ISSN 0104-7760

CERNE

Shantau Camargo Gomes Stoffel[1], Rafael Dutra de Armas[1], Admir José Giachini[1], Márcio José Rossi[1], David Gonzalez[1], Edenilson Meyer[1], Carlos Henrique Nicoleite[1], Edilane Rocha-Nicoleite[2], Claudio Roberto Fonseca Sousa Soares[1]

MICORRIZAS ARBUSCULARES NO CRESCIMENTO DE LEGUMINOSAS ARBÓREAS EM SUBSTRATO CONTENDO REJEITO DE MINERAÇÃO DE CARVÃO

Palavras chave:
Colonização micorrízica
Recuperação ambiental
Elementos-traço

RESUMO: O objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito da inoculação de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) no crescimento, colonização micorrízica e absorção de P e elementos-traço em leguminosas arbóreas expostas a rejeito de mineração de carvão. Ensaios independentes para as leguminosas *Mimosa scabrella* Benth. (bracatinga), *Mimosa bimucronata* (DC.) Kuntze (maricá) e *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan (angico-vermelho) foram conduzidos em casa de vegetação em delineamento inteiramente casualizado com seis tratamentos. Foram avaliados cinco isolados de FMA autóctones de áreas de mineração (*Acaulospora colombiana*, *Acaulospora morrowiae*, *Dentiscutata heterogama*, *Rhizophagus clarus* e *Rhizophagus irregularis*), além de um tratamento controle não inoculado, com quatro repetições. Verificou-se que a colonização micorrízica foi superior a 60% para a bracatinga e o maricá, enquanto que, para o angico-vermelho, foi de no máximo 26%. De maneira geral, a inoculação de FMA favoreceu o crescimento das leguminosas arbóreas, atingindo incrementos de até 1430%. A absorção de fósforo foi beneficiada principalmente pela inoculação de *A. colombiana*, *R. irregularis* e *A. morrowiae*. Apesar de se verificar redução nos teores de elementos-traço na parte aérea das plantas, a inoculação de FMA ocasionou incrementos significativos no acúmulo de As, Cu, Zn e Cr para todas as leguminosas avaliadas. Desta forma, os FMA desempenham papel importante para o crescimento de espécies arbóreas em áreas de mineração de carvão, as quais apresentam ambientes pobres, degradados e muitas vezes contaminados.

Histórico:
Recebido 25/02/2015
Aceito 26/04/2016

ARBUSCULAR MYCORRHIZAL IN THE GROWTH OF LEGUMINOUS TREES ON COALMINE WASTE ENRICHED SUBSTRATE

Keywords:
Mycorrhizal colonization
Environmental recuperation
Trace-elements

ABSTRACT: The objective of this work was to evaluate the effects of arbuscular mycorrhizal inoculation in the growth, colonization and absorption of P and trace elements of leguminous trees on coal mine wastes. Independent assays for *Mimosa scabrella* Benth. (common name bracatinga), *Mimosa bimucronata* (DC.) Kuntze (maricá) and *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan (angico-vermelho) were carried out in a greenhouse on an entirely casualized experimental delineation composed of six treatments. Five coal mine autochthonous arbuscular mycorrhizal fungal isolates were tested, including *Acaulospora colombiana, Acaulospora morrowiae, Dentiscutata heterogama, Rhizophagus clarus and Rhizophagus irregulars*, aside from a control treatment, with four replications each. Results show that arbuscular mycorrhizal colonization was greater than 60% for *Mimosa* species, and up to 26% for Parapiptadenia. Overall, the fungal inoculation promoted better plant growth, with increments of up to 1430%. Phosphorous absorption was favored, especially when inoculation was done with *A. colombiana*, *R. irregularis* and *A. morrowiae*. Even though there was a conclusive reduction in the levels of trace elements in the plant´s shoots, the inoculation with those species of fungi promoted significant increments in the accumulated levels of As, Cu, Zn and Cr for all plant species tested. Therefore, arbuscular mycorrhizal fungi play important roles in these poor, degraded and often contaminated environments.

Correspondência:
shantau1@gmail.com

DOI:
10.1590/01047760201622021969

[1] Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, Santa Catarina, Brasil
[2] Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil

INTRODUÇÃO

A extração de carvão mineral representa uma atividade de suma importância no setor termoelétrico brasileiro, bem como na indústria cimenteira, petroquímica, e de papel e celulose, tendo sua maior expressão na região Sul do país (RS e SC) (BRASIL, 2014). Entretanto, o carvão oriundo dessa região é de baixa qualidade energética, e apresenta alto conteúdo de materiais contaminantes, sendo que após o seu beneficiamento, mais de 50% do volume extraído é de rejeitos que durante muito tempo foram depositados na superfície do solo sem qualquer cuidado ambiental, soterrando a camada mais fértil do solo (SILVA et al., 2013). Esses rejeitos apresentam altas quantidades de materiais sulfetados que ocasionam elevada acidez no solo e nos recursos hídricos, podendo atingir valores de pH inferiores a 2,0 e também quantidades elevadas de elementos-traço que dificultam o crescimento vegetal (COSTA et al., 2012).

