

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS  
PÓS GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA COMPARADA

HELOISA DE CESARO KRZYZANSKI

RELAÇÃO ENTRE PRODUÇÃO DE RAÍZES E COLONIZAÇÃO MICORRÍZICA DE  
GRAMÍNEAS DE CRESCIMENTO ESPONTÂNEO E ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO  
EM ÁREA URBANA

MARINGÁ

2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA COMPARADA

HELOISA DE CESARO KRZYZANSKI

**RELAÇÃO ENTRE PRODUÇÃO DE RAÍZES E COLONIZAÇÃO MICORRÍZICA  
DE GRAMÍNEAS DE CRESCIMENTO ESPONTÂNEO E ATRIBUTOS FÍSICOS DO  
SOLO EM ÁREA URBANA**

Maringá

2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA COMPARADA

HELOISA DE CESARO KRZYZANSKI

**RELAÇÃO ENTRE PRODUÇÃO DE RAÍZES E COLONIZAÇÃO MICORRÍZICA  
DE GRAMÍNEAS DE CRESCIMENTO ESPONTÂNEO E ATRIBUTOS FÍSICOS DO  
SOLO EM ÁREA URBANA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Comparada do Centro de Ciências Biológicas da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Biologia das Interações Orgânicas.

Orientadora: Dra. Rosilaine Carrenho  
Co-orientador: Dr. Marcelo Alessandro  
Araujo

Maringá  
2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)

K94r Krzyzanski, Heloisa de Cesaro  
Relação entre produção de raízes e colonização micorrízica de gramíneas de crescimento espontâneo e atributos físicos do solo em área urbana / Heloisa de Cesaro Krzyzanski. -- Maringá, 2016.  
40 f. : il., figs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Rosilaine Carrenho.  
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Alessandro Araujo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Biológicas, Programa de Pós-Graduação em Biologia Comparada, 2016.

1. Solo - atributos físicos. 2. Solo - Densidade. 3. Solo - Porosidade. 4. Raízes - Traços morfológicos. 5. Gramíneas - Colonização micorrízica. 6. Glomeromycota. I. Carrenho, Rosilaine, orient. II. Araujo, Marcelo Alessandro, coorient. Universidade Estadual de Maringá. III. Título.

CDD 21.ed.631.43

ECSL

# FOLHA DE APROVAÇÃO

HELOISA DE CESARO KRZYZANSKI

Relação entre produção de raízes e colonização micorrízica de gramíneas de crescimento espontâneo e atributos físicos do solo em área urbana

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Comparada do Centro de Ciências Biológicas da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Biologia das Interações Orgânicas pela Comissão Julgadora composta pelos membros:

## COMISSÃO JULGADORA

Profa. Dra. Rosilaine Carrenho (Presidente)  
Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Arnaldo Colozzi Filho  
Instituto Agrônômico do Paraná

Prof. Dr. Marcelo Augusto Batista  
Universidade Estadual de Maringá

Aprovada em: 24 de fevereiro de 2016.

Local de defesa: Sala 09, Bloco G80, *campus* da Universidade Estadual de Maringá.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço,

A Deus pelo dom da vida, da sabedoria e por sempre me guiar pelos melhores caminhos.

Aos meus pais Claudete e Clóvis pelo carinho, compreensão, incentivo e apoio em todos os momentos da minha vida, e por serem meus exemplos de coragem e persistência.

Aos meus irmãos Rafael e Fabrício pelo carinho, amizade e incentivo.

Ao meu namorado Rafael Vicente por sempre estar ao meu lado no decorrer desse trabalho e por sua capacidade de me trazer paz na correria do dia-a-dia.

A Professora Rosilaine Carrenho, pela orientação, dedicação e compreensão em todos os momentos, ajudando a me tornar uma pessoa melhor.

Ao Professor Marcelo Araujo, pela orientação, ensinamentos e árduas coletas de solo.

Aos alunos do Laboratório de Sistemática de Fungos do qual faço parte, em especial Ana Paula, Luana e Priscila, que sempre acompanharam e ajudaram no desenvolvimento do trabalho, principalmente com boas risadas.

A Josy, Karla e Regiane, estudantes que passaram pelo Laboratório de Micorrizas, e que sempre se dispuseram a me ajudar de alguma forma.

Ao servidor da UEM, Nelson Kokubo Tadashi, por estar sempre disposto a me ajudar, durante todo o desenvolvimento do trabalho.

A todos os meus amigos que de alguma forma, direta ou indiretamente, me apoiaram no decorrer desse trabalho, em especial, Mariane, Márian e Thaís.

A Universidade Estadual de Maringá e ao Curso de Pós-Graduação em Biologia Comparada, por realizarem um excelente trabalho para a sociedade, contribuindo para a formação de mestres e doutores.

A Capes, pela concessão da bolsa de estudos, que de maneira direta possibilitou minha completa dedicação à execução deste trabalho e à minha formação profissional.

Enfim, a todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho, minha eterna gratidão!

*Dedico,*

Aos meus pais Claudete e Clóvis.

“Deus não escolhe os capacitados, capacita os escolhidos.”

- Albert Einstein

“Vá em busca do seu sonho. Se tropeçar, não pare nem perca de vista sua meta.  
Continue subindo. Só do alto podemos apreciar toda a paisagem.”

- Pedro Bial

## RESUMO

Gramíneas são plantas que ocorrem em todo o território brasileiro e possuem elevada importância econômica devido à grande variedade de espécies utilizadas na alimentação humana e animal. Por serem plantas pioneiras e detentoras de um abundante sistema radical, promovem a formação dos agregados do solo e dão suporte para o estabelecimento de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs). Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar as relações entre produção de raízes, colonização e formação de esporos de FMAs e atributos físicos do solo. Para isso, amostras de solo e de raízes foram coletadas nas camadas superficiais do solo (0-20 cm), para avaliação das seguintes variáveis: volume, comprimento total e específico, diâmetro e massa seca das raízes, granulometria e propriedades químicas do solo. Dessas amostras, parte das raízes foi utilizada para determinação da colonização micorrízica, e 50g do solo, utilizados para extração dos esporos dos FMAs. Uma segunda amostragem foi realizada para obtenção de amostras indeformadas do solo com as quais foram determinados os atributos: macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade. Na ocasião, antes da coleta do solo, foi efetuada medição da resistência do solo à penetração, utilizando-se penetrômetro de anel dinamométrico. Dos traços morfológicos, apenas comprimento específico e diâmetro das raízes se mostraram relacionados com os atributos físicos do solo (porosidade total e macroporosidade, respectivamente). O volume de raízes teve correlação positiva com os macronutrientes do solo P, Ca e Mg e também com a matéria orgânica que por sua vez teve relação negativa com a macroporosidade e porosidade total do solo. As variáveis micorrízicas investigadas neste estudo não se apresentaram correlacionadas com os atributos físicos do solo, exceto colonização radical total, que se mostrou positivamente relacionada com a resistência do solo à penetração, na profundidade de 10 cm. Diferentemente, colonização radical e produção de esporos apresentaram-se relacionadas com comprimento e diâmetro das raízes. A colonização radical total e a colonização por arbúsculos apresentaram-se negativamente relacionadas com o comprimento total e o comprimento específico de raízes, respectivamente. O número de esporos apresentou relação negativa com as raízes de menor diâmetro ( $\leq 0,5$  mm), e positiva com as de diâmetro variando de 0,5 a 1,0 mm. Os dados mostram elevada variação nos valores das características investigadas indicando a influência da heterogeneidade ambiental sobre os componentes-alvos deste trabalho. Também, constatou-se que a produção e o crescimento das raízes de gramíneas não foram limitados pelos atributos físicos do solo, e essas, mesmo em condições consideradas críticas (macroporosidade inferior a 10% e resistência do solo à penetração superior a 2 MPa), se relacionaram positivamente com a acumulação de matéria orgânica e a disponibilidade de nutrientes no solo.

**Palavra-chave:** Glomeromycota. Porosidade. Densidade. Traços morfológicos de raízes.



## **ABSTRACT**

Grasses are plants that occur throughout the Brazilian territory and have high economic importance due to the large variety of species used in food and feed. To be pioneers and holding plant an abundant root system, promote the formation of soil aggregates and support for the establishment of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). In this context, this study aims to evaluate the relationship between production of roots, colonization and formation of AMF spores and soil physical properties. For this, samples of soil and roots were collected in the surface layers of the soil (0-20 cm), to evaluate the following variables: volume, total and specific length, diameter and dry mass of roots; soil granulometry; and soil chemical properties. Those roots were used to determine the mycorrhizal colonization, and 50 g of soil were used for extraction of spores of AMF. A second sampling was made to obtain undisturbed samples of soil for determination of following attributes: macroporosity, microporosity, total porosity and density. At the time, before the soil sampling, soil penetration resistance measurements were performed, using a ring dynamometer. From all morphological traits, only specific length and diameter of roots were significantly related to soil physical properties (total porosity and macroporosity, respectively). The volume had a positive correlation with P, Mg and Ca from soil, as well with the organic matter, which in turn had a negative relation with macroporosity and total porosity. Mycorrhizal variables investigated in this study were non-correlated to the soil physical properties, except total root colonization, which proved to be positively correlated with soil penetration resistance, at a depth of 10 cm. In contrast, root colonization and production of spores were related to the length and diameter of the roots. The total root colonization and colonization by arbuscules were negatively related to the total length and specific root length, respectively. The number of spores showed a negative relationship with the roots less than 0.5 mm of diameter, and a positive relationship with the roots ranging from 0.5 to 1.0 mm. The data showed high variation in the values of the investigated features indicating the influence of environmental heterogeneity on targets components of this work. Also, it was found that the production and root growth of grasses were not limited by soil physical properties, and these, even in conditions considered critical (macroporosity less than 10% and soil resistance to penetration higher than 2 MPa), were positively related to the accumulation of organic matter and nutrient availability in the soil.

