; Δ: não inoculado, $y = 0,751331 + 0,001197x$, $R^2 = 0,93$; ●: inoculado, $y = 1,131372 - 0,007315x + 0,517387x^{0,5}$, $R^2 = 0,94$; ○: não inoculado, $y = 0,492523 + 0,002847x + 0,000025x^2$, $R^2 = 0,99$.

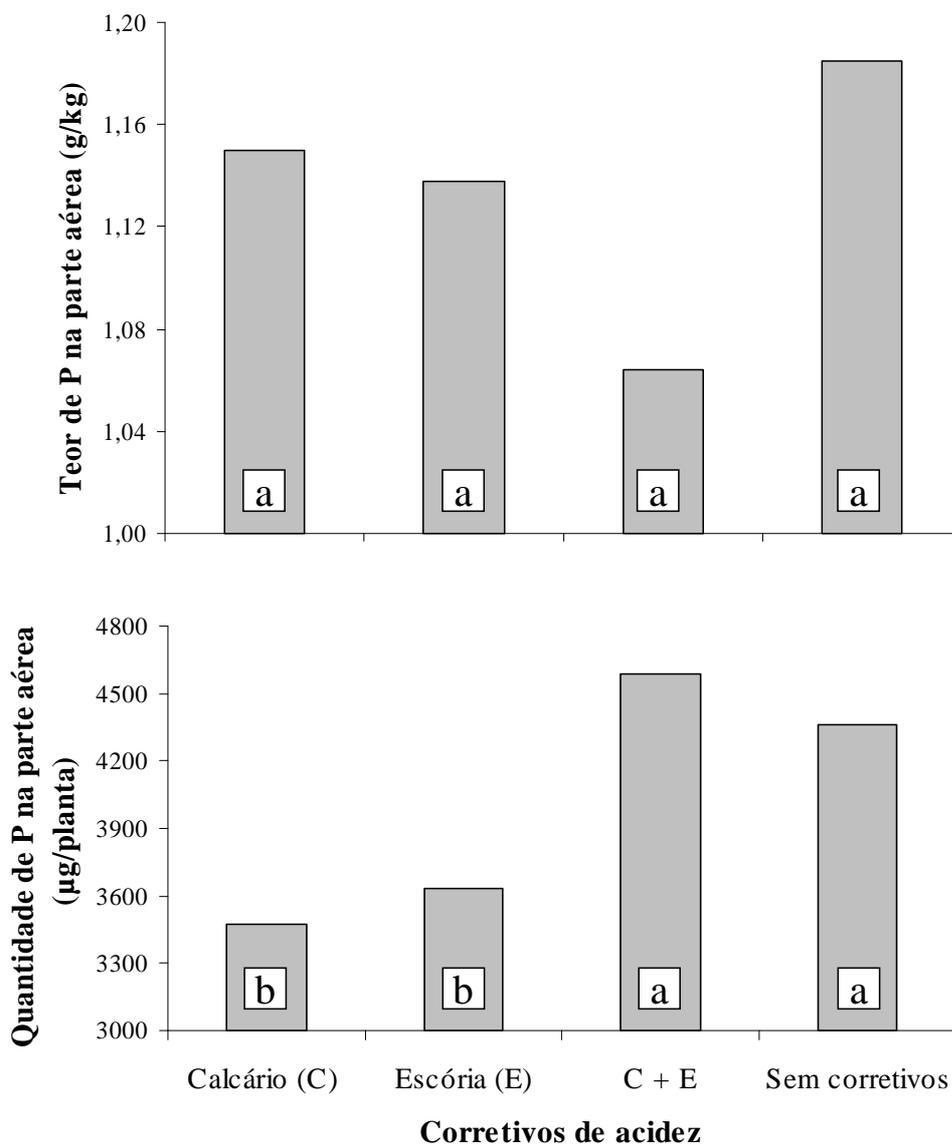


Figura 16. Teor e quantidade de fósforo na parte aérea de milho cultivado sobre solo com diferentes tratamentos corretivos de acidez. Letras iguais dentro de cada barra indicam ausência de diferença entre as médias pelo teste de Scott Knott 5%.

O teor de Ca na parte aérea das plantas de milho apresentou efeito apenas da interação entre inoculação micorrízica (M) e doses de fósforo (F) e dos efeitos principais de todos os fatores estudados (Tabela 08) enquanto que a quantidade acumulada de Ca na parte aérea apresentou efeito apenas da interação entre os tratamentos de corretivos (C) e doses de fósforo (F) e o efeito principal dos tratamentos de inoculação (Tabela 08).

Os desdobramentos da interação MxF para o teor de Ca e da interação CxF para quantidade acumulada de Ca na parte aérea são apresentados na Figura 17. Verifica-se que o teor de Ca na parte aérea das plantas não inoculadas decresce linearmente com o aumento das doses de P aplicadas, enquanto que nas plantas inoculadas com fungos micorrízicos este decréscimo não ocorre, não havendo diferenças significativas entre as doses de P. Em geral, os teores de Ca nas plantas micorrizadas foram menores que nas sem micorrizas. Isto, aliado com o decréscimo de teor com o aumento do P aplicado nas plantas não micorrizadas, sugere

que houve um efeito de diluição do Ca nas plantas de maior desenvolvimento (JARREL & BEVERLEY, 1981). Ao contrário dos teores, a quantidade de Ca acumulada na parte aérea aumenta linearmente com o aumento das doses de P (Figura 17). O aumento é diferenciado pelo tipo de corretivo de acidez utilizado.

Para a mistura de corretivos C+E e para a testemunha sem corretivos, o aumento da quantidade de Ca foi maior e mais acentuado (maior inclinação da reta) que nos tratamentos corrigidos apenas com calcário ou com escória. O solo da testemunha sem corretivos foi o tratamento que possuía menos Ca e Mg que os demais (Tabela 07), porém o Ca foi fornecido com a aplicação das doses de P e com a dose de P de 213 mg dm^{-3} , os teores de Ca no solo já se apresentavam praticamente da mesma magnitude que dos tratamentos com corretivos de acidez no solo sem aplicação de fósforo (Tabela 07). Isto confirma que o superfosfato triplo é uma boa fonte de Ca. Não está claro se as modificações na relação Ca:Mg no solo pode ter influenciado a nutrição e o crescimento do milho nos diferentes tratamentos, inclusive porque há dúvidas sobre como que esta relação afeta o milho (KELTJENS, 1995).

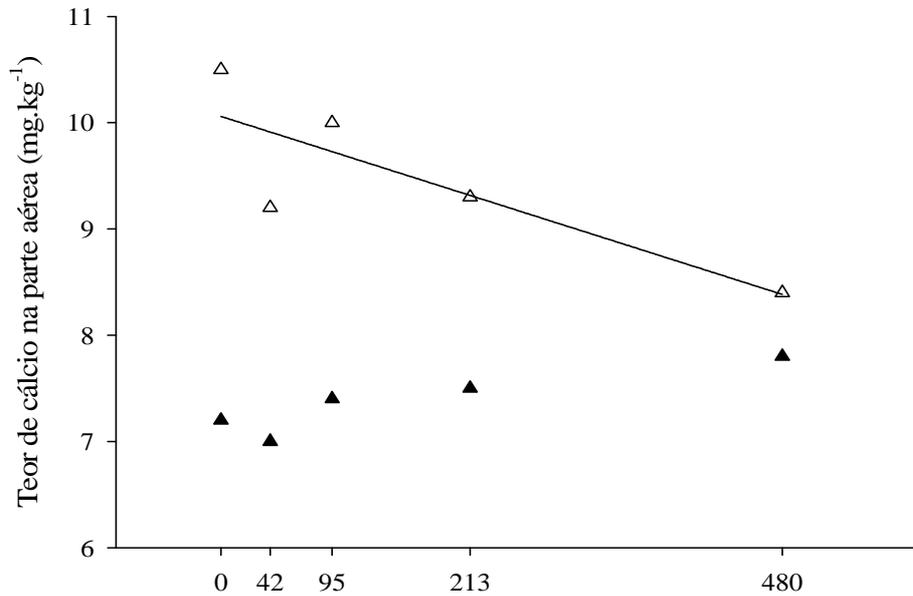
O teor de Mg na parte aérea das plantas de milho apresentou efeito das interações entre inoculação micorrízica (M) e doses de fósforo (F) e entre os tratamentos de corretivos (C) e doses de fósforo (F), além dos efeitos principais de todos os fatores estudados (Tabela 08). Já a quantidade acumulada de Mg na parte aérea apresentou efeito apenas da interação MxF e os efeitos principais de corretivos (C) e fósforo (Tabela 08).

Os desdobramentos da interação MxF para teor e quantidade acumulada de Mg na parte aérea são apresentados na Figura 18. Em ambas as variáveis houve tendência das plantas não inoculadas com FMAs apresentarem aumento linear em função do P aplicado ao solo, enquanto que aquelas inoculadas a resposta ao P apresentou um ajuste quadrático. As plantas micorrizadas apresentaram maior teor e quantidade acumulada de Mg que as não inoculadas particularmente nas doses de 95 e 213 mg dm^{-3} de P aplicado. Este fato pode ser puramente atribuído a melhor nutrição promovida pelas micorrizas, já que as diferentes doses de superfosfato triplo não afetaram a disponibilidade de magnésio no solo (Tabela 07).

Houve grande aumento na disponibilidade de Mg no solo entre as análises realizadas antes e após a condução do experimento (Tabela 07). Em média o aumento na disponibilidade de Mg foi de 3 vezes, mas houve valores que chegaram a ser 7 vezes maiores na análise após a condução do experimento, em relação a realizada antes da condução. Embora isto sugira que houve algum erro na análise de Mg no solo, os valores dentro de cada época de análise são bastante coerentes com os diferentes tratamentos de corretivos, sendo que os tratamentos apenas com escória e a testemunha sem corretivos apresentavam menores teores de Mg no solo tanto antes como depois da condução do experimento, enquanto que os tratamentos que receberam calcário apresentavam maior disponibilidade de Mg.

Os valores da relação Ca:Mg na análise pós-experimento apresentavam valores mais próximos do considerado ideal (média de 3:1), enquanto que na análise pré-experimento os solos corrigidos apenas com escória ou sem corretivos apresentavam relação Ca:Mg excessivamente alta (acima de 11:1).

