

POTENCIAL DE INÓCULO MICORRÍZICO E IMPORTÂNCIA DO COMPRIMENTO DO MICÉLIO PARA A AGREGAÇÃO DE SOLOS DE AMBIENTE FLUVIAL

Joseane Gabriele Kryzozun Ribeiro Rubin⁽¹⁾ e Sidney Luiz Stürmer^{(1)*}

⁽¹⁾ Universidade Regional de Blumenau, Departamento de Ciências Naturais, Blumenau, Santa Catarina, Brasil.

* Corresponding author.

E-mail: sturmer@furb.br

RESUMO

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) desempenham importante papel nos ecossistemas naturais pelo seus impactos na nutrição vegetal e estrutura do solo. O objetivo deste estudo foi determinar o potencial do inóculo micorrízico e a relação do comprimento do micélio micorrízico (CMM) dos FMAs na agregação de solos de ambientes fluviais. Foram realizadas coletas em áreas de ambiente fluvial da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, entre os municípios de Gaspar e Navegantes, em Santa Catarina. Oito áreas foram amostradas em três classes de solos, sendo elas: Cambissolo (C), Gleissolo (G) e Organossolo (O). Nos solos coletados, foram avaliadas as seguintes variáveis: potencial de inóculo micorrízico, número de esporos, CMM e análise dos atributos físicos e químicos do solo. A porcentagem de colonização micorrízica da *Brachiaria brizantha* no ensaio do potencial de inóculo variou de 13,8 a 55,3 % e nenhum padrão foi observado de acordo com a classe de solo. O CMM no solo variou de 10,48 a 44,67 mg g⁻¹. O número de esporos em 100 cm³ de solo variou de 2,4 a 80. Foi observada correlação negativa entre o CMM e a proporção de macroagregados estáveis em água e correlação positiva entre CMM com microagregados. Este trabalho demonstrou que os solos da bacia do rio Itajaí-Açu possuem potencial de inóculo micorrízico suficiente para iniciar a colonização das raízes das plantas em curto período de tempo, o que pode ser importante facilitador no crescimento de espécies arbóreas usadas no processo de recuperação desses ambientes.

Palavras-chaves: micorrizas, colonização micorrízica, recuperação ambiental, floresta ciliar, número de esporos.

ABSTRACT: MYCORRHIZAL INOCULUM POTENTIAL AND THE IMPORTANCE OF THE MYCELIUM LENGTH FOR AGGREGATION OF RIPARIAN SOILS

*Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) play an important role in natural ecosystems as they influence plant nutrition and soil structure. The aim of this study was to determine the mycorrhizal inoculum potential and the relationship between mycorrhizal mycelium length of AMF and aggregation of riparian soils. Soil samples were collected in riparian areas in the Itajai Açu river watershed, between the municipalities of Gaspar and Navegantes, Santa Catarina, Brazil. Eight areas were sampled within three soil classes: Cambissolo (Inceptisol) (C), Gleissolo (Aquoll) (G), and Organossolo (Histosol) (O). For each area, the following measurements were made: mycorrhizal inoculum potential, number of spores, mycorrhizal mycelium length, and soil physical and chemical properties. Mycorrhizal colonization of *Brachiaria brizantha* in the inoculum potential bioassay ranged from 13.8 to 55.3 %, and no pattern was observed according to soil class. Mycorrhizal mycelium length ranged from 10.48 to 44.67 m g⁻¹, according to the area sampled. Number of spores ranged from 2.4 to 80 spores in 100 cm³ of soil. A negative correlation was observed between mycorrhizal mycelium length and the proportion of water stable macroaggregates and a positive correlation between the former and the proportion of microaggregates. Results showed that riparian soils from the Itajai Açu river watershed have a moderate to high mycorrhizal inoculum potential sufficient to start colonization of plant roots in a short period of time, an important property to facilitate growth of native woody species used in recovering these habitats.*

Keywords: mycorrhiza, mycorrhizal colonization, environmental restoration, riparian forest, number of spores.

INTRODUÇÃO

As formações florestais ao longo dos ambientes fluviais têm como função principal proteger o solo da perda de nutrientes do sistema terrestre para o aquático, pois essas áreas sofrem constantes inundações e estão sujeitas à degradação desses solos (Pasdiora, 2003). A degradação das florestas fluviais atinge todo o Brasil, de maneira que hoje essas se encontram reduzidas a fragmentos esparsos e profundamente perturbados (Carvalho et al., 2005). A retirada da floresta fluvial acarreta a degradação do solo, provocando erosão, lixiviação e perda de nutrientes (Pasdiora, 2003), bem como interferindo na microbiota do solo constituída principalmente por bactérias e fungos. Essa microbiota desempenha papel importante para o estabelecimento de espécies florestais, pois auxiliam na absorção de nutrientes pelas plantas (Moreira e Siqueira, 2006).

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs – Filo Glomeromycota) representam um grupo importante na biota do solo, pois estabelecem associação mutualista com a maioria das plantas terrestres, denominada de micorrízica arbuscular (MA). Nessa associação, os fungos transferem às raízes das plantas, pelas hifas, a água e os nutrientes minerais do solo, principalmente P, e recebem da planta os compostos de C necessários para completarem seu ciclo de vida (Smith e Read, 2008). Na associação MA, as hifas fúngicas se desenvolvem além da rizosfera, colonizando o solo, auxiliando tanto na absorção de nutrientes pelas plantas como na contribuição para melhorar a estruturação e aeração do solo (Rillig e Mummey, 2006).

Quando bem estruturados, os solos possuem agregados estáveis e poros com tamanhos diversos e têm elevada atividade microbiana, boa retenção de água e penetração das raízes, o que resulta em boa qualidade do solo (Moreira e Siqueira, 2006). Sabe-se que a agregação é essencial para manter a porosidade do solo, permitindo as trocas gasosas e a infiltração de água e facilitando os ciclos biogeoquímicos. A complexa dinâmica de agregação do solo é resultado da interação de muitos fatores físicos, químicos e biológicos; entre esses últimos, a influência das plantas e atividade microbiana (Bronick e Lal, 2005). Os FMAs associados às raízes das plantas projetam para o solo hifas que estão cobertas de polissacarídeos extracelulares, que ocupam os poros desses agregados, promovendo a estabilização dos macroagregados (Rillig e Mummey, 2006).