**Keywords:** Glomeromycota. Porosity. Density. Root morphological traits.

## SUMÁRIO

<b>Introdução Geral .....</b>	<b>7</b>
Introdução .....	8
Justificativa .....	11
Objetivo Geral .....	11
Objetivo Específico .....	11
Referências .....	12
<b>Atributos abióticos do solo e relações com características morfológicas de raízes e colonização micorrízica de gramíneas .....</b>	<b>14</b>
Resumo .....	15
Material e Métodos .....	17
Resultados .....	19
Discussão .....	22
Figuras .....	27
Tabelas .....	29
Referências .....	32
<b>Anexo 1 .....</b>	<b>36</b>

## **INTRODUÇÃO GERAL**

## INTRODUÇÃO

A compactação do solo traz como consequências, mudanças bruscas nos processos que envolvem os componentes: solo, ar e água, especialmente os relacionados com a movimentação dos gases, da água e dos nutrientes em solução, e a difusividade térmica ao longo do perfil (LIMA et al., 2007). Tais mudanças são restritivas ao desenvolvimento e crescimento das raízes, que limitam o crescimento da planta e a produtividade das culturas (STONE; GUIMARÃES; MOREIRA, 2002; MAIA, 2003).

Solos degradados que são abandonados pela improdutividade são colonizados ao longo do tempo principalmente por gramíneas, que reúnem características que as destacam como um grupo evoluído e diversificado de plantas. Estas são adaptadas a temperaturas e intensidade luminosa elevadas (SOUZA; MORAES; RIBEIRO, 2005), se reproduzem rapidamente, por apresentarem mecanismos eficientes de propagação vegetativa com produção acentuada de sementes e alta capacidade de regeneração e tais características favorecem a conquista dos ambientes em que se estabelecem (BARUCK; HERNANDEZ; MONTILLA, 1989). O conjunto destes atributos faz com que gramíneas sejam apropriadas para a recomposição de áreas degradadas, atuando como pioneiras na sucessão ecológica (CHAPMAN, 1996). Estas plantas apresentam também alta densidade de raízes, e raízes finas que permitem uma boa absorção de águas e nutrientes minerais (EVANS, 1977). Além disso, o extenso sistema radical das gramíneas, que se renova continuamente, favorece a manutenção da estabilidade dos agregados no solo (SILVA; MIELNICZUK, 1997).

A estabilidade dos agregados pode ser definida como uma força resistente a uma ação mecânica passível de degradar a estrutura do solo tal como, também, a capacidade do solo de resistir às forças compactantes (SILVA; CABEDA; CARVALHO, 2006). Solos que apresentam maior proporção de macroagregados podem ser considerados mais estáveis que solos com menor agregação (VEZZANI, 2001). Agregados são componentes da estrutura do solo e são importantes na manutenção da porosidade e aeração do solo, no crescimento das plantas e da comunidade microbiana, na infiltração de água e na atenuação dos processos erosivos (OADES, 1984).

Por causa do elevado volume de raízes, a presença das gramíneas normalmente está associada com baixa quantidade de água no solo em torno das mesmas, e essa diminuição da umidade promove a aproximação das partículas minerais (GREGORY, 2006). Esses fatores, associados à liberação de substâncias orgânicas (exsudados, secreções) na rizosfera favorecem a agregação do solo (NICHOLS; HALVORSON, 2013).

Um solo bem estruturado, com seus agregados estáveis, possui menor compactação, menor densidade e maior porosidade total. A porosidade do solo está estreitamente ligada à dinâmica do armazenamento e do movimento de solutos e de circulação de gases no seu interior, essenciais aos processos fisiológicos das plantas, sobretudo aqueles relacionados com a produtividade vegetal (TOGNON, 1991). Poros com mais de 0,05 mm (macroporos) são responsáveis pela aeração do solo, e aqueles com menos de 0,05 mm (microporos) são responsáveis pela retenção de água no solo (KLEIN; LIBARDI, 2002).

Como a movimentação de nutrientes ocorre, principalmente, em função dos processos de difusão, fluxo de massa e interceptação radical, e estes estão atrelados a características físicas do solo, ressaltam-se ainda mais a importância da manutenção da qualidade física do solo em condições que não comprometam o crescimento das plantas.

Os trabalhos de Tisdall e Oades (1979; 1982) tem demonstrado que a matéria orgânica exerce papel importante na formação e estabilização dos agregados do solo. Sabe-se que o aumento da estabilidade dos agregados está intimamente relacionado com a capacidade da matéria orgânica se aderir às partículas minerais do solo, formando as ligações argilo-metalúmicas (EDWARDS; BREMNER, 1967).

Os agentes orgânicos envolvidos na estabilização dos agregados do solo podem ser divididos em três grupos, quanto a sua resistência à ação microbiana: os transitórios, os temporários e os persistentes. Os primeiros são os polissacarídeos que são rapidamente decompostos pelos microrganismos (ANGERS; MEHUYS, 1989) e, normalmente, estão associados à estabilidade dos macroagregados do solo. Os agentes temporários são as hifas de fungos e as raízes, que permanecem no solo por semanas, meses ou até anos, estão associados aos macroagregados. As raízes podem apresentar ação mecânica, promovendo pressão nos constituintes do solo, e química por meio das secreções. Os agentes persistentes são os materiais orgânicos humificados, principalmente associados aos óxidos de Fe e Al de baixa cristalinidade, constituindo a parte mais importante na formação de microagregados do solo (TISDALL; OADES, 1982).

Mesmo em solos degradados encontra-se uma biota com fungos, bactérias, e organismos que ajudam no estabelecimento das plantas e na estruturação dos solos. Dentre estes, encontram-se os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), que formam parte de seu soma no solo. Porém, como os FMAs são simbioses obrigatórias, precisam das plantas para se desenvolver (TRAPPE; SCHENK, 1982). Dessa forma quando as gramíneas começam a colonizar um ambiente, os FMAs começam uma simbiose com essas plantas, que apresentam diferentes graus de dependência micorrízica. Gramíneas com sistema radical fibroso são mais

eficientes na absorção de nutrientes e menos dependentes dos fungos, já gramíneas com raízes mais grossas tendem a apresentar maior dependência micorrízica, algumas delas dependência obrigatória (HETRICK; WILSON; LESLIE, 1991)

A base da nutrição entre o fungo e a planta é trófica sendo que as plantas fornecem fotoassimilados para o fungo, e este, em sua fase extraradical, ao explorar o solo fornece água e nutrientes minerais para a planta (TRAPPE; SCHENK, 1982). Gramíneas apresentam elevada eficiência fotossintética e abundante produção de fotossintatos, que suprem as necessidades dos FMA. A colonização radical em gramíneas pode variar muito, de 10 a 100%, sendo comuns porcentagens acima de 60% (WILSON; HARTNETT, 1998).

Como as gramíneas sustentam elevadas porcentagens de colonização radical é comum encontrar elevados números de esporos dos FMAs associados a essas plantas. Ramos et al. (2012), por exemplo verificaram colonizações variando de 19 a 70% e esporos, de 102 a 195 em 50 g de solo, em gramíneas forrageiras. Esse fato pode ser associado à quantidade de compostos orgânicos cedida para os fungos e ao sistema radicular abundante e de crescimento rápido que possibilita maior contato entre as raízes e os propágulos de FMAs (DANIELS-HETRICK; BLOOM, 1986). Com muitos sítios de colonização e disponibilidade de compostos orgânicos, os FMA podem se reproduzir prolificamente e formar um banco de esporos que se renova continuamente, como o observado por Angelini et al. (2012), que encontraram 300 esporos em 50g de solo.

Fungos micorrízicos além de ajudarem no estabelecimento das plantas por fornecerem água e nutrientes minerais como o fósforo, também ajudam na estruturação do solo devido ao seu micélio externo (RILLIG; MUMMEY, 2006), que por meio das hifas secretam proteínas altamente estáveis como as glomalinas (RILLIG, 2004). Estas representam uma importante parcela do carbono orgânico, e suas propriedades químicas promovem a agregação e a estabilidade dos agregados no solo, com conseqüente redução de processos erosivos (WRIGHT; GREEN; CAVIGELLI, 2007).

Compostos quelantes, como as glomalinas, e células mortas interagem com outros organismos, formando um ambiente distinto com uma comunidade microbiana característica (HERMAN; SITTE, 2012). Dessa forma, a presença de FMAs possibilita aumento na formação de biomassa e na diversificação da microbiota do solo, que aumenta o fornecimento de nutrientes para as plantas, e melhora a estruturação do solo (BORIE; RUBIO; MORALES, 2008).

## **JUSTIFICATIVA**

Tendo em vista a elevada tolerância que as gramíneas possuem às condições adversas, a abundante produção de raízes e a facilidade com que essas colonizam o solo e considerando que as gramíneas normalmente são as primeiras a se instalar em áreas destituídas de vegetação natural, avaliar a relação do estabelecimento desse grupo de plantas com os atributos físicos do solo pode gerar dados que subsidiem práticas para a recuperação de solos antropizados e a revegetação de áreas urbanas.

## **OBJETIVOGERAL**

Avaliar as relações entre a produção e caracteres morfológicos de raízes, colonização radical e produção de esporos de FMAs, e atributos físicos e químicos do solo de áreas urbanas colonizadas por gramíneas.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- 1- Avaliar as relações que envolvem a produção de biomassa, o comprimento e o diâmetro de raízes com os seguintes atributos físicos do solo: densidade, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e resistência do solo à penetração.
- 2- Avaliar o grau de importância das raízes para a estruturação física e para a fertilidade do solo, por meio da comparação dos coeficientes de correlação.
- 3- Verificar se sob condições físicas do solo limitantes para o crescimento das raízes, a colonização radical por FMAs aumenta ou torna-se mais ativa, ou seja, dotada de mais arbúsculos.
- 4- Verificar se a colonização radical e a produção de esporos de FMAs são alteradas pelos atributos físicos do solo.
- 5- Verificar se o número de esporos de FMAs se relaciona com os caracteres morfológicos de produção e crescimento das raízes.
- 6- Averiguar se condições físicas do solo críticas para o crescimento das raízes interferem na fertilidade do mesmo.