Dentre as diversas espécies florestais que podem ser utilizadas em programas de revegetação de solos degradados pela mineração de carvão, destacam-se algumas espécies da família Leguminosae de rápido crescimento e com capacidade de associação com organismos fixadores do nitrogênio atmosférico (FARIA et al., 1998). O rápido crescimento de muitas espécies pertencentes a este grupo de plantas também proporciona um efeito positivo para o estabelecimento de outras espécies, através do sombreamento, por exemplo, auxiliando nas condições microclimáticas locais e consequentemente no recrutamento de novas espécies nativas (LINDENMAYER et al., 2010).

A maioria das espécies de leguminosas arbóreas, além de estabelecerem simbiose com os rizóbios, também se associam aos fungos micorrízicos arbusculares (FMA) pertencentes ao filo Glomeromycota e o efeito dessa interação varia de acordo com combinações planta-fungo e das variações nas condições edáficas. Dentre os benefícios proporcionados pelos FMA para as espécies vegetais destaca-se a capacidade de sobrevivência das mudas ao transplante, promoção do crescimento vegetal com aumento do diâmetro do caule e produção de biomassa, favorecendo o acúmulo de matéria orgânica no solo de ambientes degradados, favorecendo o desenvolvimento de outras espécies vegetais, bem como da microbiota do solo (SIQUEIRA et al., 2007).

A simbiose micorrízica também tem papel importante na nutrição das plantas, pois as hifas extraradiculares dos FMA propiciam aumento do volume de solo explorado pelas raízes, com consequente aumento na eficiência de absorção de nutrientes (notadamente P) para a planta simbiôntica, determinando o caráter biofertilizador dos FMA (BI et al., 2005). Adicionalmente, é sabido que os FMA produzem glomalinas, que são glicoproteínas que contribuem para a agregação das partículas do solo com propriedades de ligação à elementos-traço, possivelmente reduzindo os teores de elementos tóxicos disponíveis no solo (FOLLI-PEREIRA et al., 2012). Em função dessas características, os FMA favorecem o crescimento de plantas e, portanto, o estabelecimento de cobertura vegetal em ambientes degradados.

Trabalhos de seleção de FMA, associados a espécies arbóreas visando o seu emprego em áreas degradadas pela mineração de carvão são inexistentes no Brasil. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da inoculação de FMA no crescimento, colonização micorrízica e absorção de P e elementos-traço em leguminosas arbóreas de rápido crescimento em substrato contendo rejeito de mineração de carvão.

MATERIAL E MÉTODOS

Local e substrato empregado

O experimento foi conduzido em casa de vegetação no Laboratório de Microbiologia do Solo do Departamento de Microbiologia, Imunologia e Parasitologia da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), utilizando-se um substrato composto de uma mistura de solo contendo rejeito da mineração de carvão, vermiculita e areia na proporção de 7:3:1 (base volume). O rejeito utilizado foi coletado na região carbonífera de Criciúma, no município de Lauro Müller (SC).

O substrato apresentou as seguintes características químicas: pH_{H2O}=3,8; mat. orgânica=86 g·kg^{-1}; Al^{3+}= 6,9 cmol$_c$·dm^{-3}; Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis=1,9 e 3,1 cmol$_c$·dm^{-3}, respectivamente; $P_{Mehlich-1}$=0,84 mg·dm^{-3}; e teores de elementos-traço, em mg kg^{-1}: 8,60 (As), 17,3 (Cd), 11,3 (Cr), 17,7 (Cu), 125 (Pb) e 422 (Zn), sendo muitos desses valores superiores aos valores de prevenção da lista de referência da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB (2014). Essas características indicam que o rejeito apresentava elevada acidez, baixa fertilidade e elevado grau de contaminação. O substrato obtido foi acondicionado em tubetes de 280 cm³ e em seguida autoclavado duas vezes a 121 °C.

Instalação do Experimento e Delineamento Experimental

Sementes de *Mimosa scabrella* Benth. (bracatinga), *Mimosa bimucronata* (DC.) Kuntze (maricá) e

Parapiptadenia rigida (Benth.) Brenan (angico-vermelho) foram desinfetadas com hipoclorito de sódio 5% por dois minutos e enxaguadas em água destilada. As sementes de *M. scabrella* e *M. bimucronata*, além da desinfecção, foram submetidas à quebra de dormência por meio de imersão em água quente (80 °C por um minuto seguido de um período de 24h em água destilada à temperatura ambiente (25 °C). Procedeu-se a inoculação do substrato pela adição de 10 cm^3 de solo-inóculo, contendo esporos e outros propágulos de FMA e em seguida, três sementes foram colocadas nos tubetes a uma profundidade de aproximadamente um centímetro.