A estabilidade de macroagregados de vários solos está relacionada também ao comprimento de micélio fúngico no solo (Tisdall e Oades, 1979; Elliott e Coleman, 1988; Miller e Jastrow, 1990). Dentro de cada macroagregado, as hifas fúngicas podem formar uma rede de até 50 m de hifas por agregado estável (Tisdall, 1994). Essas hifas fúngicas secretam polissacarídeos e mucilagem, que contribuem para ligação de partículas do solo, captura de nutrientes e resistência à dessecação (Rillig e Mummey, 2006). Os FMAs produzem uma glicoproteína denominada glomalina, que tem sido hipotetizada servir como um agente cimentante envolvido na agregação do solo, visto sua persistência no ambiente ou sua localização nas paredes das hifas (Rillig e Steinberg, 2002; Purin e Rillig, 2007).

Tisdall (1994) encontrou estreita relação entre o comprimento total das hifas e a proporção de

agregados estáveis em água em solos da Austrália. Os FMAs influenciam diretamente na agregação, bem como nos estoques de C e N do solo, como observado em estudo desenvolvido por Wilson et al. (2009), em um experimento com queima e adubação em pradarias norte-americanas. A queima e a adubação do solo aumentaram o comprimento de hifas de FMAs e de glomalina e a quantidade de macroagregados estáveis em água no solo, evidenciando uma relação entre a abundância de hifas e agregação do solo, bem como a fixação de C e N. Essa correlação linear altamente significativa sugere que há sérias consequências com a diminuição da atividade e da riqueza específica das comunidades de FMAs nos ecossistemas. Melloni et al. (2003) observaram que o comprimento total de micélio foi reduzido em áreas de mineração, quando esse foi comparado aos das áreas sem alteração antrópica ocupadas por espécies gramínoideas, arbustivas e arbóreas. No mesmo estudo, esses autores observaram que a reabilitação de áreas mineradas com diversas espécies de gramíneas e leguminosas elevou o comprimento de micélio total no solo.

O micélio micorrízico extrarradicular, os esporos e os fragmentos de raízes colonizadas representam os propágulos que determinam o potencial de inóculo micorrízico (PIM) de determinado solo, que pode ser mensurado pela colonização micorrízica em um bioensaio com uma planta hospedeira (Moorman e Reeves, 1979) ou pelo número mais provável (Alexander, 1965). Estudos mensurando o PIM em ambientes fluviais foram feitos em outros países; entretanto, no Brasil, esses estudos são inexistentes. Harner et al. (2009) avaliaram o PIM de uma área de planície de inundação ribeirinha em Montana, Estados Unidos, e observaram que o inóculo presente no solo foi suficiente para iniciar a colonização de FMAs, e o comprimento de hifas e o número de esporos correlacionaram positivamente com o PIM. Piotrowski et al. (2008) estudaram as comunidades de FMAs em solos ao longo do rio Flathead em Montana e constataram que o maior PIM e comprimento de hifas ocorreram em áreas de estágio sucessional inicial da floresta, sugerindo que as inundações regulares e o estabelecimento de novas áreas colonizadas contribuem para o estabelecimento dos FMAs nesse ecossistema.

Em Santa Catarina, os ambientes ripários em sua maior parte são ocupados pela agricultura ou pastagem e desprovidos de sua cobertura vegetal original. Os solos de ambiente fluviais estão muito impactados em razão dos anos de uso extensivo pela agricultura, agropecuária e estabelecimento de áreas urbanas. Para recuperar essas áreas impactadas, é necessária a revegetação do ambiente, que deve considerar a microbiota do solo que influencia o crescimento de espécies arbóreas utilizadas nesse processo (Carneiro et al., 1996; Siqueira e Saggin-Junior, 2001). Embora o transplante de espécies arbóreas previamente micorrizadas seja

preconizado para revegetação, a avaliação prévia das comunidades micorrízicas em áreas ripárias pode indicar a necessidade ou não do uso de plantas micorrizadas. Assim, o objetivo deste estudo foi determinar o potencial de inóculo micorrízico e a relação do comprimento de micélio micorrízico (CMM) produzido por FMAs na agregação de diferentes classes de solos em ambiente fluvial. Nesta pesquisa, foi testada a hipótese que o comprimento do micélio micorrízico representa um fator biológico na formação de macroagregados e microagregados estáveis em água em solos ripários.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

Este estudo foi realizado na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu, dentro da região fitoecológica da Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas, que se situa dentro do Domínio Floresta Atlântica. A bacia é a maior do Estado de Santa Catarina e possui clima subtropical úmido (Cfa). A temperatura média no mês mais frio fica abaixo dos 15 °C; nos meses de verão, as médias permanecem acima de 22 °C. O regime de chuvas é uniforme, com precipitação pluviométrica média anual de 1.500 mm (Epagri, 2008).

Curcio et al. (2006) reconheceram seis compartimentos geomorfológicos distintos dentro da bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu. A área estudada fica localizada nos dois últimos compartimentos a jusante do rio, entre as cidades de Gaspar, Ilhota e Navegantes. O penúltimo compartimento é caracterizado por uma planície que está sendo edificada por sedimentos e depósitos psamopelíticos gleisados, com padrão de leito sinuoso encaixado e com solos caracterizados como Cambissolos Háplicos e Neossolos Flúvicos (Curcio et al., 2006). No último compartimento está presente a influência dos refluxos marinhos; em razão da proximidade do mar, o leito do rio possui padrão sinuoso e meandrante, e os solos são caracterizados como Neossolos Flúvicos e Gleissolos Háplicos (Curcio et al., 2006). A ocorrência dos Organossolos é muito restrita e altamente concentrada, cuja referência é a proximidade da foz do rio Itajaí, nos municípios de Navegantes e Itajaí.

Coleta das amostras de solo

Em outubro de 2010, foram selecionadas oito áreas para a coleta das amostras de dois Gleissolos (G1 e G2) e três Cambissolos (C1, C2 e C3) com pastagem e de três Organossolos (O1, O2 e O3) com floresta (Quadro 1). Em cada área, foi estabelecido um transecto de 50 m e a cada 10 m foram retiradas quatro subamostras de solo para compor uma amostra composta, totalizando assim cinco amostras compostas de solo dentro de cada área. As coletas

foram realizadas com trado, na camada de 0-20 cm. O solo foi acondicionado em sacos plásticos e mantido em geladeira a 4 °C até o uso.