(a)



(b)

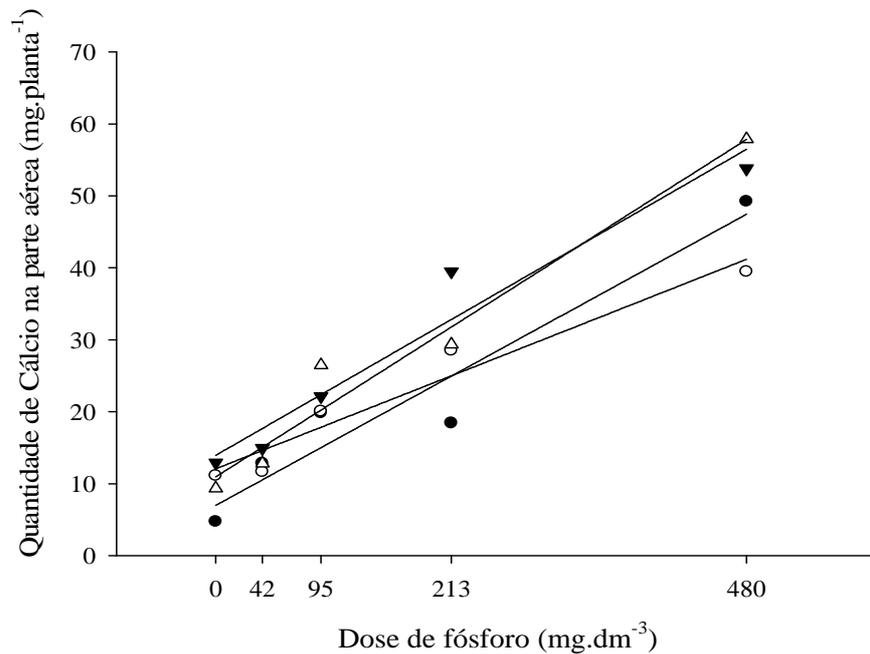


Figura 17. a: Teor de cálcio na parte aérea de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo. ▲: inoculado, não significativo para o teste F; △: não inoculado, $y = 10,026913 - 0,003305x$, $R^2 = 0,68$. ●: inoculado, $y = 12,470602 + 0,170299x - 0,000195x^2$, $R^2 = 0,96$; ○: não inoculado, $y = 4,030003 + 0,09562x$, $R^2 = 0,99$. **b:** Quantidade de cálcio na parte aérea de milho cultivado sobre solo com diferentes tratamentos corretivos de acidez em função de doses de fósforo aplicadas ao solo. ●: calcário, $y = 7,021002 + 0,08413x$, $R^2 = 0,93$; ○: escória, $y = 12,0899 + 0,060604x$, $R^2 = 0,95$; ▼: calcário e escória em mistura 1:1, $y = 13,95676 + 0,088558x$, $R^2 = 0,95$; △: testemunha, $y = 10,9653 + 0,097657x$, $R^2 = 0,96$.

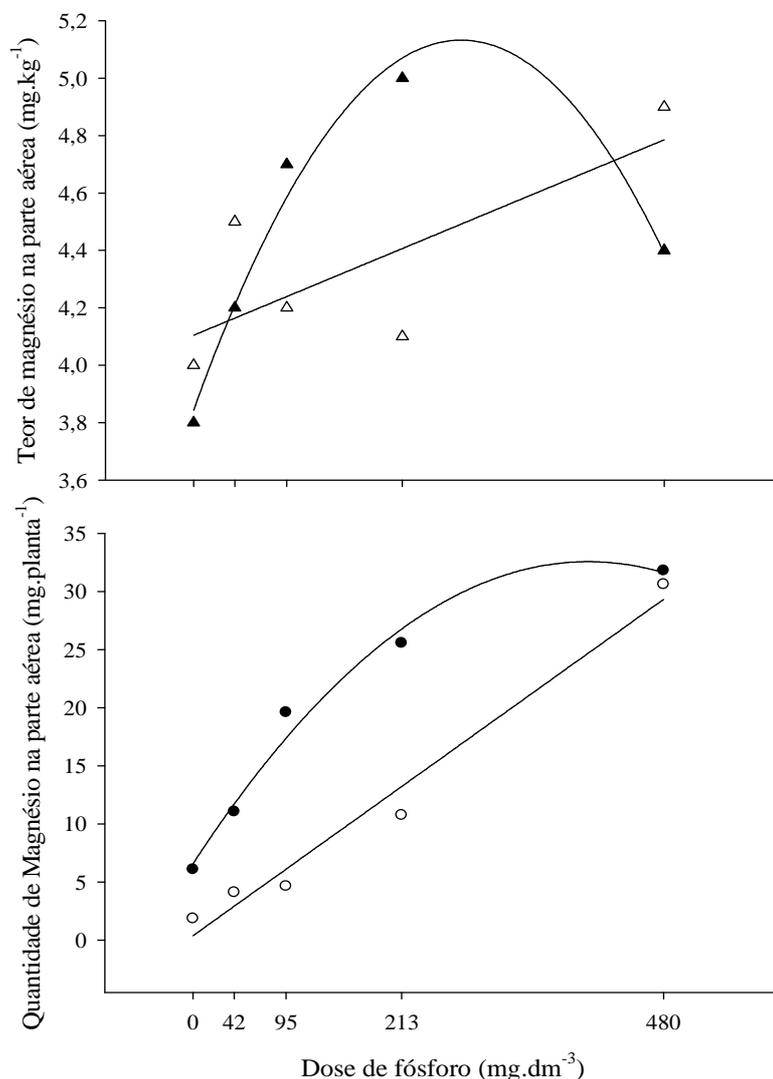


Figura 18. Teor e quantidade total de magnésio na parte de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo. \blacktriangle : inoculado, $y = 3,848983 + 0,009194x + 0,000017x^2$, $R^2 = 0,95$; \triangle : não inoculado, $y = 4,107406 + 0,001452x$, $R^2 = 0,53$; \bullet : inoculado, $y = 6,578710 + 0,128858x - 0,00016x^2$, $R^2 = 0,98$; \circ : não inoculado, $y = 0,383759 + 0,060279x$, $R^2 = 0,96$.

A dispersão das médias de matéria da parte aérea seca do milho em função da relação Ca:Mg no solo pós-experimento é apresentada na figura 19. Verifica-se que nas condições experimentais utilizadas as plantas de maior crescimento (demarcadas com retângulo de linha contínua) foram cultivadas em solo com relação Ca:Mg entre 4:1 e 5:1, as quais portanto, foram ideais para o milho neste experimento. Nesta condição ideal da relação Ca:Mg não houve distinção entre plantas inoculadas ou não inoculadas com fungos micorrízicos (Figura 19a); a relação ideal foi obtida com a aplicação da mistura calcário+escória ou sem a aplicação de corretivos de acidez (Figura 19b); e estes maiores crescimentos podem ser resultado da combinação de maiores doses de P (213 e 480 mg dm^{-3}) com relação Ca:Mg adequada (Figura 19c).

Plantas com bom crescimento (demarcadas com retângulo de linha tracejada), embora menores que as mencionadas no parágrafo anterior, apresentaram desenvolvimento considerado excelente, acima de 5 g de matéria da parte aérea seca. Estas plantas são basicamente plantas inoculadas com fungos micorrízicos (Figura 19a), independentemente do tratamento corretivo aplicado ao solo (Figura 19b), fertilizadas com as maiores doses de fósforo no solo (Figura 19c). Como estas plantas se distribuem em uma ampla faixa de relação Ca:Mg, que vai de 2:1 a 9:1, acredita-se que os fungos micorrízicos tenham auxiliado sensivelmente estas plantas suportarem um estresse de uma relação Ca:Mg não adequada. As demais plantas, com crescimento inferior a 5 g de matéria da parte aérea seca, cresceram em solo com relação Ca:Mg subótima para a condição do estudo, que foi inferior a 4:1. Nestas plantas não se verifica uma tendência de efeito dos tratamentos corretivos do solo (Figura 19b), entretanto, verifica-se menor crescimento, quanto menor a dose de P (Figura 19c) e na ausência de inoculação de FMAs (Figura 19a).

O teor de cobre na parte aérea das plantas de milho apresentou efeito apenas da interação entre inoculação micorrízica (M) e doses de fósforo (F) e dos efeitos principais de todos os fatores estudados, enquanto que a quantidade acumulada de cobre na parte aérea apresentou efeito principal dos tratamentos de corretivos (C) (Tabela 08). O desdobramento da interação MxF e o efeito principal dos tratamentos de corretivos para o teor de cobre são apresentados na Figura 20.

Verificou-se que o teor de cobre na parte aérea das plantas não inoculadas decresce acentuadamente com a aplicação de fósforo no solo, enquanto que nas plantas inoculadas com FMAs o teor de cobre apresentou um comportamento quadrático, com incremento até a dose de 213 mg dm⁻³ de P aplicado, com declínio na maior dose de P (Figura 20a), onde há sobreposição dos valores, sendo registrado 6 mg.kg⁻¹ tanto para plantas micorrizadas quanto para não inoculadas. Esta recíproca inibição entre absorção de fósforo e cobre é bem conhecida (SAUL, 1993). A inoculação micorrízica amenizou esta inibição permitindo aumento teor de Cu na parte aérea do milho nas menores doses de P aplicado.

Em relação ao efeito dos tratamentos corretivos sobre o teor e quantidade acumulada de cobre na parte aérea verificou-se que os tratamentos que receberam escória apresentaram menor teor e quantidade acumulada de cobre. A menor absorção de Cu por aplicação de silicatos é conhecida e até desejado quando o Cu encontra-se em níveis tóxicos no solo (NOWAKOWSKI & NOWAKOWSKA, 1997). Entretanto, pode ser indesejável quando o solo já apresentar baixos níveis de cobre.

