

USO DE ECTOMICORRIZAS NA BIORREMEDIAÇÃO FLORESTAL

ECTOMYCORRHIZAL USE FOR FOREST BIOREMEDIATION

Alvaro Boson de Castro Faria¹ Pedro Henrique Riboldi Monteiro² Celso Garcia Auer³
Alessandro Camargo Ângelo⁴

RESUMO

Este artigo apresenta uma revisão sobre as micorrizas e aspectos relacionados com seu uso em espécies florestais e na biorremediação. As informações obtidas na literatura já comprovaram que os fungos ectomicorrízicos podem ser muito importantes no estímulo ao crescimento de mudas e árvores. Quanto à biorremediação, estes fungos são promissores na capacidade de degradar poluentes em solos contaminados. Nesse sentido, são apresentados os benefícios e usos destes microrganismos e as características das ectomicorrizas (ECM), que são promissoras para uso nestes processos. Apresentam-se informações sobre o uso potencial de ECM para a remediação de poluentes orgânicos persistentes e de metais pesados, bem como alguns resultados já pesquisados. Demonstra-se que, internacionalmente, o enfoque das pesquisas sobre micorrizas tem se dado com novas perspectivas, além do uso convencional para o favorecimento do crescimento das plantas.

Palavras-chave: recuperação de áreas contaminadas; simbiose; fungos; biotecnologia.

ABSTRACT

This article presents an overview of the aspects of mycorrhizas and their use in forest species and bioremediation. The information gathered from the literature had already indicated that ectomycorrhizal fungi may be very important to stimulate the growth of seedlings and trees. As for bioremediation, these fungi are promising in the ability to degrade pollutants in contaminated soils. In this sense, the benefits and uses of these microorganisms, and the characteristics of ectomycorrhizae (ECM) are presented herein, which are promising for use in these processes. Also, information on the potential use of ECM for the remediation of persistent organic pollutants and heavy metals is presented, as well as some results already searched. It is shown that internationally, the focus of the research on mycorrhizae has occurred with new perspectives, beyond the conventional use to stimulate plant growth.

Keywords: recovery of contaminated areas; symbiosis; fungi; biotechnology.

INTRODUÇÃO

Micorriza é uma simbiose entre as raízes de plantas com fungos que intercambiam mutualisticamente tanto água quanto nutrientes do solo, beneficiando ambas as partes. Trata-se de um fenômeno frequente em todos os ecossistemas naturais, sendo exceções as espécies de plantas que não estabelecem este tipo de associação (PEREZ-MORENO; READ, 2004). Para Trajano et al. (2001), as associações micorrízicas

1 Engenheiro Florestal, Dr., Professor Adjunto do curso de Engenharia Florestal, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Estrada para Boa Esperança km 4, CEP 85660-000, Dois Vizinhos (PR), Brasil. alvarob@utfpr.edu.br

2 Engenheiro Florestal, MSc., Discente de Pós Graduação do Centro de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Paraná, Rua Lothário Meissner, 900, Jardim Botânico, CEP 80210-170, Curitiba (PR), Brasil. pedro.monteiro@ufpr.br

3 Engenheiro Florestal, Dr., Pesquisador da Embrapa Florestas, Km 111 da Estrada da Ribeira, Cx Postal 319, CEP 83411-000, Colombo (PR), Brasil. celso.auer@embrapa.br

4 Engenheiro Florestal, Dr., Professor Associado do Centro de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Paraná, Rua Lothário Meissner, 900, Jardim Botânico, CEP 80210-170, Curitiba (PR), Brasil. alessandroangelo@gmail.com

ocorrem em quase todas as espécies de plantas superiores, formando uma perfeita interação do ponto de vista morfológico e fisiológico.

O botânico Frank foi o pioneiro em descrever a simbiose micorrízica, no final do século XIX, sendo considerado o pai da micorrizologia (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). No início do século XX, muitas tentativas de introdução de espécies florestais exóticas, que tinham como objetivo atender aos setores de produção tornaram-se bem sucedidas após a inoculação de micorrizas (YOKOMIZO; RODRIGUES, 1998). Krügner e Tomazello Filho (1981) afirmaram que a presença dessas micorrizas no Brasil deve-se à introdução de mudas envasadas e através de esporos aderidos às sementes importadas. Na década de 1980, o conhecimento e tecnologia sobre especificidade do hospedeiro, tratos culturais, tipos de solo e clima não eram suficientes para garantir o sucesso de programas de micorrização controlada. Por outro lado, Bega (1989) considerou a existência de espécies endêmicas.