Análise do potencial de inóculo micorrízico (PIM)

A análise do potencial de inóculo foi realizada para cada área de acordo com o bioensaio do potencial de colonização média descrito por Moormam e Reeves (1979). De cada amostra composta coletada em cada área, 425 mL de solo foram retirados e homogeneizados para formar uma amostra representativa de cada área, que foi diluída na proporção de 1:1 com uma mistura de areia e argila expandida (1:1) esterilizada em autoclave por 30 min a 120 °C. Em seguida, essa mistura foi acondicionada em tubetes plásticos de 270 mL, onde foi semeada *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) Stapf. Após uma semana, foi feito o desbaste, deixando uma planta por tubete. O bioensaio de cada área amostrada foi composto por cinco repetições.

Após 30 dias, as raízes de *B. brizantha* foram separadas da parte aérea e lavadas para retirar o excesso de solo. Após, as raízes foram armazenadas em água e mantidas em geladeira a 4 °C por 14 dias. As raízes foram descoloridas como descrito por Koske e Gemma (1989), e a porcentagem de colonização micorrízica foi mensurada utilizando o método proposto por Giovannetti e Mosse (1980). A porcentagem de colonização micorrízica foi utilizada como uma medida do PIM.

Determinação do comprimento de micélio micorrízico (CMM) e total (CMT)

A quantificação do comprimento de micélio micorrízico (CMM) e total (CMT) no solo foi feita após peneiramento úmido e filtração em membranas de celulose quadriculadas, de acordo com método proposto por Melloni e Cardoso (1999). Para cada uma das 45 amostras de solo, duas subamostras de 10 g cada foram retiradas. Uma dessas foi reservada para determinar a umidade após a secagem em

estufa de circulação durante 72 h a 70 °C. A outra subamostra foi utilizada para extrair e mensurar o comprimento do micélio. Inicialmente, o solo foi suspenso em 1,5 L de água, e o sobrenadante passado em peneiras sobrepostas, com malhas de 710 e 180 µm. O filtrado coletado foi submetido à agitação em liquidificador (marca Philips Walita, modelo R12084), durante 30 s na menor velocidade. A amostra foi deixada em repouso por 2 min; após esse tempo, foi separada uma alíquota de 500 mL de sobrenadante, que foi filtrada novamente em peneira de 45 µm. Uma alíquota do material retido na peneira foi coletada em becker e completado com água destilada até 11 mL. Em 5 mL dessa alíquota, foi adicionado 1 mL HCl 1 % por 5 min e, após, a amostra foi corada por 10 min com 2 mL de Azul de Tripán 0,05 % aquecido por 15 s em micro-ondas (marca Panasonic, modelo NN-562BK). Após a alíquota ter sido corada, essa foi submetida à filtragem a vácuo em membrana de triacetato de celulose, com diâmetro de 4,7 cm e porosidade de 0,45 µm.

Em seguida, a membrana foi colocada sob lâmina de vidro de 5 × 5 cm e lubrificada com uma gota de óleo de amêndoas, para facilitar a visualização no microscópio óptico. Foram avaliados 64 campos em cada membrana, determinando-se o número de interseções de hifas com as linhas horizontais de um *grid* (8 × 8) na ocular do microscópio. O CMM, expresso em m de hifas por g de solo seco, foi obtido pela seguinte relação, adequada ao microscópio utilizado (marca Carl Zeiss, modelo Axiostar plus), no aumento de 50×:

$$C = [(0,23562 \times N) / (10-U)],$$

em que C = comprimento de micélio no solo seco (m g⁻¹); N = soma do número de interseções entre as hifas e linhas horizontais do *gride*; e U = umidade da amostra de solo (g de água).

Na análise, foi mensurado o comprimento de micélio total (CMT) e comprimento de micélio micorrízico (CMM).

Quadro 1. Caracterização química do solo das áreas de Gleissolos (G1-G2), Cambissolos (C1 a C3) e Organossolos (O1 a O3)

| Solo | pH (H ₂ O) | P | K | CO | Al ³⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | CTC |
|------|-----------------------|---------------------|--------|--------------------|------------------------------------|------------------|------------------|-------|
| | | mg dm ⁻³ | | g kg ⁻¹ | cmol _c dm ⁻³ | | | |
| G1 | 5,14 | 21,64 | 346,80 | 250 | 0,38 | 3,36 | 2,76 | 10,79 |
| G2 | 3,82 | 14,14 | 89,28 | 106 | 2,58 | 1,38 | 0,78 | 14,42 |
| C1 | 5,00 | 11,58 | 73,44 | 168 | 0,82 | 3,56 | 1,92 | 9,62 |
| C2 | 5,00 | 6,12 | 151,84 | 238 | 1,66 | 3,36 | 2,04 | 12,40 |
| C3 | 5,16 | 18,72 | 199,04 | 258 | 0,60 | 5,06 | 1,92 | 10,98 |
| O1 | 3,98 | 8,94 | 92,00 | 850 | 5,16 | 0,64 | 0,62 | 28,95 |
| O2 | 4,10 | 12,72 | 105,44 | 916 | 4,48 | 0,94 | 1,14 | 26,99 |
| O3 | 4,18 | 8,70 | 103,84 | 834 | 5,38 | 1,58 | 0,76 | 22,80 |

MO: matéria orgânica; CTC: capacidade de troca catiônica. P e K: extraído com solução extratora Mehlich-1; Al, Ca e Mg: extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹; CO: determinado com solução sulfocrômica em meio ácido.

Contagem e identificação de esporos de FMAs

A extração dos esporos de FMAs foi feita pelo método de peneiramento úmido descrito por Gerdemann e Nicolson (1963), seguido por centrifugação em gradiente de sacarose 20 e 60 %. Uma subamostra (50 g de solo) de cada amostra composta foi suspensa em 2 L de água por agitação, e a suspensão passada por peneiras sobrepostas de 710 e 45 μm . O material retido na peneira de 45 μm foi transferido para tubos de 50 mL, contendo o gradiente de sacarose e centrifugado a 2.000 rpm durante 1 min (centrifuga marca Celm, modelo LS-3 Plus). O material retido na peneira de 45 μm foi lavado com água de torneira para retirar o excesso de sacarose e transferido para placas quadriculadas para a contagem. Após realizada a contagem, os esporos foram separados e coletados para a montagem de lâminas e identificação das espécies.