## REFERÊNCIAS

- ANGELINI, G. A. R.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; TORRES, J. L. R.; JÚNIOR, O. J. S. Colonização micorrízica, densidade de esporos e diversidade de fungos micorrízicos arbusculares em solo de Cerrado sob plantio direto e convencional. **Semina: Ciências Agrárias**. Londrina, v. 33, n. 1, p. 115-130, 2012.
- ANGERS, D. A.; MEHUYS, G. R. Effects of cropping on carbohydrate content and water-stable aggregation of a clay soil. **Canadian Journal of Soil Science**. Ottawa, v. 69, n. 2, p. 373-380, 1989.
- BARUCK, Z.; HERNANDEZ, A. B.; MONTILLA, M. G. Dinamica del crecimiento, fenologia y reparticion de biomassa gramineas natives y introducidas de una sabana neotropical. **Ecotropicos**. Mérida, v. 2, n. 1, p. 1-13, 1989.
- BORIE, F.; RUBIO, R.; MORALES, A. Arbuscular mycorrhizal fungi and soil aggregation. **Journal Soil Science Plant Nutrition**. Temuco, v. 8, n. 2, p. 9-18, 2008.
- CAMPOS, B. C.; REINERT, D. J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 19, p. 121-126, 1995.
- CHAPMAN, G.P. **The biology of grasses**. Wallingford, CAB International, 1996
- DANIELS-HETRICK, B. A.; BLOOM, J. The influence of host plant on production and colonization ability of vesicular-arbuscular mycorrhizal spores. **Mycologia**. Lawrence v. 78, n. 1, p. 32-36, 1986.
- EDWARDS, A. P.; BREMNER, J. M. Microaggregates in soils. **European Journal of Soil Science**. Malden, v. 18 p. 64-73, 1967.
- EVANS, P. S. Comparative root morphology of some pasture grasses and clovers. **New Zealand Journal of Agricultural Research**. v. 20, p. 331-335, 1977.
- GREGORY, P. J. Roots, rhizosphere, and soil: The route to a better understanding of soil science. **European Journal of Soil Science**. Malden, v. 57, p. 2-12, 2006.
- HERMAN, M. A.; SITTE, H. **Molecular beam epitaxy: fundamentals and current status** (Vol. 7). Springer Science & Business Media, 2012.
- HETRICK, B. A. D.; WILSON, G. W. T.; LESLIE, J. F. Root architecture of warm-and cool-season grasses: relationship to mycorrhizal dependence. **Canadian Journal of Botany**. Ottawa v. 69, n. 1, p. 112-118, 1991.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 945-953, 2002.
- LIMA, C. G. R.; CARVALHO, M. P.; MELLO, L. M. M.; LIMA, R. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). **Revista Brasileira de Ciência do solo**. Viçosa, v. 31, p. 1233-1244, 2007.
- MACEDO, M. C. M. Pastagens no ecossistema cerrados: pesquisas para o desenvolvimento sustentável. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 32. Brasília, **Anais**. Brasília: SBZ. p. 28-62, 1995.
- MAIA, J.C.S. **Determinação de esquemas de amostragem para avaliação de parâmetros físicos do solo para uso em agricultura de precisão**. Cuiabá: UFMT, 2003. 62p. (Relatório de Pesquisa) Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2003.



- NICHOLS, K. A.; HALVORSON, J. J. Roles of biology, chemistry, and physics in soil macroaggregate formation and stabilization. **The Open Agriculture Journal**. Beijing, v.7, p. 107-117, 2013.
- OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, v. 76, p. 319-337, 1984.
- RAMOS, M. L. G.; DE FREITAS; KONRAD, M. L.; SILVA, D. E.; JÚNIOR, W. Q. R.; BATISTA, L. M. T. Diversidade de fungos micorrízicos e colonização radicular, em forrageiras solteiras e em consórcio com milho = Mycorrhizal fungus diversity and radicular colonization, on single and consorciation with maize. **Bioscience Journal**. Uberlândia, v. 28, 2012.
- RILLIG, M. C. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. **Canadian Journal of Soil Science**. Ottawa, v. 84, p. 355- 363, 2004.
- RILLIG, M. C.; MUMMEY, D. L. Mycorrhizas and soil structure. **New Phytologist**. Oak Ridge, v. 171, p. 41-53, 2006.
- SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V.; CARVALHO, F. G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.1 0, p. 579-585, 2006.
- SOUZA, A.; MORAES, M. G; RIBEIRO, R. C. L. F. Gramíneas do cerrado: carboidratos não estruturais e aspectos ecofisiológicos. **Acta Botanica Brasilica**. Belo Horizonte, v. 19, n. 1, p. 81-90, 2005.
- STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro: I. nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 213-218, 2002.
- TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Stabilization of soil aggregates by the root system of ryegrass. **Australian Journal of Soil Research**. Melbourne, v. 17, p. 429-441, 1979.
- TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **European Journal of Soil Science**. Malden, v. 33, p. 141-163, 1982.
- TOGNON, A. A. **Propriedades físico-hídricas do Latossolo Roxo da região de Guairá-SP sob diferentes sistemas de cultivo**. Piracicaba: ESALQ, 1991. 85 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1991.
- TRAPPE, J. M.; SCHENCK, N. C. Taxonomy of the fungi forming endomycorrhizae. A. Vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi (Endogonales). 1982.
- VEZZANI, F. M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 184 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001
- WILSON, G. W.; HARTNETT, D. C. Interspecific variation in plant responses to mycorrhizal colonization in tallgrass prairie. **American Journal of Botany**. Saint Louis, v. 85, n. 12, p. 1732-1738, 1998.
- WRIGHT, S. F.; GREEN, V. S.; CAVIGELLI, M. A. Glomalin in aggregate size classes from three different farming systems. **Soil and Tillage Research**. v. 94, p. 546-549, 2007.

**ATRIBUTOS ABIÓTICOS DO SOLO E RELAÇÕES COM  
CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE RAÍZES E  
COLONIZAÇÃO MICORRÍZICA DE GRAMÍNEAS**

Heloisa de Cesaro Krzyzanski; Rosilaine Carrenho; Marcelo Alessandro Araújo

*Artigo elaborado e formatado conforme as normas  
para publicação científica no periódico Plant, Soil  
and Environment.*

## **Atributos abióticos do solo e relações com características morfológicas de raízes e colonização micorrízica de gramíneas**

**H.C. Krzyzanski<sup>1</sup>, R. Carrenho<sup>2</sup>, M.A. Araújo<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Programa de Pós-Graduação em Biologia Comparada, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, Brasil.*

<sup>2</sup>*Departamento de Biologia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, Brasil.*

<sup>3</sup>*Universidade Estadual de Maringá, Campus do Arenito, Cidade Gaúcha, PR, Brasil.*

### **RESUMO**

Este trabalho tem como objetivo avaliar a relação entre produção de raízes e atributos físicos do solo e a influência destes sobre os fungos micorrízicos arbusculares. Para tal amostras de solo foram coletadas nas camadas superficiais para determinação do volume, comprimento total e específico, diâmetro e massa seca das raízes, granulometria e atributos químicos do solo. Parte das raízes foram utilizadas para avaliação da colonização micorrízica e 50g do solo, utilizados para extração dos esporos. Uma segunda amostragem foi realizada para mensurar a resistência do solo a penetração, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo. Dos traços morfológicos das raízes apenas comprimento específico e diâmetro se mostraram relacionados com os atributos físicos. O volume de raízes teve correlação positiva com os macronutrientes do solo P, Ca e Mg e também com a matéria orgânica. Os fungos micorrízicos arbusculares não tiveram correlação com os atributos físicos do solo, exceto colonização total com resistência do solo a penetração a 10 cm. Esses mostraram correlação negativa entre colonização radical e comprimento total de raízes, e correlação entre número de esporos e diâmetro de raízes. Os dados mostram elevada variação nos valores das características investigadas indicando a influência da heterogeneidade ambiental sobre os componentes-alvos deste trabalho.

**Palavras-chave:** Glomeromycota; porosidade; densidade; esporos

O desenvolvimento das plantas depende de vários fatores, envolvidos na qualidade do solo em que essas se estabelecem. A resistência do solo à penetração é um dos atributos físicos do solo que mais limitam o crescimento das plantas (Letey1985), no qual valores elevados de resistência podem influenciar o crescimento das raízes em comprimento e diâmetro (Merotto e Mundstock 1999), sendo esses valores restritivos ao crescimento variam com a espécie vegetal investigada (Bengough e Mullins 1990).

Características do solo, do clima, identidade e abundância de plantas colonizando um dado sistema e práticas de manejo (quando em áreas exploradas pelo homem) podem

promover a degradação do solo (Klute 1982), por impor elevação da resistência desse à penetração, geralmente associada ao adensamento e redução da porosidade do solo. Tais modificações tendem a restringir o desenvolvimento da biota ali existente, assim como o crescimento das raízes, e como consequência, prejudicam o crescimento das plantas (Stone et al. 2002).

O valor de resistência do solo à penetração de 2 MPa tem sido frequentemente considerado como crítico para o crescimento das plantas (Taylor et al. 1966, Tormena et al. 1999). No entanto, as respostas variam com a espécie investigada. Foloni et al. (2003) verificaram que algumas plantas tem o crescimento de suas raízes limitado em solos com resistência inferior a 2 MPa, enquanto Beutler e Centurion (2003) constataram crescimento normal de raízes em solos com resistência superior à 3 MPa. As densidades consideradas críticas, estão em torno de  $1,6 \text{ g.cm}^{-3}$  para solos arenosos, e  $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$  para solos argilosos (Reinert et al. 2008)

Gramíneas possuem sistema radicular provido de alta densidade de raízes, que se renovam periodicamente, características que favorecem a distribuição dos exsudados no solo e estimulam a formação de biomassa e a atividade dos microrganismos rizosféricos (Silva e Mielniczuk 1997). As raízes também participam da formação dos agregados do solo, tornando-o mais resistente à ação do impacto da chuva e menos propenso à erosão (Salton et al. 2008).