Para Yokomizo e Krügner (1985), a maior parte das frutificações de fungos micorrízicos é comumente encontrada na superfície de solos de matas e florestas plantadas e mantém com as árvores, alguma forma de associação. Estas frutificações, em sua maioria, resultam de associações na forma de micorrizas e se originam de um extensivo sistema de hifas que se ramificam no solo e caracterizam-se por estarem ligados às raízes das árvores (YOKOMIZO; KRÜGER, 1985).

Ainda na década de 1980, praticamente não havia competição de micorrizas no campo, o que facilitou a disseminação destes fungos com a prática de inoculação de mudas em viveiro (KRÜGNER; TOMAZELLO FILHO, 1980). Gross, Casagrande e Caetano (2004) consideram comum a prática de inoculação de micorrizas em viveiros de mudas de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, com o objetivo de favorecer o desenvolvimento das mudas no pós-plantio. A formação de micorrizas geralmente é importante para a sobrevivência, o crescimento e a absorção de nutrientes e água das espécies florestais. Muitas vezes, a inoculação é necessária para melhorar o estabelecimento das plantas em condições naturais (MUCHOVEJ et al., 1992).

Segundo Smith, Head e Harley (1997), as simbioses micorrízicas podem ser classificadas em: arbuscular, ectomicorriza, ectendomicorriza, arbutoide, monotropoide, ericoide e de orquídeas. Já Tomazello Filho e Krügner (1982), usaram o critério de classificação de micorrizas apenas pelo arranjo das hifas no tecido da raiz, tendo classificado as principais como ectomicorrizas, endomicorrizas e ectendomicorrizas.

DESENVOLVIMENTO

Benefícios e usos das micorrizas

A simbiose micorrízica é de grande importância para as árvores hospedeiras, principalmente quando plantadas em sítios de baixa fertilidade, pois o fungo melhora a absorção e o transporte de água e nutrientes do solo, aumentando a tolerância à acidez, à toxidez por metais pesados, às temperaturas elevadas do solo, bem como, contribui para a resistência às doenças do sistema radicular (SOUZA et al., 2001).

Com base nos benefícios proporcionados, tem sido incentivada a inoculação de fungos micorrízicos nos substratos de crescimento de mudas de *Pinus* e *Eucalyptus* (TRAJANO et al., 2001) e na implantação de áreas florestais do cerrado (KRÜGNER; TOMAZELLO FILHO, 1980). Entretanto, Tomazello Filho e Krügner (1980), consideraram a presença de inóculo natural na área, a distância entre o local de produção e o local de aplicação do inóculo e as condições de fertilidade do solo, como sendo os principais fatores econômicos que influenciam na utilização de inoculações de micorrizas na produção de mudas florestais.

Para Souza et al. (2003), tanto o melhoramento genético de plantas como o melhoramento genético de simbiontes capazes de sobreviver, crescer e produzir em sítios desfavoráveis são de grande importância no restabelecimento e restauração de áreas degradadas. A melhoria da eficiência simbiótica desses fungos poderá maximizar a utilização desses sítios (SALES, 2001). Caldeira et al. (1999) mencionaram que, em leguminosas arbóreas, a presença de micorrizas pode contribuir para a expansão da área de captação de nutrientes de baixa mobilidade no solo principalmente P e Zn, permitindo o crescimento em solos extremamente pobres e deficientes em nitrogênio.

Para Silva et al. (2007), os microrganismos do solo possuem papel primordial na decomposição e ciclagem de nutrientes contidos nos resíduos florestais. A simbiose micorrízica oferece ainda outros

benefícios, como o aumento da agregação do solo através do micélio extramatricial e o aumento da diversidade das plantas, que potencializam seu uso em programas de recuperação de áreas degradadas e controle de erosão (YOKOMIZO; RODRIGUES, 1998).

Assim, o estabelecimento de essências florestais micorrizadas pode ser uma alternativa viável para o aproveitamento de áreas degradadas, ou áreas que estão sujeitas a processos erosivos (SILVA; ANTONIOLLI; ANDREAZZA, 2003). Entretanto, existe ainda um enorme caminho a ser percorrido para o desenvolvimento de biotecnologias ligadas ao emprego de micorrizas na produção agroflorestal e na recuperação de áreas degradadas (SOUZA; SILVA; BERBARA, 2008; STURMER; SIQUEIRA, 2008). Um aspecto essencial é que, para que a inoculação de mudas em viveiros seja efetiva, é necessária a seleção de estirpes fúngicas que realmente potencializem os benefícios da simbiose (SALES, 2001).