Análises químicas e físicas do solo

As análises químicas realizadas no solo de cada uma das áreas estão apresentadas no quadro 1. As análises foram realizadas pelo Laboratório da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri) em Chapecó, SC. Foram utilizadas as normas da Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo e de Tecido Vegetal dos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (ROLAS), conforme descrito em Tedesco et al. (1995).

Para a quantificação do carbono orgânico (CO), foi utilizado o método de oxidação do C por solução sulfocrômica com calor externo e a determinação por espectrofotometria (Tedesco et al., 1995).

As análises físicas compreenderam a determinação da granulometria (areia total, silte e argila) pelo Método da Pipeta, e a quantificação dos agregados estáveis em água (via úmida), dividida nas seguintes classes de macroagregados (> 2.000 e $250-2.000 \mu\text{m}$) e de microagregados ($53-250$ e $< 53 \mu\text{m}$). As análises foram realizadas no Laboratório da Epagri de Campos Novos, SC, também seguindo o método ROLAS descrito em Tedesco et al. (1995).

Análise estatística

Os dados obtidos de colonização micorrízica no ensaio do PIM, dos números de esporos de FMAs, do CMM e CMT, bem como das quantidades de C e N orgânico e da proporção das diferentes classes de agregados entre as diferentes áreas, foram comparados utilizando análise da variância e as médias separadas, utilizando-se o teste de Scott-Knott. Os dados de porcentagem de colonização micorrízica e da proporção de agregados estáveis em água foram transformados (arcoseno da raiz quadrada), bem como o número de esporos ($\log x+1$) previamente às análises. Matriz de correlação entre

as variáveis bióticas (CMM e CMT) e abióticas (C e N orgânico e proporção das diferentes classes de agregados) foi estabelecida usando o coeficiente de correlação de Pearson. O teste de Jackknife foi utilizado para detectar possíveis *outliers*, e esses foram removidos das análises. Para a realização das análises estatísticas, utilizou-se o *software* JMP® (SAS, 2002).

RESULTADOS

No bioensaio do potencial de inóculo micorrízico (PIM), a porcentagem de colonização micorrízica em raízes de braquiária variou significativamente entre as diferentes áreas amostradas (Figura 1a). As plantas no bioensaio da área G1 apresentaram a maior colonização (55,3 %) e diferiram significativamente das plantas das demais áreas. A porcentagem de colonização de *B. brizantha* não diferiu significativamente entre as áreas G2, C1, C2, O1, O2 e O3, cujos valores variaram de 30,9 a 35,1 %. O menor valor de porcentagem de colonização foi encontrado em plantas do bioensaio de uma área de Cambissolo (C3) (Figura 1a).

O número de esporos de FMAs em 100 cm^3 de solo foi significativamente diferente entre as áreas e variou de 2,4 a 80 esporos (Figura 1b). Os maiores valores de esporos foram encontrados em duas áreas de Cambissolo (C1 e C2) e uma área de Organossolo (O1). Os menores valores de esporos foram encontrados em Organossolos (O2 e O3) (Figura 1b). Um total de 19 espécies de FMAs foi detectado nos solos das diferentes áreas amostradas, havendo predominância de espécies dos gêneros *Acaulospora* e *Glomus* (Quadro 2).

O CMT e CMM variaram significativamente entre as áreas e não seguiram nenhum padrão por classe de solo (Figura 2). O CMT variou de 41,0 a 60,8 m g^{-1} , em áreas de Gleissolo; de 14,20 a 40,5 m g^{-1} , em Cambissolo; e de 22,6 a 62,5 m g^{-1} , em Organossolo (Figura 2a). O CMM também variou significativamente entre as áreas, e os maiores valores foram encontrados para G2 (39,7 m g^{-1}), O1 (44,6 m g^{-1}) e O2 (36,9 m g^{-1}), que diferiram estatisticamente das demais áreas (Figura 2b).

O teor de carbono orgânico (CO) foi significativamente superior nas áreas de Organossolo (49,3 a 53,1 g kg^{-1}), comparando as demais áreas que variaram de 6,1 a 14,9 g kg^{-1} (Quadro 3). O maior teor de N orgânico foi encontrado na área O3 de Organossolo (5,94 g kg^{-1}) e diferiu significativamente das demais áreas. O N orgânico também variou significativamente entre as áreas dentro da mesma classe de solo. A proporção de agregados estáveis em água na classe $> 2000 \mu\text{m}$ foi significativamente maior nas áreas de Organossolos (O1, O2 e O3). Entretanto, essas áreas apresentaram os menores

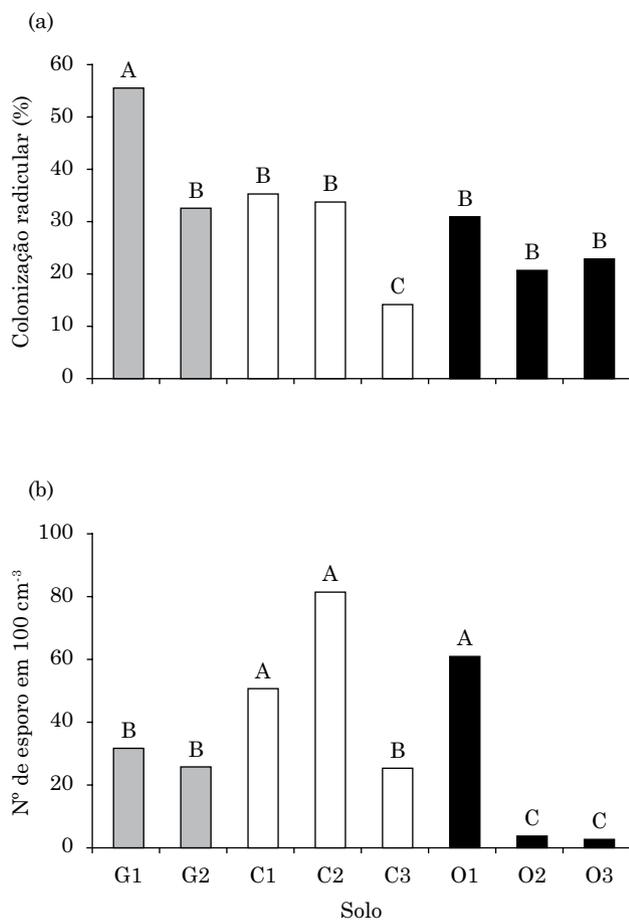


Figura 1. Porcentagem de colonização micorrízica de *Brachiaria brizantha* no bioensaio do potencial de inóculo micorrízico (a) e número de esporos de fungos micorrízicos arbusculares (b) em áreas amostradas de Gleissolos (G1-G2), Cambissolos (C1 a C3) e Organossolos (O1 a O3). Barras seguidas pelas mesmas letras não diferem significativamente ($p < 0,05$) pelo teste de Scott-Knott.