A associação das raízes com fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), considerada ubíqua no ambiente terrestre, confere diversos benefícios para as plantas, especialmente quando essas se encontram em solos de baixa fertilidade ou degradados (Johnson e Pflieger 1992). O aumento na absorção de nutrientes pouco móveis, como fósforo, cobre e zinco, sustentado pelo micélio extraradical, promove o crescimento das plantas (Smith e Read 2010), e a formação do micélio propriamente dito favorece a agregação do solo, tanto pelo entrelaçamento das hifas com as partículas minerais e orgânicas (Jastrow e Miller 1997), como pela deposição de glomalina, material recalcitrante presente nas hifas dos glomeromicetes (Wright e Upadhyaya 1996).

A presença de raízes e de micélio extraradical dos FMAs contribui para a melhoria da qualidade do solo, que é traduzida em solo bem estruturado e fértil, condições que por sua vez, favorecem o crescimento das plantas (Borie et al. 2008).

Como meio de direcionar o presente estudo e originar mais dados sobre o envolvimento das raízes e dos FMAs com os atributos físicos e químicos do solo, estabelecemos como objetivos específicos deste estudo: 1- avaliar as relações que envolvem a

produção de biomassa, o comprimento e o diâmetro de raízes com os seguintes atributos físicos do solo: densidade, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e resistência do solo à penetração; 2- avaliar o grau de importância das raízes para a estruturação física e para a fertilidade do solo, por meio da comparação dos coeficientes de correlação; 3- verificar se sob condições físicas do solo limitantes para o crescimento das raízes, a colonização radical por FMAs aumenta ou torna-se mais ativa, ou seja, dotada de mais arbúsculos; 4- verificar se a colonização radical e a produção de esporos de FMAs são alteradas pelos atributos físicos do solo; 5- verificar se o número de esporos de FMAs se relaciona com os caracteres morfológicos de produção e crescimento das raízes; e 6- averiguar se condições físicas do solo críticas para o crescimento das raízes interferem na fertilidade do mesmo.

## MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em lotes urbanos destituídos de construções, em estado de pousio, vegetados espontaneamente por gramíneas e outras plantas herbáceas típicas do início de sucessão vegetal, cinco na região oeste do município de Maringá e três nas proximidades do campus sede da Universidade Estadual de Maringá. Esses foram escolhidos a partir da constatação de ocorrência generalizada de uma dada espécie de gramínea, de modo que na amostragem e na tomada de dados do solo não houvesse a interferência de raízes de outras espécies de plantas. As coletas de solo e de raízes foram realizadas em dois momentos, inicialmente para extração de raízes e esporos de FMAs e posteriormente para análise de atributos físicos do solo. Na primeira amostragem foram coletados amostras de solo em um recipiente com volume de 800 mL. Em laboratório, utilizando-se uma peneira, as raízes foram separadas do solo, retornadas ao recipiente a fim de definir o volume nas amostras. Depois as raízes foram lavadas em água corrente e armazenadas em álcool 70%. Com esse material, foram determinadas as variáveis discriminadas a seguir.

**Plantas:** foram coletadas raízes de 12 espécies de gramíneas: *Cenchrus echinatus* (L.), *Chloris barbata* Sw., *Chloris elata* Desv., *Cynodon dactylon* (L.) Pers., *Dactyloctenium aegyptium* (L.) Willd., *Paspalum notatum* Flügge, *Pennisetum purpureum* Schumach., *Rhynchelytrum repens* (Willd.) C.E. Hubb., *Setaria parviflora* (Poir.) Kerguelen, *Sorghum arundinaceum* (Desv.) Stapf, *Sorghum halepense* (L.) Pers. e *Urochloa brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) R.D. Webster. De maneira geral, as espécies ocuparam locais setorizados dentro do lote, algumas em regiões mais periféricas (*C. echinatus*, *S. parviflora*), outras em pequenas manchas isoladas, e outras vegetando extensas áreas (*U. brizantha*).

**Caracterização do Solo:** o solo do município de Maringá é, em sua maioria, do tipo nitossolo vermelho, que varia de distroférico a eutroférico (Sala e Gasparetto 2010). A análise química revelou que na maioria das amostras o solo apresentava fertilidade média a alta (Tabela 2).

### **Variáveis Avaliadas - Plantas**

*Comprimento total das raízes:* o método utilizado na determinação do comprimento de raízes foi o de intersecção (Tennant 1975). Para isso foi confeccionada uma escala de 25x35cm com malha de 2x2 cm e sobre a qual todas as raízes de cada amostra foram espalhadas e mensuradas.

*Massa seca das raízes:* as raízes foram secas em estufa de circulação forçada a 60°C, até obtenção do peso constante.

*Comprimento específico das raízes:* o comprimento específico das raízes foi estimado utilizando-se a razão do comprimento total das raízes pela massa seca total de raízes.

*Diâmetro das raízes:* subamostras de 0,5 g de raízes foram retiradas de cada amostra, e com o auxílio de um paquímetro manual, foram feitas medidas do diâmetro das raízes.

*Colonização radical por FMA:* as raízes foram lavadas em água corrente, clareadas com KOH 10%, acidificadas com HCl 5% e coradas com azul de Tripiano 0,05% (Phillips e Hayman 1970). A avaliação da porcentagem de colonização foi feita pelo método da placa riscada de Giovannetti e Mosse (1980).

### **Variáveis Avaliadas – Solo**

*Número de esporos de FMA:* os esporos dos FMA foram extraídos de subamostras de 50 g de solo, associando-se as técnicas do peneiramento úmido (Gerdemann e Nicolson 1963) e centrifugação em sacarose a 50% (Jenkis 1964). Sob estereó microscópio, os esporos foram separados e preparados em lâminas semi-permanentes com resina de álcool polivinílico e glicerol (PVLG) (Morton et al. 1993). Após montagem dos esporos, as lâminas foram secas em estufa ( $\pm 50^\circ\text{C}$ ), e o número de esporos, determinado sob microscópio de luz.

*Determinação da resistência do solo à penetração:* a mensuração da resistência do solo a penetração do solo foi efetuada conforme metodologia descrita em Tormena e Roloff (1996), para o penetrômetro de anel dinamométrico. Foram coletados 240 dados de penetração, cinco para cada gramínea, em intervalos de 5 cm até a profundidade de 20 cm na lateral das plantas com o solo em capacidade de campo.

*Determinação da porosidade e da densidade do solo:* com o auxílio de um amostrador específico, constituído de cilindros de aço, foram coletadas amostras de solo com estrutura indeformada. Com essas, e adotando-se o método da mesa de tensão, descrita por Kiehl (1979), foram determinados os valores de macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo. Na sequência, os cilindros foram colocados em estufa à 105°C por 24 horas para determinação da densidade (Embrapa1997).

*Atributos químicos e físicos do solo:* teores de macronutrientes, variáveis de fertilidade e granulometria foram determinados a partir de amostras compostas (n=4) retiradas próximo das raízes, na camada superficial do solo (0-15 cm). O pH foi determinado em CaCl<sub>2</sub>; P e K foram extraídos pelo método de Mehlich-1, o primeiro determinado por colorimetria e o segundo por fotometria de chama; Ca, Mg e Al trocáveis foram extraídos com KCl a 1 mol.L<sup>-1</sup>, e determinados por espectrofotometria de absorção atômica e titulação; Na foi extraído com KCl a 1 mol.L<sup>-1</sup> e determinado por fotometria de chama; o carbono orgânico total (COT) foi determinado pelo método de Walkley-Black, conforme Embrapa (1997). Com relação à granulometria, as amostras de solo apresentaram os seguintes valores médios (g.kg<sup>-1</sup>): silte: 239,5 (±40,2); argila: 621,4 (±83,6); areia fina: 66,5 (±24,6); areia grossa: 72,5 (± 68,4); areia total: 139,0 (±90,2), caracterizando um solo muito argiloso.

**Análise estatística:** os dados foram avaliados quanto ao atendimento dos pressupostos linearidade, normalidade e homocedasticidade. Como a maioria das variáveis investigadas apresentou-se não paramétrica, essas foram correlacionadas entre si por meio da análise de Spearman, com grau de significância de 5%. Para a análise dos dados, foi utilizado o programa Statistica, versão 7.0. A categorização dos coeficientes seguiu o disposto por Santos (2007), e mesmo coeficientes fracos (0,25-0,5) foram considerados na discussão tendo em vista a notória heterogeneidade ambiental e o alto grau de significância adotado.

## RESULTADOS

Os dados mostram elevada variação nos valores das características investigadas, tanto bióticas (Tabela 1) como abióticas (Tabela 2), indicando a influência da heterogeneidade ambiental sobre os componentes-alvos deste trabalho (solo, planta e fungos micorrízicos). Esses são apresentados por grupo de interações, ou seja, num primeiro momento são apresentadas as relações verificadas entre planta e solo; depois as relações entre planta e FMAs, e solo e FMAs. Por último, são apresentadas as relações entre os atributos físicos e químicos do solo. Vale ressaltar que como o diâmetro das raízes das gramíneas foi inferior a 2

mm, foram criadas três classes de diâmetro, as quais foram utilizadas para estimar a porcentagem de raízes finas (1-2 mm), muito finas ( $>0,5 \leq 1,0$  mm) e extremamente finas ( $\leq 0,5$  mm).

### **Planta – Solo**

Dos traços morfológicos avaliados nesse trabalho apenas dois apresentaram correlações significativas com os atributos físicos do solo. Comprimento específico de raízes (CER) mostrou-se inversamente relacionado com a porosidade total do solo (PTOT), e ocorrência de raízes com diâmetro inferior ou igual a 0,5 mm ( $DR \leq 0,5$  mm) e diâmetros acima de 0,5 e inferiores a 1 mm ( $DR > 0,5 \leq 1,0$  mm) mostraram-se positivamente e inversamente relacionadas com a macroporosidade do solo (MAP), respectivamente (Tabela 3).