Características das Ectomicorrizas (ECM)

O termo ectomicorriza foi proposto numa pesquisa realizada pela Universidade Estadual de Oregon, Estados Unidos, por Peyronel et al. (1969). Nesta simbiose, as hifas cobrem as radículas, formando uma espécie de manto fora dos espaços intercelulares, mas que se vincula nas células corticais da raiz. Estes autores afirmam que este complexo sistema é denominado “Rede de Hartig”. As estruturas diagnosticadas são: a) manto fúngico; b) Rede de Hartig; e c) micélio externo vegetativo que emerge das raízes.

Os fungos ectomicorrízicos podem pertencer a distintas famílias dos filos Basidiomycota e Ascomycota (SILVA et al., 2007). Predominam geralmente em espécies arbóreas, como as das famílias Fagaceae, Pinaceae e Myrtaceae, e variam em compatibilidade e eficiência, dependendo das espécies simbiossantes e das condições ambientais.

Dentre as famílias de Basidiomicetos que formam ECM destacam-se: Amanitaceae, Russulaceae, Paxillaceae, Boletaceae, e Strobilomycetaceae (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Segundo estes autores, alguns exemplos de fungos ectomicorrízicos incluem várias espécies dos gêneros *Suillus*, *Laccaria*, *Scleroderma*, *Hebeloma* e *Pisolithus*.

Registros fósseis indicam que as associações ectomicorrízicas surgiram há pelo menos 50 milhões de anos (COSTA et al., 2002). Segundo os mesmos autores, no Brasil, os levantamentos de ECM são recentes, sugerindo a urgência em se identificar os recursos genéticos disponíveis e o papel da simbiose ectomicorrízica nos ecossistemas do cerrado, nas florestas nativas e nos plantios com espécies exóticas.

Para Sales (2001), o conhecimento, as pesquisas e os métodos de identificação sobre ecologia e genética de fungos micorrízicos florestais ainda são incipientes. Segundo este autor, torna-se necessário conhecer a diversidade genética e estrutura da população de *Pisolithus*, dentro de uma área ou região específica do país, para se ter conhecimento dos aspectos ecológicos deste microrganismo e saber como é o comportamento do fungo em sítios colonizados naturalmente, ou inoculados artificialmente, em sítios que sofreram interferências, como é a sua persistência no campo e sua distribuição espacial e temporal.

Yokomizo e Masuhara (1996) lembram que, para viabilizar a inoculação de micorrizas em ecossistemas naturais, o conhecimento sobre os fatores ambientais que interferem no desenvolvimento destes microrganismos são fundamentais. Considerando a disponibilidade de fósforo no solo, Trajano et al. (2001) citam que a sua disponibilidade afeta a formação e o desenvolvimento das micorrizas, bem como contribuem para o crescimento das plantas.

No Brasil, a inoculação de fungos ectomicorrízicos limita-se ao uso de substratos com esporos e frutificação (ROSSI, 2006). Segundo este autor, a prática é de custo baixo, contudo, não garante a eficiência na micorrização e a sanidade no viveiro, durante o uso deste tipo de inoculante na produção de mudas de *Pinus* e *Eucalyptus*. Apesar das dificuldades de se garantir a micorrização das mudas no Brasil, existe inóculo “natural” nos plantios comerciais de eucalipto e de pinus, o que segundo Campos et al. (2011), garante a adaptação aos solos com limitada quantidade de fósforo e nitrogênio.

Os resultados de Yokomizo e Masuhara (1996) sugerem que a temperatura do solo pode interferir no desenvolvimento de ECM. Em seus resultados, valores em torno de 100°C foram testados para controlar propágulos, eliminando a micota micorrízica preexistente no substrato de produção de mudas de *Pinus luchuensis*. Para Cancino et al. (2007), o pH do meio de cultivo tem efeitos significativos sobre o crescimento *in vitro* do micélio vegetativo de *Rhizopogon luteolus*, *Suillus bellinii* e *Suillus luteus*. Para os

autores, das três espécies de fungos ectomicorrízicos, *Rhizopogon luteolus* apresentou o maior crescimento, independentemente dos tratamentos, indicando que esta espécie pode ser usada em programas de inoculação em diferentes condições de pH nos solos. O crescimento destas três espécies diminuiu o pH do meio de cultura, sendo este efeito mais evidente nos cultivos onde o pH inicial foi de 7,8.

Considerando os fatores ambientais que influenciam o desenvolvimento de micorrizas, Auer e Bettioli (1986) destacam a importância da matéria orgânica no solo. Estes autores verificaram que o aumento do teor de matéria orgânica no substrato de mudas de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, estimulou o desenvolvimento destas plantas, porém, com inibição na formação de micorrizas por *Pisolithus tinctorius* e *Thelephora terrestris*.