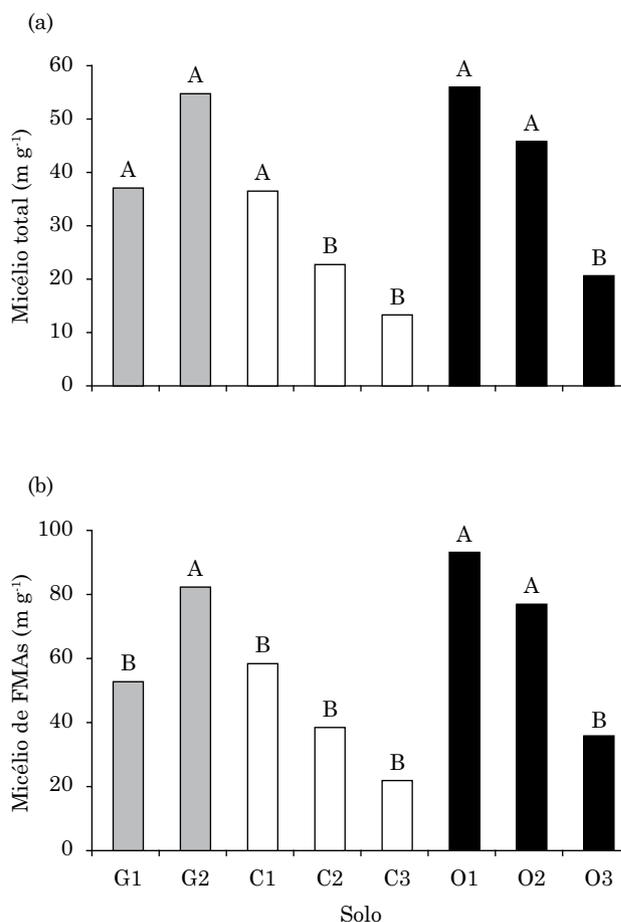


Figura 2. Comprimento de micélio total (a) e comprimento de micélio micorrízico de FMAs (b) em áreas amostradas de Gleissolos (G1-G2), Cambissolos (C1 a C3) e Organossolos (O1 a O3). Barras seguidas pelas mesmas letras não diferem significativamente ($p < 0,05$) pelo teste de Scott-Knott.

Quadro 2. Espécies de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) encontradas em áreas de Gleissolos (G1-G2), Cambissolos (C1 a C3) e Organossolos (O1 a O3)

| Solo | Espécie de FMAs |
|------|---|
| G1 | <i>Gigaspora</i> sp1. |
| G2 | <i>Acaulospora colombiana</i> (Spain & Schenck) Kaonongbua, Morton & Bever, <i>Rhizophagus clarus</i> (Nicolson & Schenck) Walker & Schuessler |
| C1 | <i>Gigaspora</i> sp1, <i>Glomus</i> sp1., <i>Dentiscutata heterogama</i> (Nicol. & Gerdemann) Sieverding, Souza & Oehl |
| C2 | <i>Acaulospora</i> sp1, <i>Glomus</i> sp2., <i>Acaulospora</i> sp2., <i>Cetraspora pellucida</i> (Nicol. & Schenck) Oehl, Souza & Sieverding |
| C3 | <i>Acaulospora scrobiculata</i> Trappe, <i>Acaulospora</i> sp2., <i>Ambispora leptoticha</i> (Schenck & Smith) Walker, Vestberg & Schuessler, <i>Acaulospora spinosa</i> Walker & Trappe, <i>Funneliformis mosseae</i> (Nicolson & Gerd.) Walker & Schuessler, <i>Acaulospora laevis</i> Gerdemann & Trappe, <i>Rhizophagus clarus</i> (Nicolson & Schenck) Walker & Schuessler |
| O1 | <i>Acaulospora foveata</i> Trappe e Janos, <i>Glomus</i> sp4, <i>Acaulospora</i> sp2. |
| O2 | <i>Acaulospora</i> sp2., <i>Acaulospora mellea</i> Spain & Schenck |
| O3 | <i>Glomus</i> sp5. |

valores na proporção de agregados na classe de tamanho 250-2.000 µm (Quadro 3). Não houve diferenças significativas entre áreas de Gleissolo e Cambissolos para a proporção de agregados na classe de 250-2.000 µm. A área G2 apresentou significativamente maior proporção de agregados na classe de 53-250 µm, seguidas pelas áreas G1, C1 e C3. Para essa classe de tamanho de agregados, não houve diferenças significativas entre as áreas ocupadas por Organossolos, as quais apresentaram os menores valores (1,3 a 3,2 %). Não houve diferença significativa entre as diferentes áreas para a classe de agregados < 53 µm (Quadro 3).

O teor de CO no solo teve correlação positiva (r = 0,60, p < 0,01) com a proporção de macroagregados (> 250 µm) e correlação negativa (r = -0,76, p < 0,01) com a proporção de microagregados (< 250 µm) (Quadro 4). O CMT apresentou correlação negativa e significativa apenas com magroagregados (r = -0,36, p < 0,05), enquanto o CMM correlacionou-se negativamente com macroagregados (r = -0,41, p < 0,05) e positivamente com microagregados (r = 0,36, p < 0,05) (Quadro 4).