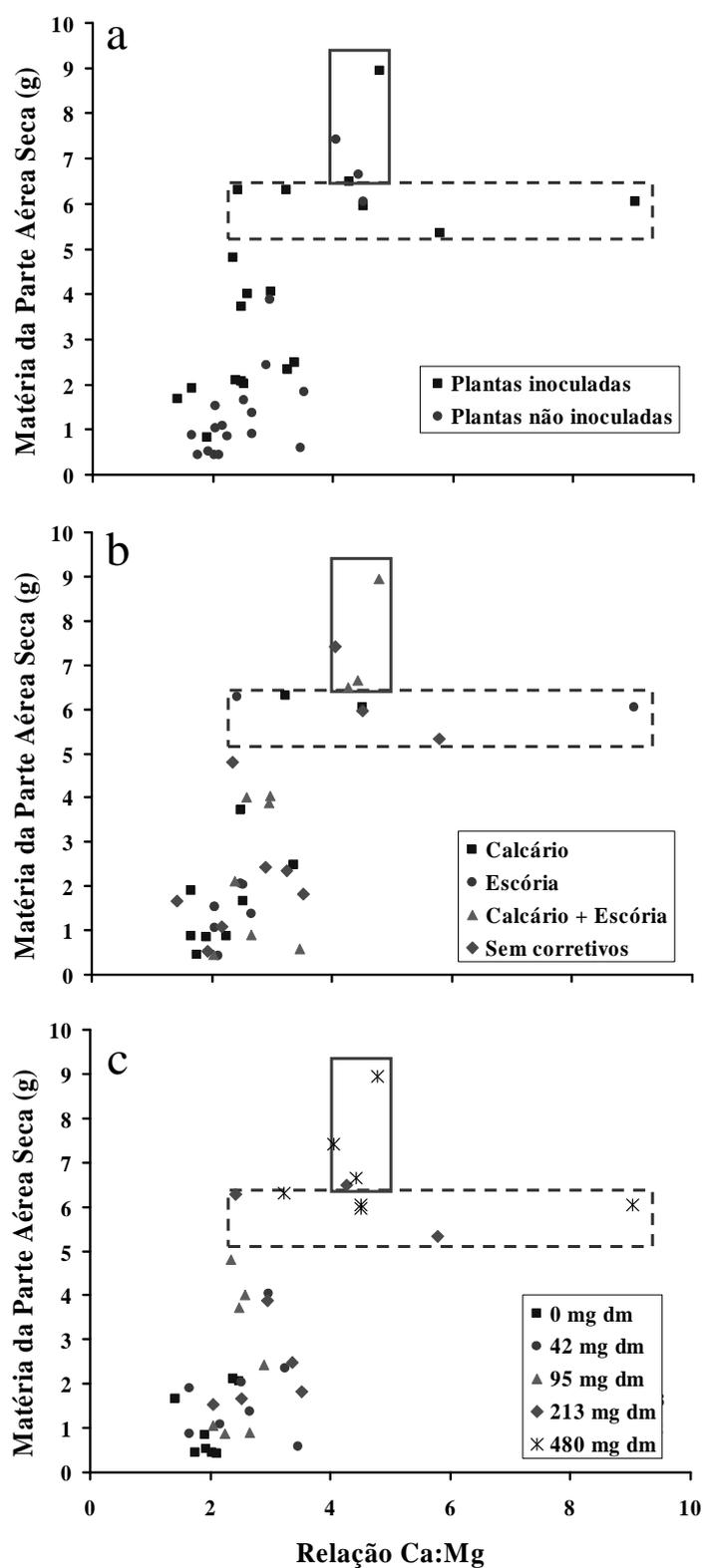
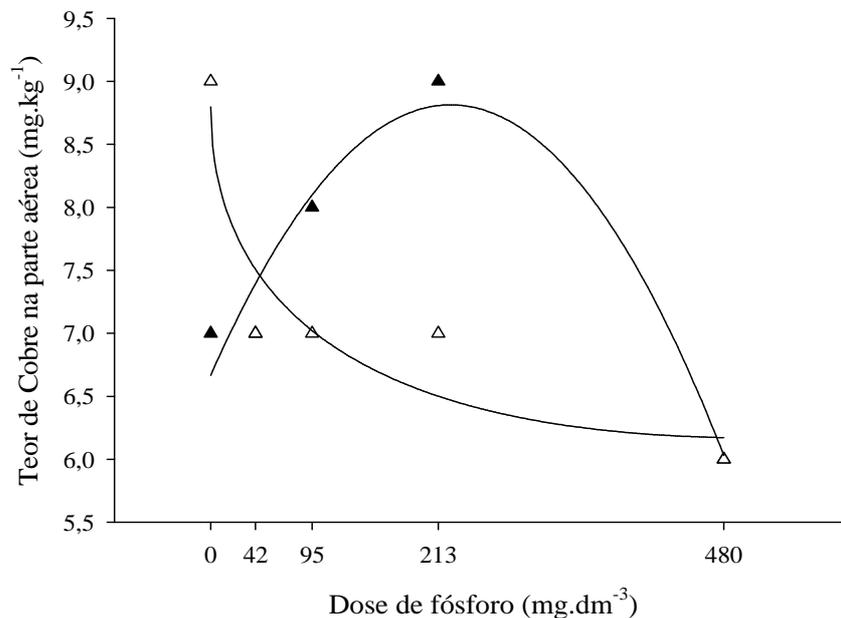


Figura 19. Dispersão das médias de matéria da parte aérea seca de milho plotadas em função da relação Ca:Mg no solo após a condução do experimento. **a):** separação por tratamento de inoculação ou não inoculação com fungos micorrízicos arbusculares; **b):** separação por tratamentos de corretivos de acidez; **c):** separação por tratamentos de doses de P aplicadas ao solo.

(a)



(b)

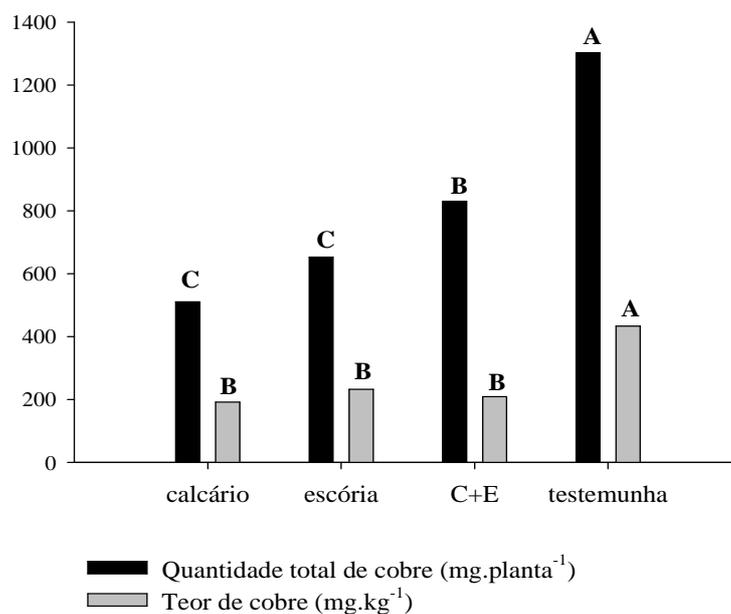


Figura 20. a: Teor de cobre na parte aérea de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo. ▲: inoculado, $y = 6,689851 + 0,018092x - 0,000041x^2$, $R^2 = 0,97$; △: não inoculado. **b:** Efeito dos tratamentos de corretivos no teor e quantidade acumulada de cobre da parte aérea de plantas de milho.

O teor de zinco na parte aérea das plantas de milho apresentou efeito das interações entre inoculação micorrízica (M) e doses de fósforo (F) e entre inoculação micorrízica (M) e os tratamentos de corretivos (C), além dos efeitos principais de todos os fatores estudados (Tabela 08). Como já definido anteriormente, a interação tripla neste caso não será

desdobrada. Já a quantidade acumulada de Zn na parte aérea apresentou efeito apenas da interação MxF e os efeitos principais de corretivos (C) e fósforo (Tabela 08). Os desdobramentos da interação MxF para teor e quantidade acumulada de Zn na parte aérea são apresentados na Figura 21. Tanto plantas inoculadas com FMAs quanto as não inoculadas apresentaram tendências de redução dos teores de Zn na parte aérea em função do aumento do P aplicado. Em plantas não inoculadas esta redução foi linear, enquanto que nas não inoculadas seguiu um ajuste quadrático. Tendência inversa foi observada na quantidade acumulada de Zn na parte aérea, a qual tendeu a aumentar em função do P aplicado tanto em plantas micorrizadas como naquelas não inoculadas. Isto sugere que embora o P aplicado diminua o teor de Zn na parte aérea, esta redução não foi suficiente para promover reduções no acúmulo, de forma que possivelmente não reflita em problemas nutricionais de deficiência de zinco.

Quanto à interação M x C, embora significativa a uma probabilidade de 4% para o teor de Zn (Tabela 8), não se observou diferença pelo teste de médias aplicado entre tratamentos micorrizados e não inoculados. Assim, apenas o efeito principal dos tratamentos de corretivos para teor de quantidade de Zn é apresentado na figura 22. Verifica-se que os tratamentos que receberam calcário apresentaram menor teor de quantidade de Zn do que aqueles que não receberam calcário. Isto sugere que o carbonato possa inibir mais a absorção de Zn do que o silicato, sendo este um aspecto que deve ser estudado e discutido mais profundamente para verificar a sua sustentação.

O teor de ferro na parte aérea das plantas de milho apresentou apenas efeitos principais dos fatores estudados. Já a quantidade acumulada de Fe na parte aérea apresentou interação entre inoculação micorrízica (M) e doses de fósforo (F) não apresentado efeito principal de fósforo (Tabela 08). Como definido anteriormente, a interação tripla neste caso não será desdobrada.

Os resultados observados para os efeitos principais no teor de Fe foram que as plantas micorrizadas apresentaram menor teor de Fe que as não inoculadas e que os corretivos calcário e escória puros, promoveram menor teor de Fe que sua mistura ou que o solo sem corretivos. A redução no teor de Fe na parte aérea de plantas micorrizadas em relação às não inoculadas não é difícil de ser observada, embora seja mais comum de ocorrer para o manganês. No caso do manganês acredita-se que seja um mecanismo da simbiose para regulação de seu excesso no solo, de forma que ele acumule nas raízes (SENA *et al.*, 2002). Solos ácidos como o deste estudo apresentam alta disponibilidade de Fe e Mn. Isto também sugere que os tratamentos de corretivos elevaram o pH, acima de 6,0 (Tabela 7,0) colaborem para diminuir a quantidade de Fe na parte aérea.

O efeito principal de fósforo para o teor de Fe, embora significativo, não apresentou ajuste nos modelos de equações estudadas. Os teores de Fe observados foram de 185, 190, 206, 141 e 166 mg kg⁻¹ para as doses de 0, 42, 95, 213 e 480 mg dm⁻³ de P aplicado. Isto sugere redução nos teores de Fe da parte aérea nas maiores doses de P aplicada.

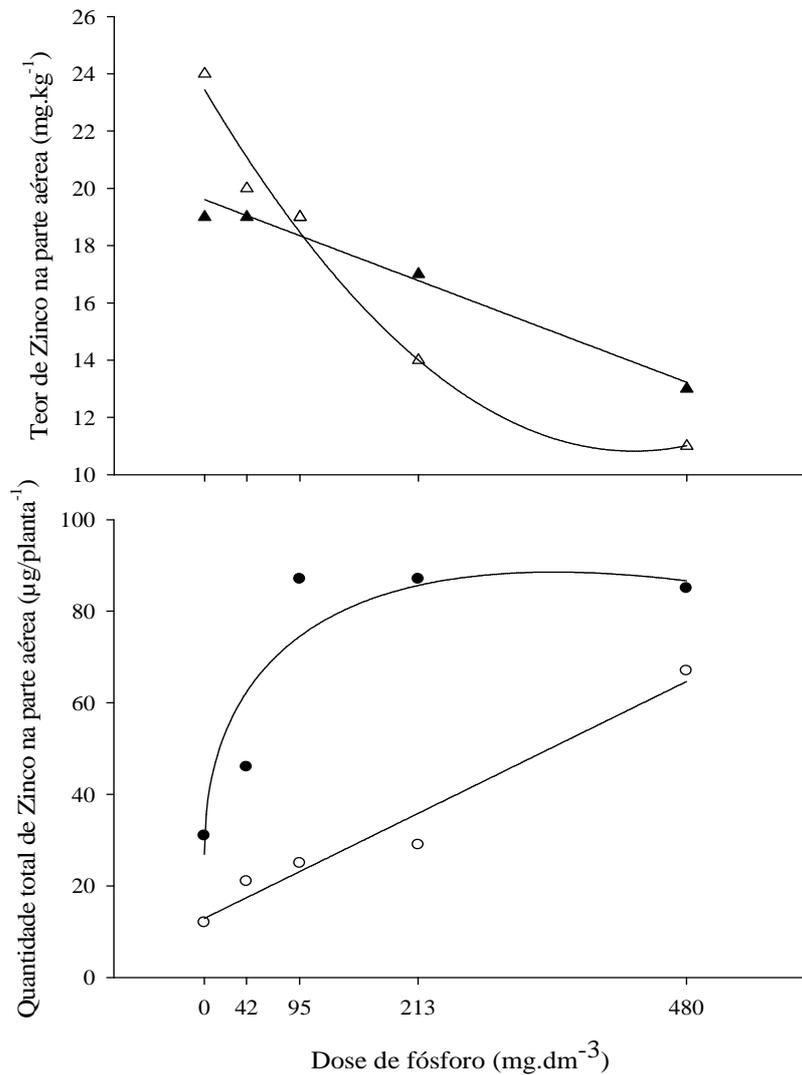


Figura 21. Teor e quantidade total de zinco na parte de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo. \blacktriangle : inoculado, $y = 19,538708 - 0,013003x$, $R^2 = 0,95$; \triangle : não inoculado, $y = 23,830272 - 0,062671x + 0,000073x^2$, $R^2 = 0,98$; \bullet : inoculado, $y = 26,912349 - 0,177183x + 6,611246x^{0,5}$, $R^2 = 0,85$; \circ : não inoculado, $y = 13,110757 + 0,107554x$, $R^2 = 0,96$. As equações nesta legenda são do magnésio, trocar para a do zinco.