As micorrizas aumentam o volume de solo explorado pelo sistema radicular das plantas, resultando em maior eficiência de absorção de elementos com estreita zona de difusão em torno das raízes, particularmente o Zn e Cu (TRINDADE et al., 2001). Existe decréscimo nas concentrações de Cu e Zn, induzida pelo P, por meio de dois mecanismos; a supressão da absorção destes elementos pela micorriza e o efeito de diluição no qual as plantas bem supridas em P, pois apresentam maior crescimento e conseqüentemente concentram menos nutrientes do que as deficientes em P (TRINDADE et al., 2001).

Trindade et al. (2001) testando o efeito do S na colonização ectomicorrízica de *Eucalyptus grandis*, comprovaram que a porcentagem de colonização decresceu com o aumento das doses de S. No entanto, a principal conclusão deste trabalho foi que as mudas de *Eucalyptus grandis* inoculadas com o fungo *Pisolithus tinctorius* requerem menores teores de enxofre no solo, para seu crescimento.

Schwan-Estrada et al. (2003) estudaram a compatibilidade das ECM com diferentes hospedeiros. Os autores mencionaram que no processo de inoculação em viveiro pode existir uma diferença fisiológica entre os isolados, relacionada à utilização de diferentes açúcares, principalmente aqueles presentes na constituição da parede celular vegetal como a celulose, hemicelulose e pectina. Esta diferença estaria influenciando a compatibilidade entre a planta hospedeira e o fungo simbionte.

As micorrizas podem melhorar a eficiência na absorção de alguns nutrientes (SILVA; ANTONIOLLI; ANDREAZZA, 2003). As ectomicorrizas contribuem efetivamente para absorção de Ca, K, Mg e micronutrientes pela planta hospedeira em razão do menor diâmetro das hifas, as quais podem explorar pequenos poros inacessíveis às raízes (SILVA et al., 2007).

Biorremediação

A biorremediação é uma área em expansão da biotecnologia ambiental e pode ser definida como a aplicação de processos biológicos para o tratamento da poluição (GADD, 2001). Pode também ser definida como estratégia ou processo que emprega microrganismos ou suas enzimas para detoxificar contaminantes no solo ou outros ambientes (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Para Meharg (2001), o processo de biorremediação poderá ser possível se o organismo for tolerante ao poluente em concentrações encontradas no sítio a ser corrigido, bem como, se estes organismos possuírem a capacidade enzimática para degradar os poluentes de interesse. A tendência é que sejam encontrados microrganismos na natureza que auxiliem a biorremediação. Segundo Azevedo (1998), uma etapa importante é o processo de triagem para uma rápida seleção entre os muitos microrganismos existentes no ambiente.

De acordo com Moreira e Siqueira (2006), as técnicas de biorremediação são divididas da seguinte forma: a) passiva (degradação natural por microrganismos do solo); b) bioestimulação (adição de nutrientes no solo para estimular a degradação passiva); c) bioventilação (uso de gases na bioestimulação); d) bioaumentação (inoculação no solo, com microrganismos selecionados); e) "landfarming" (aplicação de rejeitos com inóculos na superfície do solo, com posterior gradagem); e f) compostagem (construção de pilhas de resíduos com inoculantes).

Uso potencial de ECM na biorremediação de poluentes orgânicos persistentes

Os fungos ectomicorrízicos, por vezes presentes nas raízes de *Pinus* spp. e *Eucalyptus* spp., contribuem com a produção em biomassa vegetal. Algumas pesquisas indicam que enzimas produzidas por ECM, como lacases, tyrosinases, oxidases e peroxidases são pouco seletivas sobre os Poluentes Orgânicos

Persistentes (POPs), indicando que ECMs poderiam degradá-los (MEHARG, 2001). A vantagem dos fungos é que seu crescimento micelial maximiza, tanto fisicamente quanto mecanicamente, a ação enzimática em contato com o ambiente (MALONEY, 2001).

As empresas do setor florestal utilizam defensivos na implantação e manutenção dos povoamentos, no intuito de realizar o manejo integrado de agentes bióticos como as formigas cortadeiras (gêneros *Atta* e *Acromyrmex*), doenças causadas por fungos e bactérias, ou também, das plantas daninhas que competem com o cultivo por água, luz e nutrientes. O controle químico muitas vezes apresenta os melhores rendimentos considerando os custos associados. Independentemente do princípio ativo ou formulação comercial utilizado, salienta-se que a persistência residual e a degradação de um xenobionte no ambiente (neste caso, os agrotóxicos) podem ocorrer pela ação de microrganismos heterotróficos presentes no solo, que se alimentam das estruturas orgânicas destas moléculas.