Algumas características morfológicas das raízes não apresentam relações diretas com os atributos físicos do solo, porém, indiretamente podem ter contribuído para a estruturação do mesmo. Por exemplo, o volume de raízes (VR) não se mostrou relacionado significativamente com os atributos físicos do solo, porém, apresentou-se positivamente relacionado com o teor de matéria orgânica do solo (MO) ( $r = 0,36$ ), que por sua vez apresentou correlação negativa com macroporosidade ( $r = -0,40$ ) e porosidade total do solo ( $r = -0,36$ ) (Tabela 3).

Esperava-se que o teor de matéria orgânica no solo estivesse relacionado com a biomassa, o volume (VR) e o comprimento total de raízes (CTR). No entanto, os dados mostram que das três características consideradas como responsáveis pelo aporte de carbono ao solo, apenas volume mostrou-se relacionado. Também, o diâmetro das raízes (DR) foi uma variável importante, sendo positiva a relação entre a quantidade de raízes com diâmetros acima de 0,5 mm e o teor de matéria orgânica, e negativa com as raízes de diâmetro inferior (Tabela 3).

A relação dos caracteres morfológicos das raízes com os atributos químicos do solo, também pode ser observada pela concentração de nutrientes disponíveis. O volume de raízes apresentou-se positivamente relacionado com três dos quatro macronutrientes avaliados, fósforo (P) ( $r = 0,43$ ), cálcio (Ca) ( $r = 0,62$ ) e magnésio (Mg) ( $r = 0,55$ ). A ocorrência de raízes com diâmetros inferiores a 1 mm (categorias extremamente finas e muito finas) também foi relacionada com a concentração de potássio (K) no solo, o primeiro grupo negativamente ( $r = -0,29$ ), e o segundo positivamente ( $r = 0,28$ ) (Tabela 3). Volume de raízes foi o traço morfológico com maior número de correlações positivas com os atributos



relacionados com a fertilidade do solo. Elevados coeficientes foram verificados para soma das bases (SB) e capacidade de troca catiônica (CTC).

### **Planta – FMAs**

O desenvolvimento dos FMAs mostrou-se fracamente relacionado com os traços morfológicos das raízes, considerando os baixos coeficientes de correlação (Tabela 3). A porcentagem de colonização radical total (CRT) foi maior nas áreas cujas raízes apresentaram menor comprimento total de raízes (CTR). A porcentagem de arbúsculos (ARB) também se mostrou inversamente relacionada com o comprimento específico de raízes (CER), porém vale salientar que ambas as porcentagens de CRT e de ARB foram baixas (Tabela 1).

A produção de esporos pareceu ser modulada pelo diâmetro das raízes. Correlações negativas foram evidenciadas nas raízes extremamente finas ( $\leq 0,5$  mm), e correlações positivas, nas raízes muito finas ( $> 0,5 \leq 1,0$  mm).

### **Solo – FMAs**

O desenvolvimento dos FMAs não foi comprometido pelos atributos físicos do solo. Valores críticos de densidade (DS), macroporosidade (MAP) e resistência do solo à penetração (RSP) não se mostraram relacionados com reduções na colonização radical ou no número de esporos (NE) dos FMAs (Tabela 3). Inclusive, aos 10 cm de profundidade verificou-se que a porcentagem de colonização radical total (CRT) esteve positivamente relacionada com a resistência do solo à penetração (RSP), fato que pode ser resultante da ação restritiva da RSP sobre o crescimento das raízes e a capacidade de exploração do solo, em busca de nutrientes. Tal condição poderia explicar as maiores porcentagens de CRT.

Ao avaliar as possíveis relações entre colonização micorrízica e disponibilidade de nutrientes no solo, constatou-se que porcentagem de ARB e concentração de K foram variáveis positivamente relacionadas (Tabela 3). Diferentemente, produção de esporos não se mostrou correlacionada com os atributos abióticos do solo.

### **Atributos Físicos – Atributos Químicos do Solo**

A fertilidade do solo, avaliada neste estudo por meio de seus atributos químicos, mostrou-se relacionada com a maioria dos atributos físicos do solo, porém, na maioria das vezes, com baixos coeficientes de correlação.

Porosidade total (PTOT) mostrou-se inversamente relacionada com a maioria das propriedades químicas envolvidas na fertilidade (P, Ca, MO, pH, SB, CTC), diferentemente

do observado para densidade do solo (DS), que esteve positivamente relacionada com as concentrações de Ca e Mg, o pH e a soma de bases (SB).

Macroporosidade e resistência do solo à penetração, nas camadas superficiais (5 e 10 cm), apresentaram coeficientes de correlação significativos com teor de MO e pH, e com as concentrações de K e Mg, respectivamente.

## **DISCUSSÃO**

### **Planta – Solo**

Densidades do solo próximas ou superiores a  $1,45 \text{ g.cm}^{-3}$  são consideradas restritivas ao crescimento das raízes em solos argiloso (Reinert et al. 2008). Em nosso estudo apenas 13% das amostras de solo apresentaram densidades acima de  $1,45 \text{ g.cm}^{-3}$ , que explica a falta de correlação entre este atributo e os traços morfológicos investigados. No entanto, densidade e macroporosidade estão intimamente relacionadas, pois quanto mais denso é um solo menos macroporos ele possui. Sabe-se que os macroporos são o caminho preferencial para o crescimento das raízes e sua diminuição prejudica o desenvolvimento radical (Camargo e Alleoni 1997). Neste estudo, porém, apenas 29% das amostras de solo apresentaram macroporosidade inferior a 10% (Figura 1), valor crítico para o crescimento das raízes (Hanks e Thorp 1956, Eavis 1972).

Os dados mostram que solos com menor macroporosidade apresentaram menor proporção de raízes extremamente finas ( $< 0,5 \text{ mm}$ ), fato que pode estar relacionado com o engrossamento das raízes para vencer as barreiras físicas (Dias Junior 2000). Convém destacar, no entanto, que os sistemas de raízes das gramíneas investigadas neste trabalho foram constituídos essencialmente por raízes finas, com diâmetros inferiores a 2 mm (Figura 2). Isso nos mostra que apesar das correlações significativas, macroporosidade não esteve relacionada com alterações morfológicas negativas para as raízes (Tabela 3).

A prolífica produção de raízes, típica das gramíneas, possivelmente é responsável pelos bons valores de densidade e macroporosidade (e porosidade total), considerando que os solos avaliados em sua maioria apresentaram valores de resistência à penetração superiores a 2 MPa (Figura 1), considerados críticos para as raízes (Taylor et al. 1966; Imhoff et al. 2000). O aumento da resistência do solo estimula a proliferação de raízes laterais (Russel e Goss 1974) e aumenta o diâmetro das raízes (Materechera et al. 1992, Rosolem et al. 1994, Foloni 2003), ambas respostas benéficas para a estruturação física do solo. No entanto, do ponto de vista do desenvolvimento vegetal, a primeira é positiva para todas as plantas que

crecem em solos com impedimento mecânico, mas a segunda pode comprometer a capacidade de absorção de nutrientes, e conseqüentemente o crescimento das mesmas. Gramíneas, nesse contexto não seriam afetadas.

Outro aspecto interessante, e aparentemente mais importante, foi a relação positiva da maioria dos traços morfológicos das raízes com os atributos químicos do solo relacionadas com a fertilidade (Tabela 3). Volume de raízes (VR) foi um fator intimamente relacionado com o teor de matéria orgânica e a concentração de nutrientes. O aumento de MO no solo diminui a densidade do solo (Fernandes et al. 1983, Reeves 1995), aumenta a porosidade (Silva et al. 2006) e promove a estabilização dos agregados (Roth et al. 1992), e essas alterações favorecem a aeração e a retenção de água no solo, elementos importantes para o crescimento das raízes e o estabelecimento dos organismos que processam a matéria orgânica morta, participando de sua mineralização (Doran et al. 1996, Araújo e Monteiro 2007). A produção de raízes com diâmetros maiores verificada nesse estudo também contribui para o aumento de matéria orgânica no solo, sendo assim uma resposta positiva para a fertilidade.

### **Planta – FMAs**

As correlações inversas entre as porcentagens totais de colonização micorrízica (CRT) e de arbúsculos (ARB) e os comprimentos totais (CTR) e específicos (CER), respectivamente (Tabela 3) mostram a resposta geral observada nas plantas (Muthukumar et al. 2003). Quando as plantas possuem elevado comprimento de raízes e raízes com menor massa, ou seja, raízes mais longas e finas, sua capacidade de exploração do solo não é limitada, e essas dependem pouco dos FMAs (Manjunath e Habte 1991). Normalmente, nessa situação, a colonização radical é baixa, pois a planta evita desperdiçar recursos com o micobionte (Fitter 1991)

Os dados demonstram tal relação, uma vez que as porcentagens de colonização foram mais baixas que as normalmente verificadas em gramíneas (Siqueira e Klauberg-Filho 2000, Ramos et al. 2012). O mesmo foi verificado para a produção de esporos, cujo número médio encontrado neste estudo (85 em 50 g de solo) foi 40% menor que o observado por Ramos et al. (2012).

Outro aspecto que deve ser ressaltado é que, como as raízes não tiveram seu crescimento limitado pelos atributos físicos do solo, mesmo em condições críticas, como nos solos com elevada resistência à penetração, as plantas não dependeram mais da associação micorrízica para sua nutrição, e isso também pode estar relacionado com as baixas porcentagens de colonização.