DISCUSSÃO

Este estudo avaliou diferentes propriedades biológicas das comunidades de fungos micorrízicos

arbusculares (FMAs), ocorrendo em distintas classes de solos de ambientes fluviais na bacia do rio Itajaí-Açu, em Santa Catarina. No Brasil, este representa o primeiro trabalho avaliando o PIM em solos de ambientes fluviais, e pelo menos uma área amostrada apresentou PIM superior às demais áreas dentro da mesma classe de solo. Os valores de porcentagem de colonização de *B. brizantha* no bioensaio do PIM variaram, para a maior parte das áreas, de 30 a 55 %. O bioensaio utilizado neste estudo foi o proposto por Moorman e Reeves (1979), que permite avaliação rápida e comparativa do PIM com base na porcentagem de colonização micorrízica em uma planta hospedeira após 30 dias. Os dados na literatura sobre o PIM em áreas ripárias são escassos, e apenas dois estudos feitos no rio Flathead em Montana, nos Estados Unidos, puderam ser utilizados para comparação. Harner et al. (2009), usando um método similar para mensurar o PIM, encontraram valores de 3 a 24 % de colonização micorrízica em sedimentos de planícies aluviais e constataram que houve variações no PIM de acordo com a área amostrada. Piotrowski et al. (2008), estudando uma cronosequência de inundação nesse rio, observaram que o PIM aumentou rapidamente (42 a 57 % de colonização) entre 4 e 9 anos e depois declinou (10 a 30 % de colonização) entre 13 e 65 anos. Os maiores valores encontrados neste estudo comparado àqueles encontrados no rio Flathead pode ser em razão da presença de vegetação (pastagem ou floresta), que garante condições para

Quadro 3. Carbono e nitrogênio orgânico e proporção da distribuição dos macro e microagregados estáveis em água (AEA) nas diferentes áreas de Gleissolos (G1-G2), Cambissolos (C1 a C3) e Organossolos (O1 a O3)

| | G1 | G2 | C1 | C2 | C3 | O1 | O2 | O3 |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| C org (g kg ⁻¹) | 14,5 c | 6,1 d | 9,8 d | 13,8 c | 14,9 c | 49,3 b | 53,1 a | 48,4 b |
| N org (g kg ⁻¹) | 3,32 b | 0,86 c | 1,94 c | 2,34 b | 1,64 c | 2,64 c | 3,48 b | 5,94 a |
| AEA (%) | | | | | | | | |
| > 2.000 µm | 29,9 c | 16,9 d | 21,8 d | 37,9 b | 17,9 d | 51,8 a | 51,1 a | 54,7 a |
| 2.000-250 µm | 41,2 a | 44,3 a | 41,7 a | 35,2 a | 50,5 a | 25,8 b | 25,1 b | 21,8 b |
| 250-53 µm | 16,0 b | 34,2 a | 23,7 b | 9,5 c | 21,1 b | 3,2 d | 1,8 d | 1,3 d |
| < 53 µm | 15,2 a | 13,2 a | 19,3 a | 17,7 a | 13,8 a | 13,1 a | 16,5 a | 17,0 a |

Médias (n = 5) para cada atributo na linha seguidas por letras iguais não diferem significativamente (p < 0.05) pelo teste de Scott-Knott.

Quadro 4. Coeficiente de correlação de Pearson entre comprimento de micélio total (CMT) e micorrízico (CMM) com carbono orgânico (C org) e nitrogênio orgânico (N org) e proporção de macroagregados (Macro) e microagregados (Micro) em solos ripários em Santa Catarina

| | CMT | CMM | C org | N org | Macro | Micro |
|-------|--------|--------|---------|-------|---------|-------|
| CMT | 1,00 | | | | | |
| CMM | 0,95 | 1,00 | | | | |
| C org | -0,19 | -0,18 | 1,00 | | | |
| N org | -0,35 | -0,35 | 0,33 | 1,00 | | |
| Macro | -0,36* | -0,41* | 0,60** | 0,26 | 1,00 | |
| Micro | 0,31 | 0,36* | -0,76** | -0,35 | -0,92** | 1,00 |

*significativo a 0,01 < p < 0,05; e **significativo a p < 0,01.

a manutenção da simbiose micorrízica nessas áreas. Considerando que os FMAs são biotróficos obrigatórios, a presença de raízes garante a produção de propágulos infectivos de FMAs (micélio, esporos, raízes micorrizadas), que contribuem para o PIM.

Os valores obtidos no bioensaio do PIM indicaram que nos solos ripários avaliados os propágulos das comunidades de FMAs estão ativos e em níveis adequados para iniciar a colonização micorrízica em um prazo relativamente curto. O bioensaio para mensurar o PIM pode ser utilizado como bioindicador da qualidade do solo no que se refere às comunidades de FMAs. As áreas amostradas em Cambissolo e Gleissolo eram originalmente cobertas por vegetação pertencente à Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas (Klein, 1978) e atualmente são ocupadas por pastagens. A restauração dessas áreas é geralmente feita pelo transplante de mudas de espécies arbóreas nativas pioneiras ou secundárias iniciais, que são dependentes da simbiose micorrízica para o seu crescimento (Carneiro et al., 1996; Zangaro et al., 2000; Siqueira e Saggin-Junior, 2001). Do ponto de vista prático, o PIM encontrado nessas áreas sugere que inóculo de FMAs está disponível nessas áreas para que plantas pioneiras ou secundárias iniciais estabeleçam a simbiose micorrízica, garantindo auxílio no crescimento e na absorção de nutrientes. Embora o uso de mudas micorrizadas seja preconizado para a revegetação de áreas, uma análise prévia das comunidades fúngicas micorrízicas, por exemplo, pela mensuração do PIM, é desejável para avaliar a atividade e viabilidades das populações de FMAs.

O número de esporos de FMAs encontrados nas áreas amostradas foi muito baixo, variando de 2,4 a 80 esporos em 100 cm⁻³ de solo. Resultados semelhantes foram encontrados por Harner et al. (2009) em sedimentos aluviais, cujo número de esporos encontrados variou de 10-120 esporos em 100 cm³ de solo. No Brasil, em áreas de mata ciliar revegetadas no rio Mogi-Guaçu, Carrenho et al. (2001) observaram que o número total de esporos variou de acordo com o estágio sucessional ao qual a planta hospedeira avaliada pertencia: 85 esporos em 100 cm³ em *Croton* (pioneira), 212 esporos em 100 cm³ em *Inga* (secundária inicial) e 511 esporos em 100 cm³ em *Genipa* (clímax). Além do baixo número de esporos encontrados neste estudo, a riqueza específica de FMAs dentro de cada área amostrada foi baixa. No total, 19 espécies de FMAs pertencentes a oito gêneros foram encontradas. Estudos em áreas ripárias indicam que as comunidades de FMAs são compostas por 15 (Kennedy et al., 2002) a 22-27 espécies (Carrenho et al., 2001; Beauchamp et al., 2006; Pagano e Cabello, 2012). Similar a outros estudos em áreas ripárias no Brasil (Carrenho et al., 2001, Pagano e Cabello, 2012), as comunidades de FMAs em áreas de Gleissolo, Cambissolo e Organossolo neste estudo foram dominadas por espécies pertencentes aos gêneros *Glomus* e *Acaulospora*.