A inoculação de ECM no solo poderia favorecer a remediação de agrotóxicos registrados para uso florestal, e simultaneamente, favorecer o desenvolvimento das plantas, reduzindo custos de replantio na implantação destes povoamentos.

Vários estudos se concentraram na capacidade de fungos ectomicorrízicos degradarem ou mesmo tolerarem a presença de substâncias tóxicas *in vitro* e *in vivo*. Laatikainen e Heinonen-Tanski (2002) estudando o efeito da aplicação de vários agrotóxicos utilizados em viveiros e campo no crescimento de 64 fungos ectomicorrízicos detectaram diferentes reações. Como esperado, os fungicidas foram os produtos mais tóxicos em relação aos herbicidas e inseticidas, sendo que chlorothalonil e propiconazole os mais inibitórios ao crescimento dos fungos. Por outro lado, os autores também encontraram que o fungicida maneb, os herbicidas glifosato e terbuthylazine estimularam o crescimento fúngico. Como alguns dos fungos testados foram os menos tolerantes, existe a necessidade de se mensurar as concentrações dos produtos presentes no solo e seu efeito em diferentes grupos de fungos ectomicorrízicos.

A triagem da capacidade de tolerar elementos e moléculas tóxicas pode ser feita inicialmente *in vitro*, contudo, a seleção deve ser posteriormente *in vivo* com a planta simbiote. Meharg, Cairney e Maguire (1997) estudaram *Paxillus involutus* e *Suillus variegatus* frente a 2,4 – diclorofenol em meio de cultura líquido e em simbiose com *Pinus sylvestris*. Esses autores verificaram que os fungos degradaram facilmente esta molécula em cultivo líquido e que a simbiose estimulou uma maior mineralização do composto tóxico.

Em um estudo preliminar, Faria et al. (2012) constataram que uma ECM foi tolerante ao herbicida glifosato. Apesar de os estudos em laboratório terem demonstrado a viabilidade, testes de campos sobre remediação são praticamente inexistentes (MEHARG, 2001). Ainda se conhece pouco sobre a diversidade funcional das enzimas das ECM (FINLAY, 2005) e os mecanismos de degradação de poluentes por ECM ainda são pouco conhecidos (MEHARG; CAIRNEY, 2000).

As interações de micorrizas com organismos do solo são inevitáveis, mas foram muito pouco estudadas (MEHARG; CAIRNEY, 2000; FINLAY, 2008). Em condições naturais, ainda não está clara a prevalência da fonte nutricional das ECM, se são as plantas hospedeiras ou a matéria orgânica do solo (TRESSEDER; TORN; MASIELLO, 2006). Dentre as novas tendências, ao se pesquisar micorrizas, destacam-se os estudos sobre a interação do micélio extrarradicular com substratos orgânicos e inorgânicos do solo (FINLAY, 2005). Considerando que existem mais de seis mil espécies de fungos ECM, é provável que exista uma considerável variação fisiológica entre os diferentes isolados de uma única espécie (MEHARG; CAIRNEY, 2000). No Brasil, os levantamentos de espécies vegetais e fúngicas, nativas e ectomicorrízicas são incipientes, sugerindo a urgência em se identificar os recursos genéticos disponíveis e o papel da simbiose ectomicorrízica nos ecossistemas do cerrado, nas florestas nativas e nos plantios com espécies exóticas (COSTA et al., 2003).

Resultados de biorremediação por micorrizas

A eficiência de degradação de um pesticida vai depender de uma série de fatores, incluindo as taxas de crescimento de fungos, as condições de cultura, tempo de incubação e nutrientes disponíveis (MEHARG; CAIRNEY, 2000). Em experimentos de campo, a concentração de propágulos no solo será um fator determinante na eficiência da remediação (CABELLO, 2001). Meharg (2001) sugere que a rizosfera ideal deve ser resistente a vários poluentes.

As enzimas de ECM são excretadas extracelularmente (MEHARG, 2001). Para Cabello (2001), os estudos sobre biorremediação devem focar quais exsudatos são produzidos pelas raízes das plantas. Meharg e Cairney (2000) mencionam que a degradação do herbicida 2,4D por micorrizas foi maior quando estavam em simbiose com plantas, em relação às ECM de vida livre. O estudo de Treseder, Torn e Masiello (2006) sugere que a maior parte do carbono das ECM é adquirida das árvores hospedeiras, não da matéria orgânica do solo. Para se comprovar a viabilidade na remediação do glifosato por ECM em campo, há que se levar em conta o argumento de Cabello (2001), no qual os fungos resistentes devem ser isolados de sítios contaminados.