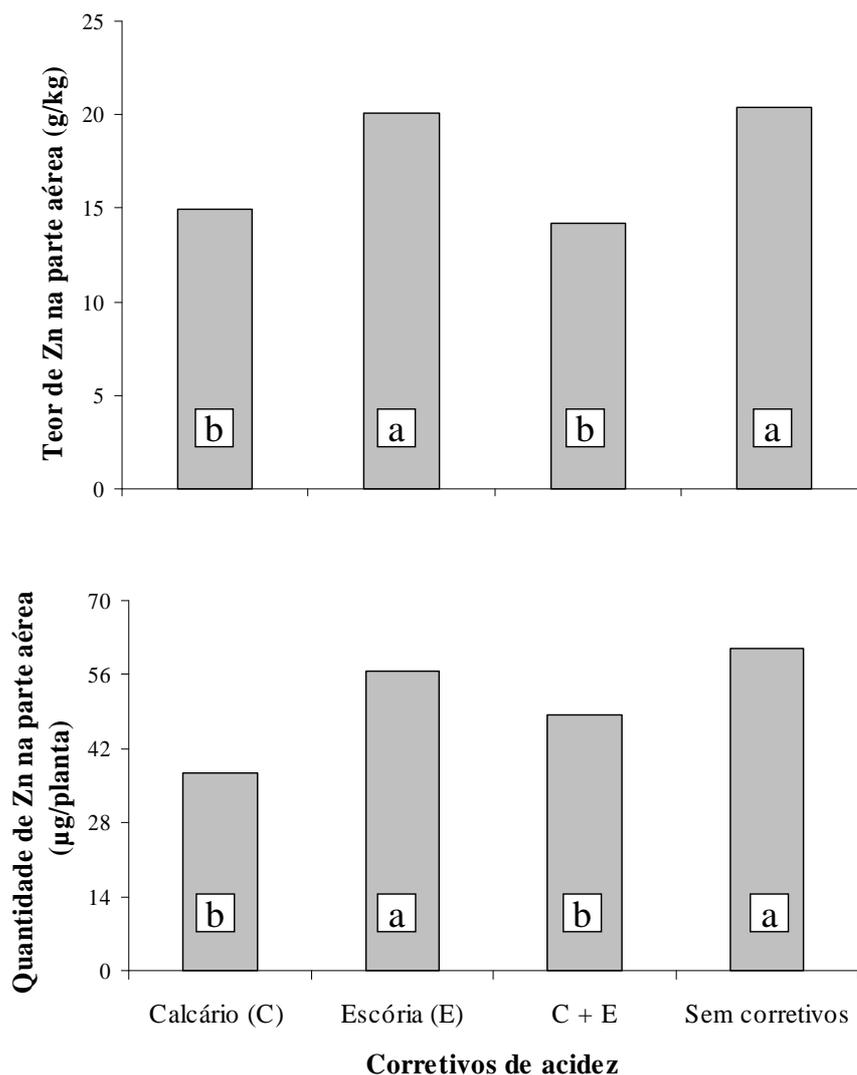


Figura 22. Teor e quantidade de zinco na parte aérea de milho cultivado sobre solo com diferentes tratamentos corretivos de acidez. Letras iguais dentro de cada barra indicam ausência de diferença entre as médias pelo teste de Scott Knott 5%.

Para quantidade de Fe, os resultados observados para os efeitos principais mostram que plantas micorrizadas apresentaram maior acúmulo que plantas não inoculadas, invertendo a tendência observada no teor. Os corretivos calcário e escória puros, promoveram menor acúmulo de Fe que sua mistura ou que o solo sem corretivos, corroborando o observado com o Teor de Fe. Para quantidade de Fe houve interação entre os tratamentos de inoculação micorrízica e corretivos do solo, a qual é desdobrada na figura 23. Observa-se maior acúmulo de Fe nas plantas inoculadas no tratamento corrigido somente com escória e no tratamento sem correção. O tratamento corrigido somente com calcário apresentou menor acúmulo de Fe, tanto em plantas micorrizadas, como nas não micorrizadas, indicando uma intrincada interação entre estes fatores na nutrição de micronutrientes.

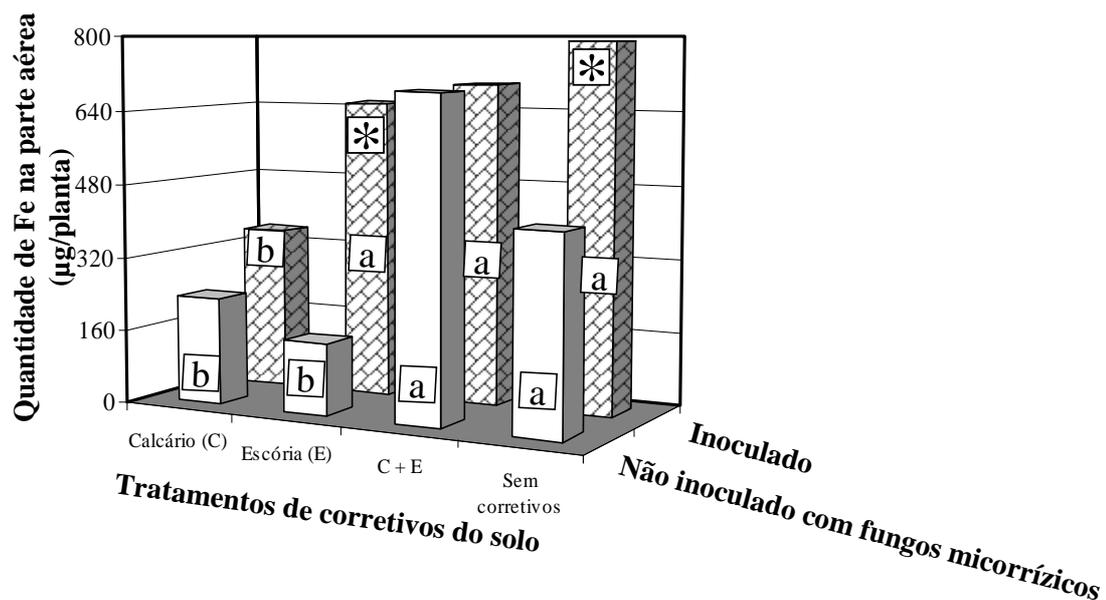


Figura 23. Quantidade de ferro na parte aérea de milho cultivado sobre solo com diferentes tratamentos corretivos de acidez, inoculado ou não com fungos micorrízicos arbusculares. Letras iguais dentro de cada série de barras indicam ausência de diferença entre os corretivos pelo teste de Scott Knott 5%. Asteriscos indicam superioridade do tratamento inoculado sobre o não inoculado pelo teste de Scott Knott 5%.

O teor de manganês na parte aérea das plantas de milho apresentou efeito das interações entre inoculação micorrízica (M) e doses de fósforo (F) e os efeitos principais dos fatores estudados (Tabela 08). Enquanto a quantidade acumulada de Mn na parte aérea apresentou efeito da interação MxF e entre os tratamentos de corretivos (C) e doses de fósforo (F), além dos efeitos principais (Tabela 08). Os desdobramentos da interação MxF para teor e quantidade acumulada de Mn na parte aérea são apresentados na Figura 24.

Tal como para o Fe, o teor e quantidade de Mn apresentaram tendências contrárias em função do P aplicado ao solo. O teor apresentou decréscimo com o aumento de P enquanto a quantidade, incremento. Teores de Mn na parte aérea são menores em plantas inoculadas com fungos micorrízicos. Este é um comportamento verificado com frequência em solos com alta disponibilidade de Mn, sendo atribuída a um efeito redutor do Mn na rizosfera de plantas micorrizadas entre outros intrincados efeitos que podem estar ocorrendo simultaneamente (SENA et al., 2002).

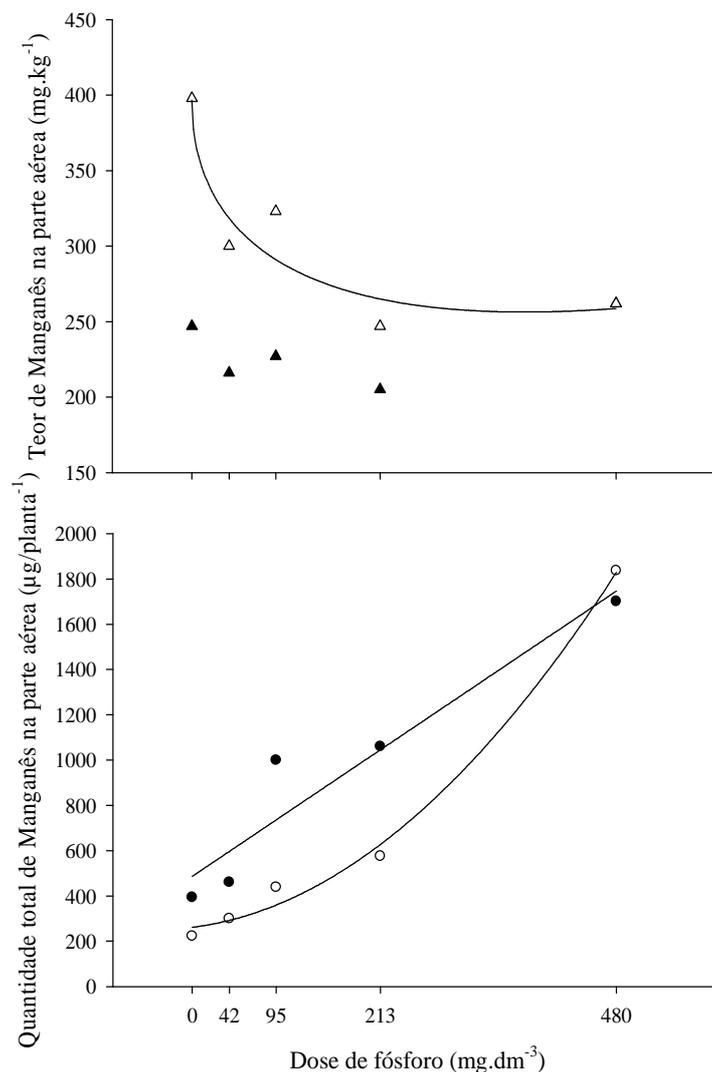


Figura 24. Teor e quantidade total de manganês na parte aérea de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo. ▲: inoculado, ajuste não significativo para o teste F; Δ: não inoculado, $y = 396,996974 + 0,375606x - 14,537354x^2$, $R^2 = 0,88$; ●: inoculado, $y = 486,30177 + 2,624378x$, $R^2 = 0,91$; ○: não inoculado, $y = 261,932107 + 0,481673x + 0,005797x^2$, $R^2 = 0,99$.