Além da baixa necessidade da planta, explicada pela morfologia do sistema radical, outro fator que pode ter contribuído para as baixas porcentagens, foi a concentração de fósforo no solo (Tabela 2), considerada alta para a maioria das amostras (Figura 3). Elevadas concentrações de fósforo têm sido relatadas como inibidoras da proliferação dos fungos micorrízicos por causa do aumento nos teores do elemento nos tecidos da planta (Menge et al. 1978, Tristão et al. 2003).

A maior produção de esporos associada a raízes mais largas (diâmetros variando de 0,5 a 1 mm) parece indicar que existe uma possível relação entre área de córtex passível de ser colonizada pelos FMAs, que geraria maior colonização e aumentaria a possibilidade de transferência de nutrientes para a produção de esporos fora das raízes. Outra possível explicação seria resultado da maior produção de micélio extraradical em raízes mais largas, portanto mais dependentes dos FMAs, que sustentaria a formação de um maior número de hifas esporígenas, e conseqüentemente uma maior produção de esporos. Ambas as possibilidades não podem ser confirmadas pelos dados deste estudo, mas é razoável supor que para as gramíneas envolvidas, a segunda explicação não parece lógica. Muthukumar et al. (2003) também verificaram maior número de esporos de FMAs associado a raízes mais finas; no entanto, os autores não destacaram essa relação na discussão dos dados, possivelmente por causa dos baixos números de esporos encontrados (médias de 12 a 53 esporos em 100 g de solo).

### **Solo - FMAs**

Os FMAs, em sua fase extraradical, parecem não ter sofrido pressões por parte dos atributos físicos do solo. O diâmetro reduzido de suas hifas possivelmente os protege dos danos causados pela redução da porosidade e/ou dos aumentos da densidade (DS) e resistência do solo à penetração (RSP). As maiores porcentagens de colonização radical associadas a solos com maior resistência à penetração poderiam ser devidas à ação restritiva da RSP sobre o crescimento das raízes e a capacidade do sistema radical explorar o solo (Rosolem et al. 1994). Porém, como não foram verificadas correlações entre essas variáveis, é possível que as plantas tenham produzido suas raízes predominantemente na camada superficial, que apresentou menores valores de RSP (Tabela 2) e menor número de sítios com valores críticos (Figura 1). Com isso, o volume de solo explorado pelas raízes seria menor, e as plantas poderiam ter seu crescimento limitado (Genro Junior et al. 2009). A presença dos FMAs, nessa situação, as beneficiaria. Uma maior porcentagem de colonização representaria uma maior interface de contato para os simbiontes, potencializando as trocas de nutrientes.

A relação positiva entre a porcentagem de arbúsculos e a concentração de potássio no solo pode ser devida ao envolvimento do elemento na formação dos grânulos de polifosfato nas hifas dos FMA (Bücking e Heyser 1999). A absorção do K é aumentada nas plantas micorrizadas e o elemento parece influenciar indiretamente a absorção e a transferência do fosfato inorgânico, por regular a homeostase do elemento nos tecidos da planta (Garcia e Zimmermann 2014). Vale lembrar que a transformação do polifosfato em moléculas simples de fósforo se dá nos arbúsculos, estrutura relacionada com as trocas de nutrientes entre os simbiontes micorrízicos. Porém, considerando os dados obtidos por Ardestani et al. (2011), os possíveis benefícios do K sobre a colonização radical dependem de um equilíbrio nos teores de K e Mg do solo, como observado em milho. Neste estudo, Mg e K estavam presentes em concentrações adequadas para o crescimento das plantas, e talvez por isso, a relação entre a porcentagem de arbúsculos e a disponibilidade de K tenha sido evidenciada.

O número de esporos dos FMAs não se mostrou diretamente relacionado com os atributos físicos e químicos do solo. Estresses mecânicos promovidos pelos valores críticos de densidade e porosidade não estimularam, nem restringiram a esporulação. Dois aspectos devem ser levados em consideração, ao avaliar essas respostas: 1) a falta de evidências de correlação pode ser devida à não realização da análise das variáveis bióticas nas diferentes profundidades do solo; e 2) a não avaliação da produção de micélio extraradical, elemento essencial para se estabelecer ligações entre colonização radical e proliferação dos FMAs no solo, e estabilização dos agregados e aporte de carbono ao solo. Os dois últimos aspectos têm sido abordados em alguns estudos (Barto et al. 2010, Rillig e Mummey 2006, Wilson et al. 2009).

### **Atributos físicos - Atributos químicos do solo**

A concentração de macronutrientes no solo foi na maioria dos casos alta (Tabela 2), não sendo a fertilidade um fator impeditivo para o crescimento das raízes. No entanto, quando os dados dos atributos químicos e físicos do solo são confrontados, algumas correlações são evidenciadas. Os maiores coeficientes de correlação foram observados entre teor de matéria orgânica e concentração de nutrientes (Tabela 3) indicando que esta tem sustentado uma biota ativa, que ao mesmo tempo em que participa da mineralização (Balota et al. 1998), aumenta a quantidade de húmus no solo, que retém grande parte dos nutrientes trocáveis (Paes et al. 1996). Coeficientes de correlação mais baixos foram verificados com os atributos físicos, mas

estes também podem ter influenciado a concentração e a relação dos nutrientes no solo, como discutido na sequência.

As relações observadas entre elevadas densidade (DS) e resistência do solo à penetração (RSP) e baixas macroporosidade (MAP) e porosidade total (PTOT) com aumentos ou decréscimos de nutrientes, provavelmente são explicadas pelos reflexos de tais condições sobre a retenção e a movimentação da água no solo e as formas com os que esses nutrientes chegam até as raízes.

O aumento da DS, acompanhado da redução de MAP e PTOT e elevação da RSP diminuem a capacidade de retenção de água no solo (Hamza e Anderson 2005), assim como sua condutividade hidráulica (Beltrame et al. 1981; Coleti e Demattê 1982).

Nessa condição, a solução do solo torna-se mais concentrada (Medeiros et al., 2005), porém os nutrientes têm mais dificuldade em ser transportados, seja pela redução do fluxo de massa, seja pelo impedimento físico propriamente dito. Warncke e Barber (1972) constataram que em densidades superiores a  $1,3 \text{ g.cm}^{-3}$ , o arranjo das partículas sólidas do solo torna o caminho para a movimentação dos nutrientes, mais tortuoso, ou seja, mais longo. Com maior tortuosidade, a difusão dos nutrientes é dificultada.

Para nutrientes como o K e P, que se movimentam principalmente por difusão, tal restrição pode ocasionar respostas diferentes, dependendo da capacidade que o íon tem para se solubilizar e/ou fixar no solo. Potássio é um elemento abundante na natureza, altamente móvel, que fica retido aos colóides do solo por meio da capacidade de troca catiônica, e raramente se fixa no solo como o fósforo. A difusão do K no solo é facilitada devido às elevadas taxas com que ele é absorvido pelas plantas, que apresentam membranas altamente permeáveis ao elemento (Mengel e Kirkby 1987). Aparentemente, o aumento da RSP e as mudanças do meio, que as acompanham, não prejudicaram a absorção do K, podendo as menores concentrações estar relacionadas com outros fatores.

Diferente do K, fósforo é um elemento pouco solúvel, de baixa mobilidade que se fixa com facilidade ao solo. As duas primeiras características contribuem para sua permanência na solução do solo, mas a última, tende a torná-lo indisponível. A concentração do P foi maior nos solos com menor porosidade e maior densidade (Tabela 3). Estas podem ter restringido sua movimentação no solo, contribuindo para o aumento da concentração. Em solos menos porosos, as raízes tornam-se mais próximas das partículas minerais e da matéria orgânica, e como consequência da menor retenção de água no solo, as raízes tendem a exsudar mais, possibilitando maior união dos materiais adjacentes (Baligar et al. 1975). Ácidos e enzimas presentes nos exsudados radicais podem favorecer a solubilização do fósforo, contribuindo para

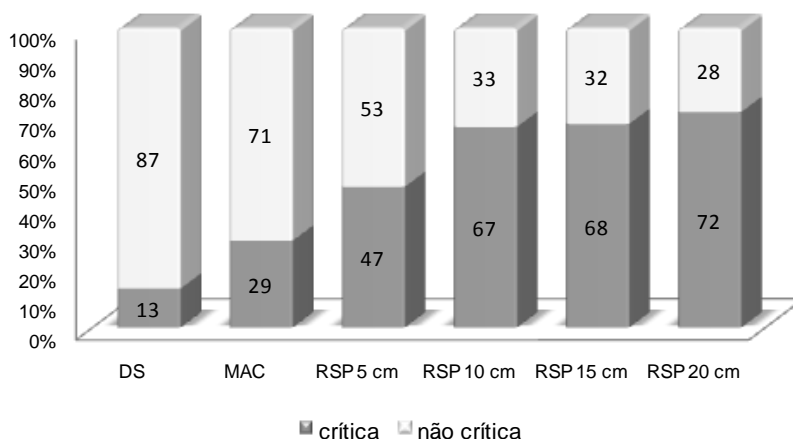
o aumento da concentração do elemento no solo (Neumann e Romheld 1999; Hurley et al. 2010).

Magnésio e cálcio, elementos que se movimentam por fluxo de massa, tiveram suas concentrações negativamente relacionadas com valores críticos dos atributos do solo (Tabela 3), e nesses casos, a menor quantidade de água retida no solo pode ter contribuído para as maiores concentrações no solo.

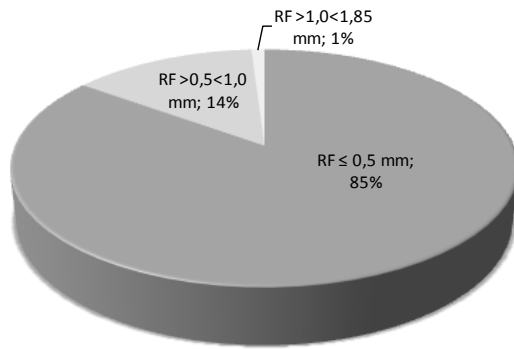
Os dados obtidos neste estudo mostram que os atributos físicos do solo apresentaram-se fracamente relacionados com os traços morfológicos relacionados com o crescimento das raízes e com o desenvolvimento dos FMAs. A produção e o crescimento das raízes estiveram mais relacionados com as propriedades químicas do solo, especialmente por meio do teor da matéria orgânica do solo. Colonização radical e produção de esporos dos FMAs foram promovidas pelo menor comprimento e maior diâmetro de raízes, respectivamente. Os dados mostram também, elevada variação nos valores das características investigadas indicando que a heterogeneidade ambiental teve maior influência sobre os componentes-alvos deste trabalho.