Os estudos propostos são importantes para a elaboração de teorias na sustentabilidade agrícola e florestal (FINLAY, 2005). Para Meharg (2001), as áreas remediadas não deixarão de fornecer posteriormente recursos madeireiros ao produtor florestal. Nesta linha de raciocínio, Meharg e Cairney (2000) lembram que as técnicas silviculturais devem ser consideradas para otimizar a remediação, mas ainda existem poucos exemplos de aplicação prática. O uso de tecnologias de biorremediação está ainda em fase inicial de conhecimento, mas a ideia é válida para situações em que o sítio permita a recuperação do solo no longo prazo (MEHARG, 2001). Para Meharg e Cairney (2000), a biorremediação possui como vantagens o baixo custo e o menor distúrbio no solo a ser descontaminado.

Existem resultados interessantes sobre a biorremediação com fungos ectomicorrízicos. A simbiose é favorecida pela presença de bactérias que formam um biofilme sobre a micorriza e também participam da biodegradação dos agrotóxicos, necessitando somente de exsudatos radiculares e da micorriza como fonte de carbono (FINLAY, 2008). O autor também menciona que a degradação de fluorene (hidrocarboneto aromático policíclico) foi retardada na micorrizosfera de *Pinus sylvestris*.

Biorremediação de metais pesados por micorrizas

A resposta de diferentes ECM quanto à presença de metais pesados também tem sido estudada. Blaudez et al. (2000) avaliaram a inibição do crescimento de 39 fungos ectomicorrízicos cultivados em meio com metais pesados como Cd, Cu, Ni e Zn, sendo 29 isolados oriundos de sítios poluídos. Os resultados mostraram que houve uma forte variação interespecífica, alta heterogeneidade intraespecífica na tolerância aos metais pesados e que não houve diferença entre isolados originados de áreas poluídas ou não.

Bertolazzi et al. (2010) comentaram sobre a capacidade de retenção de metais pesados pelo micélio das ECM e que sua densidade pode funcionar como uma barreira física para que estes contaminantes não sejam absorvidos pela planta hospedeira.

Sobre os fungos endomicorrízicos, percebe-se que estes últimos foram menos estudados que os ectomicorrízicos. Finlay (2008) relatou que a dissipação de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos pode ser aumentada pela presença de micorrizas arbusculares. Um estudo com mudas de *Trema micrantha* inoculada com *Glomus etunicatum*, sob doses crescentes de Zn na solução nutritiva, mostrou que houve redução acentuada no crescimento das mudas e da colonização micorrízica das raízes (SOARES et al., 2006). Nesse sentido, mais estudos precisam ser desenvolvidos com este tipo de micorriza, por ser mais frequente que as ectomicorrizas em condições tropicais, como é o caso do Brasil.

A biorremediação microbiana vem evoluindo para se tornar uma tecnologia de larga escala e representa a principal tecnologia para a recuperação de solos contaminados, segundo Moreira e Siqueira (2006). Estes autores ressaltam que a biorremediação microbiana é uma tecnologia de baixo custo, possibilita solução permanente de descontaminação, fundamentada em processos naturais, com aplicabilidade a vários contaminantes, tipos de solo e com aceitação pública.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As micorrizas já foram bastante estudadas na área de microbiologia do solo, pelo ponto de vista de seus efeitos sobre as plantas hospedeiras. Os fungos formadores de micorrizas podem ser importantes pelo fato de potencializarem a absorção de nutrientes (principalmente o fósforo) e de água do solo pela planta.

Por outro lado, as possibilidades de uso de micorrizas na biorremediação são eminentes. Pode ser destacada a recuperação de áreas contaminadas por meio do reflorestamento com plantas que desenvolvam

associação micorrízica, tendo o foco na biorremediação. São possibilidades cada vez mais vislumbradas por grupos de pesquisa e que evidenciam um potencial de desenvolvimento em tecnologia e inovação para fins ambientais e florestais.