Em áreas ripárias, a superfície do solo poder ser eventualmente saturada de água quando houver transbordamento do rio, processo que pode criar condições anaeróbicas e restritivas à esporulação dos FMAs (Mosse et al., 1981). Além disso, o alto teor de matéria orgânica no solo favorece a proliferação de microrganismos saprofíticos (Moreira e Siqueira, 2006), que podem atuar como parasitas dos esporos de FMAs. Esses dois fatores ecológicos podem ser responsáveis pela redução na esporulação dos FMAs em ambiente ripários.

Similar ao encontrado para o PIM e número de esporos, o CMM e CMT variaram entre as áreas dentro da mesma classe de solo, com valores médios encontrado neste estudo superiores àquele encontrado por Harner et al. (2009) para áreas ripárias (0,0-0,48 m g⁻¹). Os valores mensurados de CMM foram relativamente altos, alcançando em algumas áreas 40 m g⁻¹, e similares àqueles observados em áreas de pradarias norte-americanas (Wilson et al., 2009) e de solos minerados com diferentes coberturas (Melloni et al., 2003). O método proposto para extrair e mensurar o CMM e CMT apresentado por Melloni e Cardoso (1999) foi empregado com sucesso nas diferentes áreas amostradas, apesar das diferenças no teor de C orgânico encontrado entre os Organossolos comparativamente aos Gleissolos e Cambissolos (Quadro 1). O micélio é um dos propágulos dos propágulos dos FMAs responsáveis por iniciar a colonização micorrízica, contribuindo assim para o PIM; porém, são poucos os trabalhos que mensuram esse componente das comunidades de FMAs, possivelmente em razão da dificuldade de extração e identificação desse micélio, relativamente ao micélio dos demais fungos do solo (Melloni e Cardoso, 1999). A separação do micélio de FMAs do micélio de outros grupos de fungos, em amostras do campo, é uma dificuldade encontrada e pode explicar a correlação positiva e significativa entre CMM e CMT, como encontrado neste estudo (Quadro 4).

Uma correlação significativa entre o CMM e a proporção de macro e microagregados foi encontrada neste estudo, corroborando a hipótese apresentada que o micélio micorrízico representa um fator biológico na formação de agregados estáveis em água em solos ripários. No entanto, dois aspectos chamam a atenção neste estudo na relação entre CMM e agregação do solo. Primeiro, os coeficientes de correlação entre CMM e proporção de macro e microagregados foram baixos (-0,41 e 0,36, respectivamente), sugerindo que, em solos ripários, outros fatores além dos microbiológicos, podem estar contribuindo primariamente para a formação de agregados estáveis. A agregação do solo é promovida por processos físico-químicos e biológicos do solo e representa uma característica física importante que influencia algumas funções do solo (Braidá et al., 2011). A matéria orgânica é um dos principais componentes que interferem

na agregação do solo, influencia na formação e estabilização dos agregados (Bronick e Lal, 2005) e é constatada para solos ripários analisados neste estudo, considerando que a quantidade de CO no solo teve coeficiente de correlação maior com a proporção de agregados estáveis em água do que o CMM (Quadro 4). Um segundo aspecto é que a correlação entre CMM e macroagregados foi negativa e com microagregados foi positiva, padrão totalmente oposto ao registrado na literatura para solos de regiões temperadas (Rillig e Steinberg, 2002; Wilson et al., 2009). De maneira geral, os microagregados são decorrentes de processos físico-químicos, enquanto os macroagregados são resultantes da ação biológica de raízes, hifas fúngicas e polissacarídeos microbianos (Braida et al., 2011). Essa correlação inversa observada entre CMM e agregados do solo pode indicar que, em solos ripários, outros fatores como a quantidade de glomalina produzida pelos FMAs pode ter papel maior na agregação do solo do que o CMM (Rillig et al., 2001; Rillig e Steinberg, 2002). Rillig e Steinberg (2002) observaram que o efeito direto da glomalina foi muito mais forte do que o efeito direto das hifas de FMAs, indicando que essa glicoproteína está envolvida em um importante mecanismo de estabilização de agregação do solo, para a classe de agregados com tamanho de 1-2 mm.

CONCLUSÕES

As comunidades de FMAs em áreas ripárias ocupadas por floresta ou por pastagem possuem moderado a alto potencial de inóculo micorrízico, sugerindo que a recuperação dessas áreas com o transplante de espécies arbóreas pode ser realizada sem a necessidade de inoculação prévia de mudas no viveiro.

A baixa correlação entre o comprimento de micélio micorrízico e a proporção de agregados estáveis em água sugere que outros fatores atuam de forma predominante nesses solos para garantir a sua estruturação.

Estudos analisando vários aspectos funcionais e estruturais das comunidades de FMAs, como o realizado neste estudo, são importantes para se obter uma visão holística da influência desses fungos no estabelecimento de espécies no campo e nos processos físicos e químicos do solo.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pela bolsa de Mestrado concedida à primeira autora. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela Bolsa de Produtividade (Processo 302343/2012-1

do segundo autor. Ao Dr. Cláudio Roberto Fonseca Souza Soares e à Dra. Sonia Purin (UFSC), pelas sugestões e pelo auxílio nas análises estatísticas. Ao Francisco Carneiro, à Gessiane Ceola e à Andreza Pozzan, pelo auxílio na coleta dos solos e na mensuração de micélio extrarradicular.