## Agradecimentos

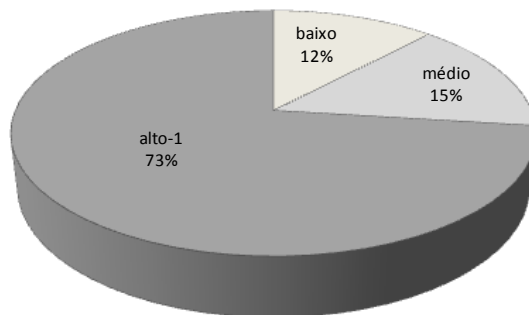
Agradecemos à bióloga Kazue Kawakita, do Núcleo de Pesquisas em Limnologia, Ictiologia e Aquicultura da Universidade Estadual de Maringá, pela confirmação da identidade taxonômica das plantas, e à Capes, pela bolsa de estudos concedida à primeira autora.



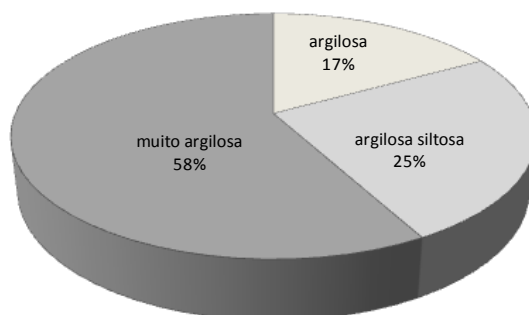
**Figura 1.** Distribuição das amostras de solo segundo os valores críticos de densidade ( $>1,4 \text{ g.dm}^{-3}$ ), macroporosidade ( $<10\%$ ), resistência do solo à penetração (2 MPa) aos 5, 10, 15 e 20 cm de profundidade.



**Figura 2.** Distribuição das raízes de gramíneas invasoras em categorias de diâmetro. RF ≤ 0,5 mm = extremamente finas; RF > 0,5 < 1,0 mm = muito finas; RF > 1,0 < 1,85 mm = finas.



**Figura 3.** Distribuição das amostras de solo em categorias de disponibilidade de fósforo. [P] baixa: 2,6-8,8 mg.dm<sup>-3</sup>; [P] média: >8,8-13,0 mg.dm<sup>-3</sup>; [P] alta: >13,0 mg.dm<sup>-3</sup>.



**Figura 4.** Distribuição das amostras de solo em categorias de textura. Argilosa: 440-560 g.dm<sup>-3</sup> de argila; Argilosa-siltosa: 530-600 g.dm<sup>-3</sup> de argila; Muito argilosa: 665-730 g.dm<sup>-3</sup> de argila. De acordo com Instrução Normativa n<sup>o</sup> 2, de 02/09/2008, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.



**Tabela 1.** Valores mínimos, máximos, médios e desvios-padrão (DP) das variáveis bióticas relacionadas com as raízes e os FMAs associados a gramíneas invasoras de áreas abandonadas do município de Maringá.

Valores	VOL (mL)	CTR (cm)	CER (g.cm <sup>-1</sup> )	DR I (%)	DR II (%)	DR III (%)	MSR (g)	ARB (%)	CRT (%)	NE (50 g solo)
<b>Mín.</b>	50,0	128,8	180,2	28,0	0,0	0,0	0,08	0,0	0,0	10,0
<b>Máx.</b>	280,0	1247,6	3560,4	100,0	69,0	18,0	1,84	18,0	84,0	651,0
<b>Méd.</b>	156,0	477,9	1320,2	84,4	14,4	1,0	0,59	2,0	29,8	85,0
<b>DP</b>	57,5	256,8	855,7	17,6	15,9	3,1	0,45	4,07	18,91	98,93

VOL = volume de raízes. CTR = comprimento total de raízes; CER = comprimento específico de raízes; DRI = proporção de raízes com diâmetro  $\leq 0,5$  mm; DRII = proporção de raízes com diâmetro  $>0,5 <1,0$  mm; DR III = proporção de raízes com diâmetro  $>1,0 <1,85$  mm; MS = massa seca das raízes; ARB = colonização por arbúsculos; CRT = colonização radical total; NE = número de esporos de FMA.

**Tabela 2.** Valores mínimos, máximos, médios e desvios-padrão (DP) de atributos físicos e químicos do solo de áreas abandonadas do município de Maringá, colonizadas por gramíneas invasoras.

Valor	RSP				MAP	MIP	PTOT	DS	S	A	AT	P	K	Ca	Mg	MO	pH	SB	CTC
	0-5cm	5-10cm	10-15cm	15-20cm															
<b>Mín.</b>	0,36	0,24	0,37	0,57	0,018	0,09	0,30	0,92	195,0	443,0	61,0	4,0	1,5	27,0	14,0	13,0	5,1	45,0	70,0
<b>Máx.</b>	3,58	4,20	5,00	4,55	0,29	0,50	0,73	1,58	332,0	728,0	36,2	75,0	16,2	207,0	47,0	47,0	7,9	260,0	267,0
<b>Méd.</b>	1,87	2,28	2,36	2,46	0,17	0,36	0,54	1,14	239,5	621,4	139,0	23,9	9,3	72,0	25,1	27,4	6,0	106,4	125,2
<b>DP</b>	0,77	0,97	0,95	0,86	0,08	0,08	0,07	0,16	40,3	83,7	90,2	17,7	3,9	43,9	6,72	9,47	0,70	49	45,8

RSP= resistência do solo à penetração; MAP ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) = macroporosidade; MIP ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) = microporosidade; PTOT ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) = Porosidade total; DS ( $\text{g}.\text{cm}^{-3}$ ) = densidade do solo; S ( $\text{g}.\text{Kg}^{-1}$ ) = silte; A ( $\text{g}.\text{Kg}^{-1}$ ) = argila; AT ( $\text{g}.\text{Kg}^{-1}$ ) = areia total; P ( $\text{mg}.\text{dm}^{-3}$ ) = fósforo; K ( $\text{mmolc}.\text{dm}^{-3}$ ) = potássio; Ca ( $\text{mmolc}.\text{dm}^{-3}$ ) = cálcio; Mg ( $\text{mmolc}.\text{dm}^{-3}$ ) = magnésio; MO ( $\text{g}.\text{dm}^{-3}$ ) = matéria orgânica; pH ( $\text{CaCl}_2$ ) = acidez ativa; SB ( $\text{mmolc}.\text{dm}^{-3}$ ) = soma das bases; CTC ( $\text{mmolc}.\text{dm}^{-3}$ ) = capacidade de troca catiônica.

**Tabela 3.** Correlações significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre os grupos de interações planta e solo, planta e fungo, solo e fungo e entre os atributos físicos do solo.

PLANTA - SOLO			PLANTA - FUNGO			SOLO - FUNGO			ATRIBUTOS SOLO			SIGLAS
		r			r			r			r	
VR	P	0,43	CTR	CRT	-0,26	K	ARB	0,30	DS	Ca	0,26	ARB = colonização por arbusculos
	Ca	0,62	CER	ARB	-0,28	RSP 10 cm	CRT	0,27		Mg	0,26	Ca = cálcio
	Mg	0,55	DR $\leq 0,5$ mm	NE	-0,45					pH	0,41	CER = comprimento específico de raízes
	MO	0,36	DR $>0,5 \leq 1,0$ mm	NE	0,47				PTOT	SB	0,26	CRT = colonização radical total por FMAAs
	Ph	0,31	DR $>1,0 <2,0$ mm	NE	0,28					P	-0,35	CTC = capacidade de troca catiônica
	SB	0,63								Ca	-0,26	CTR = comprimento total de raízes
	CTC	0,65								MO	-0,36	DR = diâmetro das raízes
CER	PTOT	-0,28								pH	-0,26	DS = densidade do solo
DR $\leq 0,5$ mm	MAP	0,28							MAP	MO	-0,40	K = potássio
	K	-0,29								pH	-0,37	MAP = macroporosidade
DR $>0,5 \leq 1,0$ mm	MO	-0,38							RSP 5 cm	K	-0,33	Mg = magnésio
	MAP	-0,29								Mg	0,29	MO = matéria orgânica do solo
DR $>1,0 <2,0$ mm	K	0,28							RSP 10 cm	K	-0,26	MSR = massa seca de raízes
	MO	0,37								Mg	0,33	NE = número de esporos
	MO	0,30										P = fósforo
												pH = acidez ativa do solo
												PTOT = porosidade total
												RSP = resistência do solo a penetração
												SB = soma das bases
												VR = volume de raízes