REFERÊNCIAS

- AUER, C. G.; BETTIOL, W. Efeito da serapilheira de *Eucalyptus grandis* no crescimento micelial de *Pisolithus tinctorius* em meio de cultura. **IPEF**, Piracicaba, n. 32, p. 49-52, 1986.
- AZEVEDO, J. L. Biodiversidade microbiana e potencial biotecnológico. In: MELO, I. S.; AZEVEDO, J. L. **Ecologia microbiana**. Jaguariúna: Embrapa-CNPMA, 1998. p. 445-461.
- BEGA, O. A. **Inoculação de mudas de *Pinus taeda* por *Scleroderma***. 1989. 48 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.
- BERTOLAZZI, A. A. et al. O papel das ectomicorrizas na biorremediação de metais pesados no solo. **Natureza on line**, Santa Teresa, v. 8, n. 1, p. 24-31, 2010.
- BLAUDEZ, D. et al. Differential responses to ectomycorrhizal fungi to heavy metals *in vitro*. **Mycological Research**, Cambridge, v. 104, n. 11, p. 1366-1371, 2000.
- CABELLO, M. N. Mycorrhizas and hydrocarbons. In: GADD, G. M. (org.). **Fungi in Bioremediation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. p. 456-471.
- CALDEIRA, M. V. W. et al. Efeito de fungos micorrízicos arbusculares no desenvolvimento de duas leguminosas arbóreas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 63-70, 1999.
- CAMPOS, D. T. S. et al. Colonização micorrízica em plantios de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, p. 965-974, 2011.
- CANCINO, G. P. et al. Efecto del pH sobre el crecimiento *in vitro* de hongos ectomicorrízicos recolectados de plantaciones de *Pinus radiata*. **Bosque**, Valdivia, v. 28, n. 3, p. 215-219, 2007.
- COSTA, M. D. et al. Ectomicorrizas: a face oculta da floresta. **Biotecnologia Ciência e Desenvolvimento**, Brasília, n. 29, p. 38-46, 2003.
- FARIA, A. B. C. et al. Estudo sobre a viabilidade de remediação de pesticidas por ectomicorrizas e avaliação da sua tolerância em exposição ao glifosato. In: FERTBIO 2012: A RESPONSABILIDADE SOCIOAMBIENTAL DA PESQUISA AGRÍCOLA, 2012, Maceió. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012.
- FINLAY, R. D. Mycorrhizal symbiosis: myths, misconceptions, new perspectives and future research priorities. **Mycologist**, Cambridge, v. 19, n. 3, 2005.
- FINLAY, R. D. Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis: with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 59, n. 5, p. 1115-1126, 2008.
- GADD, G. M. Prefácio. In: _____ (org.). **Fungi in Bioremediation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. p. 445-455p.
- GROSS, E.; CASAGRANDE, L. I. T.; CAETANO, F. H. Ultrastructural study of ectomycorrhizas on *Pinus caribaea* Morelet. var. *hondurensis* Barr. & Golf. seedlings. **Acta Botanica Brasílica**, Brasília, v. 18, n. 1, p. 1-7, 2004.
- KRÜGNER, T. L.; TOMAZELLO FILHO, M. Efeitos dos fungos ectomicorrízicos *Pisolithus tinctorius* e *Thelephora terrestris* e de fertilização mineral no crescimento e sobrevivência de *Pinus caribaea* var. *bahamensis*. em condições de campo, no litoral sul da Bahia. **IPEF**, Piracicaba, n. 21, p. 41-51, dez. 1980.
- LAATIKAINEN, T.; HEINONEN-TANSKI, H. Mycorrhizal growth in pure cultures in the presence of pesticides. **Microbiological Research**, Jena, v. 157, p. 127-137, 2002.
- MALONEY, S. E. Pesticide degradation. In: GADD, G. M. (org.). **Fungi in Bioremediation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. p. 188-223p.
- MEHARG, A. A. The potential for utilizing mycorrhizal associations in soil bioremediation. In: GADD, G. M. (Org.). **Fungi in Bioremediation**. Cambridge: Cambridge University Press 2001. p. 445-455.
- MEHARG, A. A.; CAIRNEY, J. W. G. Ectomycorrhizas – extending the capabilities of rhizosphere remediation? **Soil Biology e Biochemistry**, Elmsford, v. 32, p. 1475-1484, 2000.