O desdobramento da interação entre corretivos e fósforo para a quantidade de manganês é apresentada na Tabela 18. Verifica-se que a quantidade de Mn na parte aérea é bastante superior no solo sem corretivos. Nas menores doses de P o teste estatístico indicou não significância deste efeito, mas as quantidades de Mn são o dobro no tratamento sem corretivo de solo. A partir da dose 95 mg dm^{-3} de P aplicado, este efeito passa a ser significativo. Isto mostra claramente o efeito da correção do solo para reduzir a disponibilidade de Mn. Em relação aos ajustes de regressão para as doses de fósforo neste desdobramento, não se obteve ajuste significativo da equação para as médias apresentadas na tabela 18.

Tabela 18. Quantidade de manganês na parte aérea de milho cultivado em solo com diferentes tratamentos de corretivos de acidez em diferentes doses de fósforo.

Corretivo	Doses de P aplicadas (mg dm ⁻³)				
	0	42	95	213	480
	----- μg.planta ⁻¹ -----				
Calcário (C)	107a	256a	399b	418b	1258b
Escória (E)	264a	276a	537b	702b	1540b
C+E	336a	332a	499b	992a	1810b
Sem corretivo	602a	695a	1399a	1176a	2466a

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5%.

O teor de alumínio na parte aérea das plantas de milho apresentou efeito das interações entre inoculação micorrízica (M) e os tratamentos de corretivos (C) e efeitos principais de todos os fatores estudados (Tabela 08). Entretanto ao desdobrar a interação MxC foi observado que o único efeito interativo foi uma redução no teor de Al das plantas micorrizadas dentro do tratamento corretivo da mistura de calcário + escória. Desta forma, optou-se por apresentar apenas os efeitos principais do teor de Al, cujos resultados corroboram bastante os verificados para os teores de Fe e Mn. Assim, verificou-se pelo teste de Scott Knott a 5% que os teores de Al foram menores em plantas micorrizadas do que nas não inoculadas, 133 e 219 mg kg⁻¹, respectivamente.

Verificou-se também, tal como no Fe e Mn, que os corretivos calcário e escória puros, promoveram menor teor de Al que a mistura de corretivos ou que o solo sem corretivos, sendo as médias destes tratamentos, respectivamente, 134, 158, 207 e 194 mg kg⁻¹. Em relação ao efeito principal de doses de P verificou-se que o teor de Al na parte aérea diminuiu linearmente com as doses de P, segundo a equação $y = 210,55 - 0,22x$; $R^2 = 0,70$, que foi altamente significativa pelo teste F.

A quantidade de Al na parte aérea, entre as variáveis de crescimento e nutrição, foi a única que apresentou interação tripla altamente significativa (< 0,01) (Tabela 08). O desdobramento desta interação tripla é apresentado na Tabela 19. Verifica-se nesta tabela que houve algumas combinações de tratamentos onde a inoculação promoveu menor acúmulo de Al na parte aérea, apesar do maior crescimento promovido pela micorrização. Isto indica a grande redução nos teores de Al na parte aérea destas plantas pela micorrização, refletindo mesmo na quantidade acumulada.

Com relação aos tratamentos de corretivos verifica-se que somente se distinguiram nas plantas não inoculadas nas doses 42 e 95 mg dm⁻³. Nesta situação as plantas cujo solo foi corrigido com a mistura calcário + escória apresentaram maior quantidade de Al que as dos demais tratamentos corretivos. Neste caso pode ser um reflexo do maior crescimento destas plantas, já que o efeito não foi geral entre todas as doses de P. O efeito das doses de P sobre a quantidade de Al foi pequeno e concentrado nas plantas não inoculadas, com característica de redução linear, sugerindo um efeito de diluição devido ao incremento no crescimento das plantas promovido pelas doses de P.

O teor de silício na parte aérea das plantas de milho apresentou efeito das interações entre inoculação micorrízica (M) e doses de fósforo (F) e efeitos principais dos fatores estudados (Tabela 08). O desdobramento da interação M x C é apresentado na Figura 25. Verifica-se que, de forma geral, as plantas micorrizadas apresentaram menor teor de Si que as não inoculadas. Um efeito semelhante ao observado com Fe, Mn e Al. Conforme aumentam as doses de P, o teor de Si é diminuído, tanto nas plantas micorrizadas, quanto nas não inoculadas.

Tabela 19. Quantidade de alumínio na parte aérea de milho inoculado ou não com fungos micorrízicos arbusculares, cultivado em solo com diferentes tratamentos de corretivos de acidez em diferentes doses de fósforo

Corretivo	Doses de P aplicadas (mg dm^{-3})				
	0	42	95	213	480
----- $\mu\text{g.planta}^{-1}$ -----					
Plantas inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares					
Calcário (C)	169a	89a	131a	101a	64a
Escória (E)	132a*	94a	133a	271a	160a
C+E	117a	86a*	70a*	151a	92a
Sem corretivo	172a*	152a	147a	141a	228a
Plantas não inoculadas com fungos micorrízicos arbusculares					
Calcário (C)	338a	207b	173b	85a	71a
Escória (E)	376a	121b	183b	70a*	39a
C+E	267a	457a	752a	152a	113a
Sem corretivo	382a	247b	284b	102a	125a

Médias de corretivos seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5%. * indica menor teor de Al pelo teste de Skott Knott 5% comparando plantas inoculadas e não inoculadas com fungos micorrízicos. Efeito de fósforo apenas significativo nas plantas não inoculadas para os Calcário (C) e Sem corretivo, apresentando efeito linear.

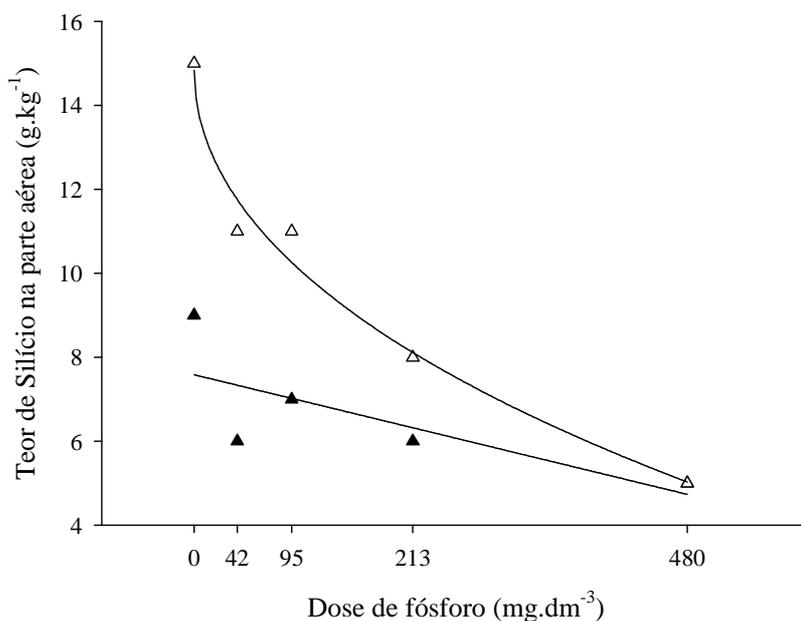


Figura 25. Teor de silício na parte aérea de milho inoculado ou não inoculado com fungos micorrízicos arbusculares em função das doses de P aplicadas ao solo. ▲: inoculado, $7,415313 - 0,006174x$, $R^2 = 0,56$; Δ: não inoculado, $y = 14,645246 + 0,002437x - 0,487457x^2$, $R^2 = 0,97$.

O efeito principal dos corretivos de solo sobre o teor de Si é acentuado, verifica-se que os tratamentos calcário (C), escória (E), C+E e Sem corretivos apresentaram, respectivamente, as seguintes médias em mg kg^{-1} seguidas das letras comparativas do teste de Scott Knott a 5%: 3,5 d; 10,0 b; 6,3 c; 12,3 a. Desta forma, o tratamento sem corretivos apresenta maior disponibilidade de Si que os tratamentos em que foram aplicados os silicatos da escória de

siderurgia, sugerindo que o efeito do pH ácido é muito importante no aumento da disponibilidade de Si para as plantas.

A quantidade de silício na parte aérea das plantas de milho apresentou apenas efeitos principais dos fatores estudados (Tabela 08). Verifica-se que as plantas micorrizadas apresentaram maior quantidade de Si que as não inoculadas devido ao seu maior crescimento, corroborando o observado com Fe e Mn. O efeito principal dos corretivos de solo sobre a quantidade de Si também foi acentuado. Verifica-se que os tratamentos calcário (C), escória (E), C+E e Sem corretivos apresentaram, respectivamente, as seguintes médias em $\mu\text{g planta}^{-1}$ seguidas das letras comparativas do teste de Scott Knott a 5%: 7,77 c; 19,86 b; 21,67 b e 36,06 a. Isto confirma a grande disponibilidade de Si no solo com pH mais ácido, do tratamento Sem corretivos. O efeito principal da dose de P apresenta um crescimento com ajuste quadrático da quantidade de Si em função do P aplicado, seguindo a equação $y = 11,454 + 1,081x - 0,0015x^2$; $R^2 = 0,89^*$.

4.6 Esporulação e Colonização de Fungos Micorrízicos

Não foi verificado esporulação na rizosfera e colonização micorrízica nas plantas não inoculadas. Desta forma o efeito dos tratamentos de inoculação não foi incluído na análise estatística da variância destas variáveis, avaliando-se apenas os efeitos dos tratamentos de doses de fósforo (F) e dos tratamentos de corretivos de acidez (C). Ambas as variáveis apresentaram interação F x C (Tabela 08).

O desdobramento da interação F x C para a esporulação na rizosfera é apresentada na Tabela 21 e Figura 26. Verifica-se que a esporulação foi maior no tratamento da mistura de calcário + escória e no tratamento sem corretivo na dose de 42 mg dm^{-3} . Não se observaram outras diferenças entre os tratamentos corretivos para a esporulação nas demais doses de P estudadas. Na Figura 26 verifica-se que há um grande incremento na esporulação dos FMAs com pequenas doses de P, havendo acentuada redução nas doses mais elevadas. Este efeito é mais acentuado nos tratamentos calcário + escória e no tratamento sem corretivo do que nos tratamentos corrigidos com calcário ou escória puros.

Tabela 20. Densidade de esporos de fungos micorrízicos na rizosfera de milho inoculado com mistura de *Glomus clarum* e *Gigaspora margarita* cultivado em solo com diferentes tratamentos de corretivos de acidez em diferentes doses de fósforo

Corretivo	Doses de P aplicadas (mg dm^{-3})				
	0	42	95	213	480
	----- n° em 50 mL de solo -----				
Calcário (C)	6,2a	32,6B	67,0A	34,4a	18,4A
Escória (E)	36,8a	34,6B	89,6A	56,4a	38,8A
C+E	48,6a	115,6A	36,6A	56,8a	8,2A
Sem corretivo	18,2a	105,8A	92,8A	22,0a	11,2A

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5%. C+E: mistura 1:1 de calcário e escória.