## REFERÊNCIAS

- Araújo A.S.F., Monteiro R.T.R. (2007): Indicadores biológicos de qualidade do solo. *Bioscience Journal*, 23: 66-75.
- Ardestani N.K., Zare-Maivan H., Ghanati F. (2011): Effect of different concentrations of potassium and magnesium on mycorrhizal colonization of maize in pot culture. *African Journal of Biotechnology*, 10: 16548-16550.
- Baligar V.C., Nash V.E., Hare M.L., Price J.A. (1975): Soybean root anatomy as influenced by soil bulk density. *Agronomy Journal*, 67: 842-844.
- Balota E.L., Colozzi-filho A., Andrade D.S., Hungria M. (1998): Biomassa microbiana e sua atividade em solos sob diferentes sistemas de preparo e sucessão de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22: 641-649.
- Barto E.K., Alt F., Oelmann Y., Wilcke W., Rillig M.C. (2010): Contributions of biotic and abiotic factors to soil aggregation across a land use gradient. *Soil Biology & Biochemistry*, 42: 2316-2324.
- Beltrame L.F.S., Gondim L.A.P., Taylor J.C. (1981): Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 5: 145-149.
- Bengough A.G., Mullins C.E. (1990): Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal Soil Science*, 41: 341-358.
- Beutler A.N., Centurion J.F. (2003): Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. *Pesquisa agropecuária brasileira*, 38: 849-856.
- Borie F., Rubio R., Morales A. (2008): Arbuscular mycorrhizal fungi and soil aggregation. *Journal Soil Science Plant Nutrition*, 8: 9-18.
- Bücking H., Heyser W. (1999): Elemental composition and function of polyphosphates in ectomycorrhizal fungi—an X-ray micro analytical study. *Mycological Research*, 103: 31-39.
- Camargo O.A., Alleoni L.R.F. (1997): Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas. Piracicaba: Esalq, 132p.
- Coleti J.T., Demattê J.L.I. (1982): Compactação artificial em solos: experiência e dados informativos. *Álcool e Açúcar*, 2: 34-39.
- Dias junior M.S. (2000): Compactação do solo. In: Novais R.F., Alvarez V.V.H., Schaefer C.E.G.R., eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1: 55-94.
- Doran J.W., Sarrantonio M., Liebig M. (1996): Soil health and sustainability. In: Sparks D.L. (Org.). *Advances in Agronomy* 1-54.
- Eavis B.W. (1972): Soil physical conditions affecting seedling root growth. I. Mechanical impedance, aeration and moisture availability as influenced by bulk density and moisture levels in a sandy loam soil. *Plant Soil*, 36: 613-622.
- Fernandes B., Galloway H.M., Bronson R.D., Mannering J.V. (1983) Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros, em dois solos (Typic Argiaquoll e Typic Hapludalf). *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 7: 329-333.
- Fitter A.H. (1991): Costs and benefits of mycorrhizas: Implications for functioning under natural conditions. *Experientia*, 47: 350-355.
- Foloni J.S.S., Calonego J.C., Lima S.D. (2003): Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38: 947-953.
- Garcia K., Zimmermann S.D. (2014): The role of mycorrhizal associations in plant potassium nutrition. *Frontiers in plant Science*, 5.

- Genro Junior S.A., Reinert D.J., Reichert J.M., Albuquerque J.A. (2009): Atributos físicos de um Latossolo vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. *Ciência Rural*, 39: 65-73, 2009.
- Gerdemann J.W., Nicolson T.H. (1963): Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society*, 46: 235-24.
- Giovannetti M., Mosse B. (1980): An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytologist*, 84: 489-500.
- Hamza M.A., Anderson W.K. (2005): Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil tillage Research*, 82: 121-145.
- Hanks R.J., Thorp F.C. (1956): Seedling emergence of wheat as related to soil moisture content, bulk density, oxygen diffusion rate, and crust strength. *Soil Sci. Am. Proc.*, 20: 307-309.
- Hurley B.A., Tran H.T., Marty N.J., Park J., Snedden W.A., Mullen R.T., Plaxton W.C. (2010): The dual-targeted purple acid phosphatase isozyme AtPAP26 is essential for efficient acclimation of *Arabidopsis* to nutritional phosphate deprivation. *Plant Physiology*, 153: 1112-1122.
- Imhoff S., Silva Á.D., Tormena C.A. (2000): Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35: 1493-1500.
- Jastrow J.D., Miller R.M. (1997): Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: feedbacks through organomineral associations. *Soil processes and the carbon cycle*, 207-223.
- Jenkins W.R. (1964): A rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. *Plant Disease Reporter*, 48:692.
- Johnson N.C., Pflieger F.L. (1992): Vesicular-arbuscular mycorrhizae and cultural stresses. *Mycorrhizae in sustainable agriculture*, 1: 71-99.
- Kiehl E.J. (1979): *Manual de Edafologia*. São Paulo-SP ed. Agronômica Ceres Ltda, 262p.
- Klute A. (1982): Tillage effects on the hydraulic properties of soil: a review. *Predicting tillage effects on soil physical properties and processes*. *Predictingtilla*, 29-43.
- Letey J. (1985): Relationship between soil physical properties and crop production. *Advanced in Soil Science*, 1: 277-294.
- Manjunath A., Habte M. (1991): Root morphological characteristics of host species having distinct mycorrhizal dependency. *Canadian Journal of Botany*, 69: 671-676.
- Materchera S.A., Alston A.M., Kirby J.M., Dexter A.R. (1992): Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant and Soil*, 144: 297-303.
- Medeiros R.D., Soares A.A., Guimarães R.M. (2005): Compactação do solo e manejo da água. I: Efeitos sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. *Ciência e Agrotecnologia*, 29.
- Menge J.A., Davis R.M., Johnson E.L.V., Zentmyer G.A. (1978): Mycorrhizal fungi increase growth and reduce transplant injury in avocado. *California Agriculture*, 32: 6-7.
- Mengel K., Kirkby E.A. (1987): *Principles of plant nutrition*. 4ed. Worblaunden-Bern: International Potash Institute, 687p.
- Merotto A., Mundstock C.M. (1999): Wheat root growth as affected by soil strength. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 23: 197-202.
- Morton J.B., Bentivenga S.P., Wheeler W.W. (1993): Germ plasm in the International Collection of Arbuscular and Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi (INVAM) and procedures for culture development, documentation and storage. *Mycotaxon*, 48:491-528.

- Muthukumar T., Sha L., Yang X., Cao M., Tang J., Zheng Z. (2003): Distribution of roots and arbuscular mycorrhizal associations in tropical forest types of Xishuangbanna, southwest China. *Applied Soil Ecology*, 22: 241–253.
- Neumann G., Romheld V. (1999): Root excretion of carboxylic acids and protons in phosphorus-deficient plants. *Plant and Soil*, 211: 121–130.
- Paes J.M.V., Andreola F., Brito C.H., Lourdes E.G. (1996): Decomposição da palha de café em três tipos de solo e sua influência sobre a CTC e o pH. *R. Ceres*, 43:337-392.
- Phillips J.M., Hayman D.S. (1970): Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55: 158-60.
- Ramos M.L.G, Konrad M.L.F., Silva D.E., Ribeiro Júnior W.Q. Batista L.M.T. (2012): Diversidade de fungos micorrízicos e colonização radicular, em forrageiras solteiras e em consórcio com milho. *Bioscience Journal*, 28: 235-244.
- Reeves, D.W. (1995): Soil management under no-tillage: soil physical aspects. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro Nacional de Pesquisa de Trigo, p. 127-130
- Reinert D.J., Albuquerque J.A., Reichert J.M., Aita C., Andrada M.M.C. (2008): Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32: 1805-1816.
- Rillig M.C., Mummey D.L. (2006): Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*, 171: 41-53.
- Rosolem C.A., Vale L.S.R., Grasse H.F., Moraes M.H.de. (1994): Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 18: 491-497.
- Roth C.H.,Castro-filho C., Medeiros G.B. (1992): Análise de fatores físicos e químicos relacionados com a agregação de um Latossolo Roxo distrófico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 15: 241-248.
- Russel R.S., Goss M.J. (1974): Physical aspects of soil fertility: the response of roots to the mechanical impedance. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 22.
- Sala M.G., Gasparetto N.V.L. (2010): Fragilidade ambiental dos solos em bacias hidrográficas de pequena ordem: o caso da bacia do ribeirão Maringá, PR. *Boletim de Geografia*, 28: 113–126.
- Salton J.C., Mielniczuk J., Bayer C., Boeni M., Conceição P.C., Fabricio A.C., Macedo M.C.M., Broch D.L. (2008): Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32: 11-21.
- Santos, C. (2007): Estatística Descritiva - Manual de Auto-aprendizagem, Lisboa, Edições Sílabo.
- Silva I.F., Mielniczuk J. (1997): Ação do sistema radicular de planta na formação e estabilização de agregados do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 21: 113-117.
- Silva M.G., Arf O., Sá M.E., Buzetti S. (2006): Rendimento do feijoeiro irrigado cultivado no inverno em sucessão de culturas, sob diferentes preparos do solo. *Acta Scientiarum Agronomy*, 28: 433-439.
- Siqueira J.O., Klauber-Filho O. (2000): Micorrizas arbusculares: a pesquisa brasileira em perspectiva. *Tópicos em Ciências do Solo*. 352p.
- Smith S.E., Read D.J. (2010): *Mycorrhizal symbiosis*. Academic press.
- Solos E. (1997): *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.
- Stone L.F., Guimarães C.M., Moreira J.A.A. (2002): Compactação do solo na cultura do feijoeiro: I. nas propriedades físico-hídricas do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6: 213-218.
- Taylor H.M., Roberson G.M., Parker Jr J.J. (1966): Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. *Soil Science*, 102:8-22.

- Tennant D. (1975): A test of modified line intersect method estimating root length. *Journal of Ecology*, 63: 995–1001.
- Tormena C.A., Roloff G. (1996): Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 20:333-339.
- Tormena C.A., Silva A.P., Libarde P.L. (1999): Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage system using the least limiting water range approach. *Soil and Tillage Research*, 52: 223-232.
- Tristão F.S.M., Colozzi-filho A., Machineski O. (2003): Micorrização de cafeeiro sob alta concentração de P no solo. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Ribeirão Preto. SBCS, 4p.
- Warncke D.D., Barber S.A. (1972): Diffusion of zinc in soil. I. The influence of soil moisture. *Soil Science Society of America Proceedings*, 36: 39-42.
- Wilson G.W.T., Rice C.W., Rillig M.C., Springer A., Hartnett D.C. (2009): Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: results from long-term field experiments. *Ecology Letters*, 12.
- Wright S.F., Upadhyaya A. (1996): Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Science*, 161: 575-586.

**ANEXO 1**