- MEHARG, A. A.; CAIRNEY, J. W. G.; MAGUIRE, N. Mineralization of 2,4-dichlorophenol by ectomycorrhizal fungi in axenic culture and in symbiosis with pine. **Chemosphere**, Oxford, v. 34, n. 12, p. 2495-2504, jun. 1997.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006. 729 p.
- MUCHOVEJ, R. M. C. et al. Influência da inoculação com fungos ectomicorrízicos e MVA sobre o comportamento de mudas de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. KTZE. **Hoehnea**. São Paulo, v. 19, n. 1, p. 9-18, 1992.
- PEREZ-MORENO, J.; READ, D. J. Los hongos ectomicorrízicos, lazos vivientes que conectan y nutren a los árboles en la naturaleza. **INCI**, Caracas, v. 29, n. 5, p. 239-247, 2004.
- PEYRONEL, B. et al. Terminology of mycorrhiza. **Mycologia**, Oregon, v. 61, n. 1, p. 410-411, 1969.
- ROSSI, M. J. **Tecnologia para produção de inoculantes de fungos ectomicorrízicos utilizando cultivo submerso em biorreator airlift**. 2006. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- SALES, N. L. P. **Modelo para estudo da diversidade genética em populações naturais de *Pisolithus***. 2001. 95 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.
- SCHWAN-ESTRADA, K. R. F. et al. Utilização de fontes de carbono e caracterização esterásica de fungos ectomicorrízicos. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 25, n. 1, p. 237-241, 2003.
- SILVA, R. F.; ANTONIOLLI, Z. I.; ANDREAZZA, R. Efeito da inoculação com fungos ectomicorrízicos na produção de mudas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maidem em solo arenoso. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 13, n. 1, p. 33-42, 2003.
- SILVA, M. A. et al. Formação de ectomicorrizas por monocários e dicários de *Pisolithus* sp. e interações nutricionais em *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 31, n. 5, p. 917-929, 2007.
- SMITH, S. E.; READ, D. J.; HARLEY, J. L. **Mycorrhizal symbiosis**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1997. 605 p.
- SOARES, C. R. F. S. et al. Micorriza arbuscular e nutrição fosfática na toxidez de zinco para a trema *Trema micrantha* (L.) Blum. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 30, n. 4, p. 917-929, 2006.
- SOUZA, A. M. et al. Caracterização morfológica e isoenzimática de isolados de *Pisolithus* spp. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 22-34, 2001.
- SOUZA, A. M. et al. Seleção de genitores monocarióticos do fungo simbiótico *Pisolithus microcarpus* para estudos genéticos. **Cerne**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 1-8, 2003.
- SOUZA, F. A.; SILVA, I. C. L.; BERBARA, R. L. L. Fungos micorrízicos arbusculares: muito mais diversos do que se imaginava. In: MOREIRA, F. M. S. et al (Ed.). **Biodiversidade do solo em ecossistemas brasileiros**. Lavras: UFLA, 2008. p. 483-536.
- STURMER, S. L.; SIQUEIRA, J. O. **Diversidade de fungos micorrízicos arbusculares em ecossistemas brasileiros**. In: MOREIRA, F. M. S. et al. (Ed.). **Biodiversidade do solo em ecossistemas brasileiros**. Lavras: UFLA, 2008. p. 537-584.
- TOMAZELLO FILHO, M.; KRUGNER, T. L. Formação de ectomicorrizas e crescimento de mudas de *Pinus caribaea* var. *bahamensis* em solo de viveiro infestado artificialmente com *Thelephora terrestris* e *Pisolithus tinctorius* no litoral sul da Bahia. **IPEF**, Piracicaba, n. 21, p. 21-37, dez. 1980.
- TOMAZELLO FILHO, M.; KRUGNER, T. L. Aspectos da associação micorrízica em *Pinus* ssp. **IPEF**, Piracicaba, v. 3, n. 9, p. 1-32, mar. 1982.
- TRAJANO, M. A. B. et al. Suprimento de fósforo e formação de micorrizas em mudas de eucalipto em sistema de raízes subdivididas. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 25, n. 2, p. 193-201, 2001.
- TRESEDER, K. K.; TORN, M. S.; MASIELLO, C. A. An ecosystem-scale radiocarbon tracer to test use of litter carbon by ectomycorrhizal fungi. **Soil Biology e Biochemistry**, Elmsford, v. 38, p. 1077-1082, 2006.
- TRINDADE, A. V. et al. Efeito de fungos ectomicorrízicos na resposta de mudas de *Eucalyptus grandis* a enxofre no solo. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 25, n. 2, p. 175-181, 2001.
- YOKOMIZO, N. K. S.; KRUGNER, T. L. *Pisolithus tinctorius* e ectomicorrizas em espécies de *Eucalyptus*. **Silvicultura em São Paulo**, São Paulo, v. 17/19, p. 1-8, 1985.
- YOKOMIZO, N. K. S.; MASUHARA, G. Termosensibilidade de propágulos de fungos ectomicorrízicos

em *Pinus luchuensis* Mayr. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 123-130, 1996.
YOKOMIZO, N. K. S.; RODRIGUES, E. Associação ectomicorrízica entre *Suillus luteus* e *Pinus elliottii* var *elliottii*. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 73-79, 1998.