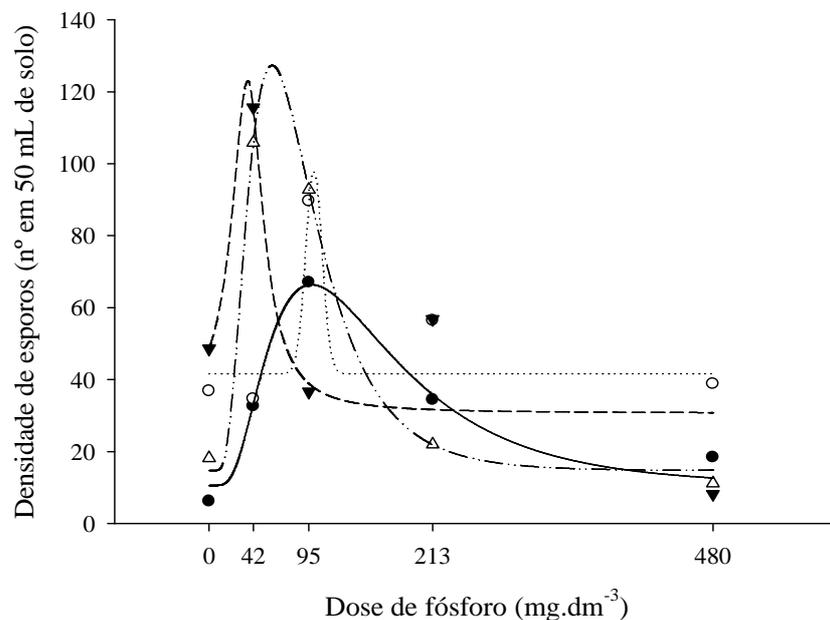


Figura 26. Densidade de esporos de fungos micorrízicos arbusculares na rizosfera de milho cultivado sobre solo com diferentes tratamentos corretivos em função das doses de P aplicadas ao solo. ●: calcário, $y = 0,054396 - 0,000076x + 0,0000001x^2$, $R^2 = 0,86$; ○: escória, $y = 0,046628 + 0,000064x$, $R^2 = 0,95$; ▼: calcário + escória: $y = 0,039379 + 0,000117x$, $R^2 = 0,97$; Δ: testemunha sem corretivo, $y = 0,044715 + 0,000064x$, $R^2 = 0,96$.

O desdobramento da interação F x C para a colonização micorrízica das raízes é apresentada na Tabela 20 e Figura 27. Verifica-se que a colonização foi maior nos tratamentos com corretivos, particularmente nos que receberam calcário nas doses de 42 e 95 mg dm⁻³ de P aplicado. Nas demais doses as diferenças entre os tratamentos corretivos para a colonização não foram significativas. Na Figura 27 verifica-se que nos tratamentos que receberam calcário há um grande incremento na colonização dos FMAs com pequenas doses de P, havendo acentuada redução nas doses mais elevadas. Nos tratamentos sem calcário ocorre decréscimo acentuado da colonização nas doses mais baixas com incremento nas doses intermediárias de P aplicado, seguido de novo decréscimo na dose mais elevada.

Tabela 21. Colonização micorrízica nas raízes de milho inoculado com mistura de *Glomus clarum* e *Gigaspora margarita* cultivado em solo com diferentes tratamentos de corretivos de acidez em diferentes doses de fósforo

Corretivo	Doses de P aplicadas (mg dm ⁻³)				
	0	42	95	213	480
	----- nº em 50 mL de solo -----				
Calcário (C)	33,0A	51,4A	50,4A	37,6a	19,6a
Escória (E)	58,0A	29,0b	39,6A	51,2a	32,8a
C+E	50,0A	60,6A	43,8A	37,2a	13,4a
Sem corretivo	45,6A	23,2b	24,0B	40,2a	10,8a

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5%. C+E: mistura 1:1 de calcário e escória.

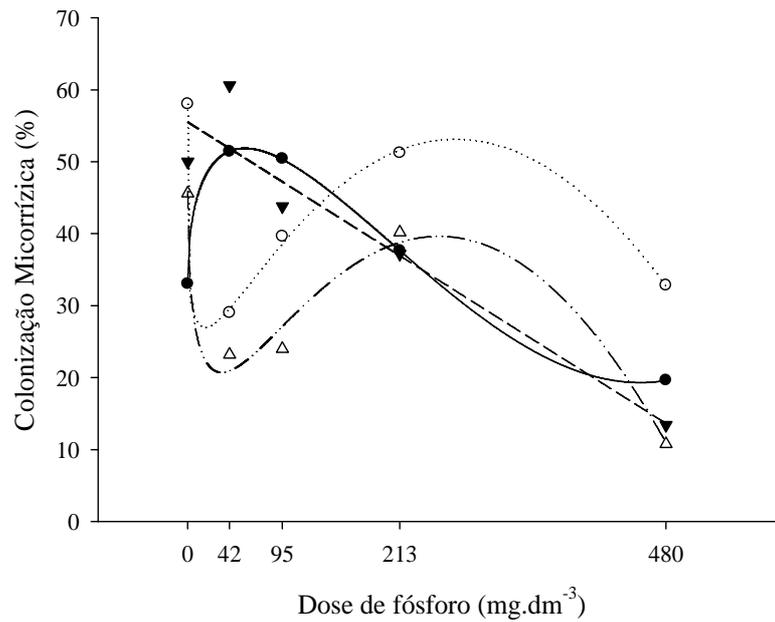


Figura 27. Colonização micorrízica das raízes de milho cultivado sobre solo com diferentes tratamentos corretivos em função das doses de P aplicadas ao solo. ●: calcário, $y = 0,054396 - 0,000076x + 0,0000001x^2$, $R^2 = 0,86$; ○: escória, $y = 0,046628 + 0,000064x$, $R^2 = 0,95$; ▼: calcário + escória: $y = 0,039379 + 0,000117x$, $R^2 = 0,97$; Δ: testemunha sem corretivo, $y = 0,044715 + 0,000064x$, $R^2 = 0,96$.

5 CONCLUSÕES

A simbiose micorrízica do milho com a mistura *G. margarita* e *G. clarum*, para o solo utilizado, apresentou-se a mais eficiente na faixa de P correspondente às doses de 42, 95 e 213 mg dm⁻³, o que representa 2,8; 6,8 e 22,0 mg dm⁻³ de fósforo disponível no solo extraível por Mehlich I.

O diâmetro do caule do milho é bastante sensível, sendo muito alterado pelas condições ambientais (como insolação) e pelos próprios tratamentos, sendo a primeira variável a mostrar benefício da inoculação micorrízica.

A variedade Eldorado estudada apresentou inibição do crescimento do diâmetro do caule pela inoculação de FMAs, com valores de P disponível (Mehlich I) em torno de 50 mg dm⁻³, o que sugere comparativamente um grau de dependência micorrízica menor que do o conhecido para o cafeeiro.

As plantas micorrizadas de milho apresentaram 86% da produção máxima de massa das raízes secas, com 31% da dose de P necessária para a produção máxima das plantas não inoculadas, indicando que a aplicação de doses de fósforo em um nível que maximize a eficiência da simbiose micorrízica é o mais econômico para a produção agrícola.

O benefício das micorrizas na nutrição fosfatada do milho foi detectado na quantidade de P em disco de folhas a partir de 60 dias do plantio e inoculação, enquanto os tratamentos de corretivos não alteraram sensivelmente a nutrição fosfatada do milho, não apresentando efeitos sobre o teor de P na parte aérea

A interação entre os diferentes corretivos e doses de fósforo afetou particularmente a nutrição de Ca e Mg das plantas e a relação Ca:Mg do solo.

As plantas com maior crescimento foram as cultivadas em solo com relação Ca:Mg entre 4:1 e 5:1, obtida pela mistura calcário+escória ou sem a aplicação de corretivos de acidez combinado com as maiores doses de P (213 e 480 mg dm⁻³)

Plantas inoculadas com fungos micorrízicos e fertilizadas com as maiores doses de fósforo no solo apresentaram bom crescimento em uma ampla faixa variação da relação Ca:Mg no solo (2:1 a 9:1).

O crescimento das plantas foi reduzido nos tratamentos com menores doses de P e ausência de inoculação de FMAs, com relação Ca:Mg no solo inferior a 4:1.

De forma geral, o aumento da dose de fósforo aplicado ao solo reduziu os teores de cobre, zinco, ferro e manganês e silício na parte aérea das plantas de milho. Ainda, em geral, as plantas micorrizadas apresentaram menor teor Fe, Mn, Al e Si que as não inoculadas.

O tratamento sem corretivos apresentou maior teor Si que os tratamentos em que foram aplicados os silicatos da escória de siderurgia, sugerindo que o efeito do pH ácido é muito importante no aumento da disponibilidade de Si para as plantas.

A colonização micorrízica foi mais elevada nas raízes dos tratamentos com corretivos, particularmente os que recebem calcário, variando a resposta ao P em função do corretivo.

A esporulação de FMAs na rizosfera foi pouco afetada pelos tratamentos com corretivos, sendo mais influenciada pelo teor de P no solo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCARDE, J. C. **Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas**. São Paulo: ANDA, 1992. 62p. (Boletim Técnico, 6).
- ALLEN, M. F. **The ecology of mycorrhizae**. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press, 1991. 184 p.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E. & OLIVEIRA, J.A. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. 32p. (Boletim informativo, 25).
- AMIJEE, F.; TINKER, P.B.; STRIBLEY, D.P. The development of endomycorrhizal root systems VII. A detailed study of effects of soil phosphorus on colonization. *The New Phytologist*, Oxford, v.111, n.3, p.435-446, Mar. 1989.
- AUGÉ, R. M.; STODOLA, A. J. W.; TIMS, J. E.; SAXTON, A. M. Moisture retention properties of a mycorrhizal soil. **Plant Soil**, v. 230, p. 87-97, 2001.
- AZCÓN-AGUILLAR C. & BAREA J.M. Applying mycorrhiza biotechnology to horticulture: significance and potentials. **Scientia Horticulturae**, v. 68, p. 1-24, 1997.
- AZIZ, T. & HABTE, M. Determining vesicular-arbuscular mycorrhizal effectiveness by monitoring P status of leaf disks. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 33, p. 1097-1101, 1987.
- BAGO, B.; PFEFFER, P. E.; SHACHAR-HILL, Y. Carbon metabolism and transport in arbuscular mycorrhizas. **Plant Physiology**, v. 124, p. 949-958, 2000.
- BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N.K. Nutrient use efficiency in acid soils: nutrient management and plant use efficiency. In: MONIZ, A.C.; FURLANI, A.M.C.; SCHAFFERT, R.E.; FAGERIA, N.K.; ROSOLEM, C.A.; CANTARELA, H. (Ed.).INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLANT-SOIL INTERACTIONS AT LOW pH, 4., 1996, Belo Horizonte. **Proceedings**, Belo Horizonte: Brazilian Soil Science Society, 1997. p.76-95.
- BELTRÁN, R. R.; SILVEIRA, R. I.; PASSOS, M. J. Disponibilidade de fósforo para plantas de arroz avaliada por extratores químicos. **Scientia Agricola**, v. 55, n. 2, p. 1998.
- BERBARA, R. L. L.; SOUZA, F. A.; FONSECA, H. M. A. Fungos micorrízicos arbusculares: muito além da nutrição. In: M. S. FERNANDES (Org.). **Nutrição Mineral de Plantas**. 1ª ed. Viçosa: SBCS. 2006.
- BLEVINS, D. G. Porque as plantas precisam de fósforo? **Informações Agronômicas**, n.º 87, International Plant Nutrition Institute. Instituto da Potassa e do Fosfato, Set.,1999, p. 4-5.
- BOLAN, N.S. A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 134, n. 2, p. 189-207, 1991.
- BOROWICZ, V. A. Do arbuscular mycorrhizal fungi alter plant-pathogen relations? **Ecology**, v. 82, p. 3057-3068, 2001.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 35, de 04 de julho de 2006. n.p.
- BRESSAM, W. & VASCONCELLOS, C. A. Alterações morfológicas no sistema radicular do milho induzidas por fungos micorrízicos e fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37,

n.4, p. 509-17, 2002.