REFERÊNCIAS

- Alexander M. Most probable number method for microbial populations. In.: Black CA, Evans DD, Ensminger LE, White JL, Clark FE, editors. Methods of soil analysis: Chemical and microbiological properties. Madison: American Society of Agronomy; 1965. Part 2, p.1467-72.
- Beauchamp VB, Stromberg JC, Stutz JC. Arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Populus-Salix* stands in a semiarid riparian ecosystem. *New Phytol.* 2006;170:369-80.
- Braida JA, Bayer C, Albuquerque JA, Reichert JM. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. In: Klauberg-Filho O, Mafra AL, Gatiboni LC, editores. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2011. v.7, p.221-77.
- Bronick CJ, Lal R. Soil structure and management: A review. *Geoderma.* 2005;124:3-22.
- Carneiro MAC, Siqueira JO, Davide AC, Gomes LJ, Curi N, Vale FR. Fungo micorrízico e superfosfato no crescimento de espécies arbóreas tropicais. *Sci For.* 1996;50:21-36.
- Carrenho R, Trufem SFB, Bononi VLR. Fungos micorrízicos arbusculares em rizosferas de três espécies de fitobiontes instaladas em área de mata ciliar revegetada. *Acta Bot Bras.* 2001;15:115-24.
- Carvalho DA, Oliveira-Filho AT, Vilela EA, Curi N, Van Den Berg E, Fontes MAL, Botezeli L. Distribuição de espécies arboreo-arbustivas ao longo de um gradiente de solos e topografia em um trecho de floresta ripária do Rio São Francisco em Três Marias, MG, Brasil. *R Bras Bot.* 2005;28:329-45.
- Curcio GR, Uhlmann A, Sevegnani L. A Geopedologia e sua influência sobre espécies arbóreas de florestas fluviais. Colombo: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária; 2006.
- Elliott ET, Coleman DC. Let the soil work for us. *Ecol Bull.* 1998;39:23-32.
- Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina - Epagri. Atlas climatológico do Estado de Santa Catarina [atlas]; 2008 [acesso em 20 set. 2010]. Disponível em: http://ciram.epagri.rct-sc.br/index.php?option=com_content&view=article&id=708&Itemid=484
- Gerdemann JW, Nicolson TH. Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Trans Brit Mycol Soc.* 1963;46:235-44.
- Giovannetti M, Mosse B. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. *New Phytol.* 1980;84:489-500.
- Harner MJ, Piotrowski JS, Lekberg Y, Stanford JA, Rillig MC. Heterogeneity in mycorrhizal inoculum potential of flood-deposited sediments. *Aquat Sci.* 2009;71:331-7.

- Kennedy LJ, Tiller RL, Stutz JC. Associations between arbuscular mycorrhizal fungi and *Sporobolus wrightii* in riparian habitats in arid South-western North America. *J Arid Environ.* 2002;50:459-475.
- Koske RE, Gemma JN. A modified procedure for staining roots to detect VA micorrizas. *Mycol Res.* 1989;92:486-8.
- Klein RM. Mapa fitogeográfico do estado de Santa Catarina. In: Reitz R, editor. *Flora Ilustrada Catarinense*. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues; 1978. p.1-25.
- Melloni R, Cardoso EJB. Quantificação de micélio extraradicular de fungos micorrízicos arbusculares em plantas cítricas e endófitos. I. Método empregado. *R Bras Ci Solo.* 1999;23:53-8.
- Melloni R, Siqueira JO, Moreira FMS. Fungos micorrízicos arbusculares em solos de área de mineração de bauxita em reabilitação. *Pesq Agropec Bras.* 2003;38:267-76.
- Miller RM, Jastrow JD. Hierarchy of root and mycorrhizal fungal interactions with soil aggregation. *Soil Biol Biochem.* 1999;22:579-84.
- Moreira FMS, Siqueira JO. *Microbiologia e bioquímica do solo*. Lavras: Universidade Federal de Lavras; 2006.
- Mosse B, Stribley DP, Le Tacon F. Ecology of mycorrhizae and mycorrhizal fungi. *Adv Microbiol Ecol.* 1981;5:137-210.
- Moorman T, Reeves FB. The role of endomycorrhizae in revegetation practices in the semi-arid west. II. A bioassay to determine the effect of land disturbance on endomycorrhizal populations. *Am J Bot.* 1979;66:14-8.
- Pagano MC, Cabello MN. Mycorrhizas in natural and restored riparian zones. In: Pagano M, editor. *Mycorrhiza: Occurrence in natural and restored environments*. New York: Nova Science Publishers; 2012. p.291-316.
- Pasdiara AL. *Florística e fitossociologia de um trecho de floresta ripária em dois compartimentos ambientais do Rio Iguaçu, Paraná, Brasil [dissertação]*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2003.
- Piotrowski JS, Lekberg Y, Harner MJ, Ramsey PW, Rillig MC. Dynamics of mycorrhizae during development of riparian forests along an unregulated river. *Ecography.* 2008;31:245-53.
- Purin S, Rillig MC. The arbuscular mycorrhizal fungal protein glomalin: Limitations, progress, and a new hypothesis for its function. *Pedobiologia.* 2007;51:123-30.
- Rillig MC, Wright SF, Nichols KA, Schmidt WF, Torn MS. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. *Plant Soil.* 2001;233:167-77.
- Rillig MC, Steinberg PD. Glomalin production by an arbuscular mycorrhizal fungus: A mechanism of habitat modification? *Soil Biol Biochem.* 2002;34:1371-4.
- Rillig MC, Mummey DL. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytol.* 2006;171:41-53.
- Statistical Analysis System - SAS. *SAS/STAT procedure guide for personal computers*. Cary: Statistical Analysis System Institute; 2002.
- Siqueira JO, Saggin-Junior O. Dependency of arbuscular mycorrhizal fungi and responsiveness of some Brazilian native woody species. *Mycorrhiza.* 2001;11:245-55.
- Smith SE, Read DJ. *Mycorrhizal symbiosis*. Amsterdam: Elsevier; 2008.
- Tedesco MJ, Gianello C, Bissani CA, Bohnen H, Volkweiss SJ. *Análises de solo, plantas e outros materiais*. 2ª ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 1995.
- Tisdall JM, Oades JM. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. *Aust J Soil Res.* 1979;17:423-41.
- Tisdall JM. Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant Soil.* 1994;159:115-21.
- Zangaro W, Bononi VLR, Trufen SFB. Mycorrhizal dependency, inoculum potential and habitat preference of native woody species in south Brazil. *J Trop Ecol.* 2000;16:603-21.
- Wilson GWT, Rice CW, Rillig MC, Springer A, Hartnett DC. Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: Results from long-term field experiments. *Ecol Lett.* 2009;12:452-61.