BROWN, M. S. & BETHLENFALVAY, G. J. Glycine-glomus-rhizobium symbiosis. VI. photosynthesis in nodulated, mycorrhizal, or N-and P-fertilized soybean Plants. **Plant Physiology**. v. 85, p.120-123, 1987.

CANTARUTTI, R.B., BARROS, N. F. PRIETO, H. E. & NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R.V., ALVAREZ V., V. H., BARROS, N. F., FONTES, R. L. F., CANTARUTTI, R. B. & NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. 1ª Ed. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 769-850.

CARNEIRO, M. A. C.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; CARVALHO, D.; BOTELHO, S. A.; SAGGIN-JUNIOR, O. J. Micorriza arbuscular em espécies arbóreas e arbustivas nativas de ocorrência no sudeste do Brasil. **CERNE**, v.4, n.1, p.129-145, 1998.

CARVALHO-PUPATTO, J. G.; BULL, L. T.; CRUSCIOL, C. A.; MAUAD, M.; SILVA, R. H. Efeito da escória de alto forno no crescimento radicular e na produtividade de arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 11, p. 938-943, 2003.

CHU, E. Y. **Sistema de produção da pimenteira-do-reino**. Sistemas de Produção 01. Disponível em [<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br>] Acesso em: 26 de Agosto de 2003. EMBRAPA - Amazônia Oriental. Belém, Dez., 2005

CORRÊA J. C.; BÜLL, L. .; CRUSCIOL, C. A. C.; FERNANDES, D. M. & PERES, M. G. de M. Aplicação superficial de diferentes fontes de corretivos no crescimento radicular e produtividade da aveia preta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32. p.1583-1590, 2008

CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, v.64, p.197-214, 1995.

CURI, N.; CAMARGO, O. A.; GUEDES, A & SILVEIRA, J. V. Sorção de fósforo em materiais de latossolos do Brasil sudeste e sul. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA, 3, 1988, Rio de Janeiro. **Anais...** [Impresso]. Rio de Janeiro: SNLCS/SBCS, 1988.

DOS SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.2, p.576-586, 2008.

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**, 2ªEd. Ministério da Agricultura e Abastecimento, Rio de Janeiro:1997. 212 p.

FALCÃO, N. P. S & SILVA, J. R. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazônica**, Manaus .v. 34, n. 3, p. 337 – 342, 2004.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 182 p.

FARDEAU, J.C. Dynamics of phosphate in soils. An isotopic Outlook. **Fert. Res.**, v. 45, p. 91-100, 1996.

FERREIRA, M. M. & DIAS JÚNIOR, M. S. **Física do Solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 117p.

FIORI, M. P. **Comportamento de cultivares de tomateiro quanto à utilização de escórias siderúrgicas em ambiente protegido**. 2006. 54p. Tese (Mestrado) Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Marília, Marília.

- GADKAR, V.; DAVID-SCHWARTZ, R.; KUNIK, T.; KAPULNIK, Y. Arbuscular mycorrhizal fungal colonization. Factors involved in host recognition. **Plant Physiology**, v. 127, p. 1493-1499, 2001.
- GERDEMANN, J. W. & NICOLSON, T. H. Spores of mycorrhizal endogene species extracted from soil by wet sieving and decting. **Transactions of British Micological Society**, Cambridge, v. 46, n. 2, p. 235-244, 1963.
- GOEDERT, W.J.; LOBATO, E.; LOURENÇO, S. Nutrient use efficiency in Brazilian acid soils: Nutrient management and plant efficiency. In: MONIZ, A.C.; FULANI, A.M.C.; SCHAFFERT, R.E.; FAGERIA, N.K.; ROSOLEM, C.A.; CANTARELLA; H. **Plant-soil interactions at low pH: Sustainable agriculture and forestry production**. Brasília: SBCS, 1997. p.97-104.
- GONÇALVES, J. L. M. **Cinética de transformação de fósforo lábil em não lábil em amostras de solos de cerrado**. 1988. 62f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- GRACE, C. & STRIBLEY, D.P. A safes procedure for routine straining of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. **Micological Research**, v. 95, n. 10, p. 1160-1162, 1991.
- GUARÇONI, A. M. & MENDONÇA, E. S. Capacidade tampão de ph do solo e disponibilidade de fósforo pela adição de composto orgânico. **Magistra**. Cruz das Almas. v. 15, n. 2. Jul./Dez, 2003.
- HWANG, S. F.; CHANG, K. F.; CHAKARAVATY, P. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on the development of *Verticillium* and *Fusarium* wilts of alfalfa. **Plant Disease**, v. 76, p. 239-243, 1992.
- JANOS, D. P. Mycorrhiza applications in tropical forestry: are temperate-zone approaches appropriate? In: NG, F.S.P. **Trees and mycorrhiza**. Kuala Lumpur: Forest Research Institute, 1988. p.133-188.
- JANOS, D. Plant responsiveness to mycorrhizas differs from dependence upon mycorrhizas. **Mycorrhiza**, v. 17, n. 2, p. 75-91, 2007.
- JARREL, W. N.; BEVERLEY, R. B. The dilution effect in plant nutrition studies. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 34, p. 197-224, 1981.
- JENKINS, W. R. A rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. **Plant Disease Report**, Beltsville, v. 48, p. 692, 1964.
- JOHNSON, D.; LEAKE, J. R.; OSTLE, N.; INESON, P.; READ, D. J. In situ ¹³CO₂ pulse-labelling of upland grassland demonstrates a rapid pathway of carbon flux from arbuscular mycorrhizal mycelia to the soil. **New Phytologist**, v. 153, p. 327-334, 2002.
- KELTJENS, W. G. Magnesium uptake by Al-stressed maize plants with special emphasis on cation interactions at root exchange sites. **Plant and Soil**, v. 171, p. 141-146, 1995.
- KOIDE, R. T.; SCHREINER, R. P. Regulation of vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 43, p. 557-581, 1992.
- KOIDE, R.T. Nutrient supply, nutrient demand and plant response to mycorrhizal infection. **The New Phytologist**, Oxford, v. 117, n. 3, p. 365-86, 1991.
- KORNDÖRFER, G. H.; COELHO, N. M.; SNYDER, G. H. & MIZUTANI, C. T. Avaliação de métodos de extração de silício para solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista**

Brasileira de Ciência do Solo, v. 23, p.101-106, 1999.

KOSKE, R. E. & GEMMA, J. N. A modified procedure for straining roots to detect VA mycorrhizas **Mycological Research**, Cambridge, v. 92, n. 4, p. 486-488, 1989.

LIMA FILHO, O. F. & SILVA, W. M. Modificação de Características Químicas de Três Solos de Mato Grosso do Sul Incubados com Escória de Aciaria. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31, 2007, Gramado - RS. **Anais...** [CDROM]. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

LOPES, A. S.; SILVA, C. A. P. & BASTOS, A. R. R. Reservas de Fosfatos e produção de fertilizantes fosfatados no Brasil e no mundo. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003. São Pedro – SP. 726p. **Anais...** Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2004.

LOPES, A.S. Reservas de fosfatados e produção de fertilizantes fosfatados no Brasil e no mundo. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: POTAFOS/ANDA, 2003.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafos, 1989. 201p.

MARTINS C. R.; MIRANDA, J. C. C. de & MIRANDA, L. N. Contribuição de fungos micorrízicos arbusculares nativos no estabelecimento de *Aristida setifolia* kunth em áreas degradadas do cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 4, p. 665-674, 1999.

MATICHENKOV, V. V. & BOCHARNIKOVA, E. A. The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G. H. & KORNDÖRFER, G. H. (Eds.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam, Elsevier, p.133-147, 2001.

McGONIGLE, T. P. On the use of non-linear regression with the logistic equation for changes with time of percentage root length colonized by arbuscular mycorrhizal fungi. **Mycorrhiza**, v. 10, p.249–254, 2001

McGONIGLE, T. P.; MILLER, M. H.; EVANS, D. G.; FAIRCHILD, G. L.; SWAN, J. A. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. **The New Phytologist**, v. 115, n. 3, p. 495-501, 1990.

MELLONI, R.; SILVA, F. A. M.; MOREIRA, F. M. S.; FURTINI NETO, A. E. Pó de forno de aciaria elétrica na microbiota do solo e no crescimento da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 12, p. 1547-1554, 2001.

MENDONÇA, M. M. & OLIVEIRA, V. L. Micorrizas no Brasil: estado atual das pesquisas e prioridades. In: ALVAREZ V., V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. (Org.). **O Solo nos Grandes Domínios Morfoclimáticos do Brasil e o Desenvolvimento Sustentado**. Viçosa: SBCS/FUFV, 1996, p. 525-549.

MEURER, E. J. (Ed.) **Fundamentos de química do solo**. 3ª Ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006. 285p.

MIRANDA, J.C.C.; MIRANDA, L.N. Micorriza Arbuscular. In: VARGAS, M. A.; HUNGRIA, M., (Eds.). **Biologia dos solos dos Cerrados**. Brasília: Embrapa-CPAC, 1997. p.69-123.

MOREIRA, F. L. M.; MOTA, F. O. B.; CLEMENTE C. A.; AZEVEDO B. M. & BOMFIM, G. V. Adsorção de fósforo em solos do Estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 37, n. 1, p.7-12, 2006.

- MOREIRA, F. M. S. & SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras, UFLA, 2002. 625p.
- MURPHY, J. & RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v. 27, p. 31-36, 1962.
- NEWSHAM, K. K.; FITTER, A. H.; WATKINSON, A. R. Multifunctionality and biodiversity in arbuscular mycorrhizae. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 10, n.10, p. 407-411, 1995.
- NOLLA, A. & ANGUINONI, I. Métodos utilizados para a correção da acidez do solo no Brasil. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v.6, n.1, p. 97-111, 2004.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, UFV, DPS, 1999. 399 p.
- NOWAKOWSKI, W.; NOWAKOWSKA, J. Silicon and copper interaction in the growth of spring wheat seedlings. **Biologia Plantarum**, v. 39, n. 3, p. 463-466, 1997.
- OLIVEIRA, A. C. de. & BISCARO, G. A. Fósforo (P) **Jornal Agrícola - Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul**, Pró-Reitoria de Extensão, Cultura e Assuntos Comunitários, Unidade Universitária de Cassilândia. Disponível online [<http://jornalagricola.wordpress.com>] Julho, 2007.
- OLSSON, P. A.; THINGSTRUP, I.; JAKOBSEN, I; BÅÅTH, E. Estimation of the biomass of arbuscular mycorrhizal fungi in a linseed field. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 31, p. 1879-1887, 1999.
- OLSSON, P. A.; VAN AARLE, I. M.; ALLAWAY, W. G.; ASHFORD, A. E.; ROUHIER, H. Phosphorus Effects on Metabolic Processes in Monoxenic Arbuscular Mycorrhiza Cultures. **Plant Physiology**, v. 130, n. 3, p. 1162-1171, 2002.
- PARNISKE, M. Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. **Nature Reviews Microbiology**, v.6, p.763-775, 2008.
- PAUL, E. A. & CLARK, F. E. **Soil Microbiology and Biochemistry**. San Diego, Academic Press. 1989. 276 p.
- PEREIRA, J. E. **Solubilidade de alguns calcários e escórias de alto forno**. 1978. Tese (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 84p.
- PIAU, W. C. **Viabilidade do uso das escórias como corretivo e fertilizante**. 1991. 99p. Tese (Mestrado). Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba. 1991.
- PIROZYNSKI, K. A.; MALLOCH, D. W. The origin of land plants: a matter of mycotrophism. **Biosystems**, p.153-164, 1975.
- PRADO, R. M. Qualidades tecnológicas da cana-planta e da cana-soca em função da aplicação da escória de siderurgia e do calcário. **Scientia Agraria**, v. 2. 2001.
- PRADO, R. M.; CORRÊA, M. C. M.; CINTRA, A. C. O. ; NATALE, W. & SILVA, M. A. C. Liberação de micronutrientes de uma escória aplicada em um Argissolo Vermelho - Amarelo cultivado com mudas de goiabeira (*Psidium guajava* L.). **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal. v. 24, n. 2, p. 536-542, Ago, 2002.
- PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo da acidez do solo na soqueira da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 287-296, 2003.
- PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez

do solo cultivado com cana-de-açúcar em vasos. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 4, p. 739-744, 2000.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; COUTINHO, E. L. M.; ROQUE, C. G.; VILLAR, M. L. P. Avaliação da escória de siderurgia e de calcários como corretivos da acidez do solo no cultivo da alface. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 4, p. 539-546, 2002.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2000, 111p.

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

RAIJ, B. V. Fósforo no solo e interação com outros elementos. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003. São Pedro – SP. 726p. **Anais...** Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2004.

RAIJ, B. V.; ROSAND, P. C. & LOBATO, E. Adubação fosfatada no Brasil – Apreciação geral, conclusões e recomendações. In: OLIVEIRA, A. J. (Ed.) **Adubação fosfatada no Brasil**. Brasília: EMBRAPA – DID, 1982. p. 9-28.

RAMOS, A. C. **Efeito da colonização micorrízica sobre a atividade de H⁺-ATPases de membrana plasmática de raízes de milho (*Zea mays* L.)**. 2001. Tese (Mestrado). Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goitacazes, 62p.

RAMOS, L. A.; KORNDÖRFER, A. N.; PEREIRA, G. H.; SERON, H. & CAMARGO, M. S. de. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas e lixiviação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 30 p. 849-857, 2006.

RAY, J.D.; SINCLAIR, T.R. The effect of pot size on growth and transpiration of maize and soybean during water deficit stress. **Journal of Experimental Botany**, v. 49, n. 325, p. 1381–1386, August 1998.

READ, D.J.; KOUCHECKI, H.K.; HODGSON, J. VA mycorrhiza in natural vegetation systems. I. The occurrence of infection. **New Phytologist**, v.77, p. 641-653, 1976.

REDECKER, D.; KODNER, R.; GRAHAM, L. E. Glomalean fungi from the Ordovician. **Science**, v. 289, p. 1920–1921, 2000.

RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E. ; ALVES, M. C. V.; MUNIZ, J. A.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KIMPARA, D. I.; SANTOS J. Z. L. & CARNEIRO L. F. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p.453-466, 2006.

ROCHA, F. S.; SAGGIN JÚNIOR, O. J.; SILVA, E. M. R.; LIMA, W. L. Dependência e resposta de mudas de cedro a fungos micorrízicos arbusculares. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.1, p.77-84, 2006.

SÁ, J. C . de M . **Manejo da fertilidade do solo no plantio direto**. Castro: Fundação ABC, 1993, 96p.

SAGGIN JUNIOR, O. J. & SILVA, E. M. R. Micorriza Arbuscular - Papel, funcionamento e aplicação da simbiose. In: AQUINO, A. M. & ASSIS, R. L. (Org.). **Processos Biológicos no Sistema Solo-Planta: Ferramentas para uma agricultura sustentável**. 1ª ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005, v. 1, p. 101-149.

SAGGIN JÚNIOR, O. J. & SIQUEIRA, J. O. Micorrizas arbusculares em cafeeiro. In: SIQUEIRA, J. O. (Ed.) **Avanços em fundamentos e aplicação de micorrizas**. Lavras: UFLA, 1996. p. 203-254.

- SAGGIN JÚNIOR, O.J. & SIQUEIRA, J.O. Avaliação da eficiência simbiótica de fungos endomicorrízicos para o cafeeiro. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 2, p.221-228, 1995.
- SAMBATTI, J. A.; COSTA, A. C. S. da; MUNIZ, A. S. & SENGIK, E. **Adsorção de fósforo por sesquióxidos de ferro sintéticos**. UEM/Centro de Ciências Agrárias. Maringá. Disponível em [<http://www.cca.uem.br/anu9900.htm> - centro de ciências agrárias] Acesso em 12 de Agosto de 2007.
- SANTOS, J. C. P.; KAMINSKI J., ERNANI, P. R. & MAFRA, A. L. Rendimento de massa seca e absorção de fósforo pelo milho afetado pela inoculação de fósforo, calcário e inoculação com fungos micorrízicos. **Ciência Rural**, v. 26, n. 1, 1996.
- SAUR, E. Interactive effects of P-Cu fertilizers on growth and mineral nutrition of maritime pine. **New Forests**, v. 7, n. 2, p. 93-105, 1993.
- SCHACHTMAN, D. P.; REID, R. J.; AYLING, S. M. Phosphorus uptake by plants: From soil to cell. **Plant Physiology**, v. 116, p. 447-453, 1998.
- SENA, J. O. A. de; LABATE, C. A.; CARDOSO, E. J. B. N. Micronutrient accumulation in mycorrhizal citrus under different phosphorus regimes. **Acta Scientiarum**, v. 24, n. 5, p. 1265-1268, 2002.
- SIDDIQUI, Z. A.; AKHTAR, M. S.; FUTAI, K. (Eds). **Mycorrhizae: Sustainable Agriculture and Forestry**. Dordrecht, Springer, The Netherlands, 2008, 362p.
- SIQUEIRA, J. O. & MOREIRA, F. M. S. **Biologia e Bioquímica do Solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2002. 291p.
- SIQUEIRA, J. O.; ANDRADE, A. T. & FAQUIN, V. O papel dos microrganismos na disponibilização e aquisição de fósforo pelas plantas. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003. São Pedro – SP. 726p. **Anais...** Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2004.
- SIQUEIRA, J. O.; COLOZZI-FILHO, A.; OLIVEIRA, E. Ocorrência de micorrizas vesicular-arbusculares em agro e ecossistemas do Estado de Minas Gerais. Pesquisa **Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 24, n. 12, p.1499-1506, 1989.
- SIQUEIRA, J.O. Fisiologia e bioquímica de micorrizas vesículo-arbusculares: alguns aspectos da relação fungo-planta e absorção de fósforo. In: REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 4., 1991, Mendes. **Anais...** Mendes: CNPDS/UFRRJ, 1991. p.105-131.
- SIQUEIRA, J.O.; COLOZZI-FILHO, A. Micorrizas vesículo-arbusculares em mudas de cafeeiro II. Efeito do fósforo no estabelecimento e funcionamento da simbiose. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 10, n. 3, p.207-211, 1986.
- SIQUEIRA, J.O.; FRANCO, A.A. **Biotechnology do solo: Fundamentos e Perspectivas**. Lavras: MEC/ABEAS, 1988. 236 p.
- SIQUEIRA, J.O.; SAGGIN JÚNIOR, O.J. Dependency on arbuscular mycorrhizal fungi and responsiveness of some Brazilian native woody species. **Mycorrhiza**, Heidelberg, v.11, p.245-255, 2001.
- SMITH, S. E. & READ, D. J. **Mycorrhizal symbiosis**. 2ª ed. San Diego: Academic Press, 1997. 605p.
- SMITH, S. E. & SMITH, F.A. Structure and function of the interfaces in biotrophic symbioses as they relate to nutrients transport. **New Phytologist**, v. 114, p. 1-38, 1990.

- SOLAIMAN, M. Z. & SAITO M. Use of sugars by intraradical hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi revealed by radiorespirometry. **New Phytologist**, v. 136, p. 533–538, 1997.
- SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; BANYS, V. L. Biomass and nitrogen accumulation in cover crops species used in Brazilian Cerrado. **Acta Scientiarum**, v. 30, n. 4, p. 525-531, 2008.
- SPARLING, G. P. & TINKER, P. B. Mycorrhizal infection in Pennine grassland. I - Levels of infection in the field. **Journal of Applied Ecology**, v. 15, n. 3, p. 943–950, 1978
- SYLVIA, D. M. & JARSTFER, A. G. The production and introduction of arbuscular mycorrhizal fungi in the native plant nursery. **Florida Agricultural Experiment Station**, Florida, 1992.
- VELOSO, C. A. C.; BORGES, A. L.; MUNIZ, A. S.; VIEGAS, I. J. M. Efeito de diferentes materiais no pH do solo. **Scientia Agricola**, v. 49, n. 1, p. 123-128, 1992.
- WALKER, T.W. & SYERS, J.K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, v.15, p.01-19, 1976.
- WIETHÖLTER, S. **Calagem no Brasil**. Passo Fundo: EMBRAPA Trigo, 2000, 104p.
- WIETHÖLTER, S. Revisão das recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. IN: REUNIÃO SUL BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO 4, **Resumos**. CD-ROM, UFRGS, Porto Alegre, 2002.
- WINCKLER CALDEIRA, M. V.; SILVA, E. M.; FRANCO, A. A.; ZANON, M. L. B. Crescimento de leguminosas arbóreas em resposta a inoculação com fungos micorrízicos arbusculares. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 1-10, 1997.
- XU, M. G.; ZHANG, Y. P.; ZHANG, J. C.; SUN, B. H. Mechanisms for the movement of Ca, Mg, P and K to plant roots growing in two soils. **Scientia Agricultura Sinica**, v. 29, n. 5, p. 76-82, 1996.