Ao final do primeiro mês foi efetuado o desbaste das plântulas deixando-se apenas uma muda por tubete. Os seguintes isolados fúngicos formavam os solos-inóculo e foram testados: *Acaulospora colombiana*, *Acaulospora morrowiae*, *Dentiscutata heterogama*, *Rhizophagus clarus* e *Rhizophagus irregularis*, pertencentes à coleção de FMA do Laboratório de Microbiologia do Solo da UFSC, e provenientes de áreas degradadas pela mineração de carvão. Além desses tratamentos, foi incluído um tratamento controle sem inoculação, no qual foi aplicado um filtrado do solo-inóculo isento de propágulos de FMA, visando equilibrar a microbiota desses tratamentos.

Dessa forma, para cada espécie de leguminosa arbórea foi montado um experimento com seis tratamentos: cinco tratamentos inoculados com FMA e um controle não inoculado, em delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições, sendo a parcela constituída de uma planta por tubete.

Condução do experimento e avaliações

Sete dias após a germinação das sementes, iniciou-se a aplicação de 20 mL de solução nutritiva de Hoagland e Arnon contendo 25% da força iônica original (HOAGLAND; ARNON, 1950), realizando-se a fertilização a cada cinco dias. Após a sexta aplicação, essa solução foi substituída por uma solução de mesma composição, porém sem a presença de P para evitar inibição da colonização micorrízica.

Após 137 dias de condução do experimento avaliou-se a altura das plantas e, em seguida, procedeu-se a colheita das mesmas separando o sistema radicular da parte aérea. Amostras de raízes (cerca de 2,0 g) foram coletadas e submetidas à clarificação e coloração com azul de tripan (KOSKE; GEMMA, 1989) e determinada a colonização micorrízica pelo método das intersecções em placas reticuladas (GIOVANNETTI; MOSSE, 1980).

A parte aérea das plantas foi seca em estufa com circulação de ar forçado à temperatura de 60 °C para determinação da matéria seca. As amostras foram submetidas à digestão nitroperclórica (TEDESCO et al., 1995) e, em seguida, realizada a determinação dos teores de P por espectrofotometria (MURPHY; RILEY, 1962).

Adicionalmente, foram determinados os teores dos elementos-traço As, Cu, Zn, Cd e Cr empregando-se ICP (modelo Perkin-Elmer Optima 7000DV). As quantidades acumuladas de P e elementos-traço nos tecidos vegetais foram calculadas multiplicando-se o teor desses elementos na parte aérea por sua respectiva produção de massa seca.

Os dados foram submetidos à análise de variância e a comparação de médias realizada pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade utilizando-se o *software* SISVAR v.5.3 (FERREIRA, 1998). Os dados de percentual de colonização micorrízica foram normalizados pela transformação (Equação 1):

$$\text{arcoseno}\sqrt{\frac{\%\text{colonização}}{100}} \quad [1]$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Colonização micorrízica e crescimento das plantas

Verificou-se diferenças na colonização micorrízica das espécies de leguminosas arbóreas testadas, apresentando valores médios de colonização para bracatinga e maricá de até 64 e 69%, respectivamente, principalmente para *R. irregularis* e *R. clarus* (Figura 1), sendo esses valores considerados elevados para espécies arbóreas (POUYU-ROJAS et al., 2000). Em contrapartida, a colonização micorrízica foi baixa para o angico-vermelho, com valores variando de 9 a 26%.

A inoculação de FMA proporcionou incrementos médios de 102% na altura e 513% na produção de matéria seca da parte aérea da bracatinga, enquanto que para o maricá os incrementos foram de ordem de 166 e 1.430%, respectivamente. Essas leguminosas arbóreas foram também beneficiadas pelos isolados de *A. colombiana*, *A. morrowiae* e *D. heterogama*, os quais apresentaram menor percentagem de colonização micorrízica. Enquanto isso, o angico-vermelho apresentou menor altura e produção de matéria seca da parte aérea em relação às demais leguminosas arbóreas e não cresceu quando procedeu-se a inoculação com *A. colombiana*.

Os resultados evidenciam que a inoculação favoreceu o crescimento da bracatinga e do maricá, tanto

dos FMA com maior colonização micorrízica, (*R. clarus* e *R. irregularis)*, quanto daqueles com menor colonização (*A. colombiana*, *A. morrowiae* e *D. heterogama)*. Esse comportamento diferenciado possivelmente tem relação com os vários mecanismos envolvidos na fitoproteção e estabelecimento da simbiose desses fungos com as plantas simbiônticas, incluindo a retenção de contaminantes no micélio fúngico, melhorias na absorção de água e nutrientes e agregação do solo, contribuindo para a redução dos processos erosivos maximizados em solos mal estruturados, como é o caso do solo resultante da inversão de horizontes e deposição de rejeitos da mineração (SIQUEIRA et al., 2007).

O favorecimento no crescimento vegetal mediado pela inoculação de FMA pode contribuir para o recrutamento de espécies nativas, pois há melhorias nas condições microclimáticas locais por meio dos efeitos de facilitação proporcionados pelo rápido crescimento das espécies micorrizadas (LINDENMAYER et al., 2010).

Os isolados de FMA empregados no presente estudo são provenientes de áreas impactadas pela mineração de carvão, e a habilidade desses fungos em beneficiar o crescimento das leguminosas arbóreas em substrato contendo rejeito é seguramente um indicativo da adaptação dos fungos ao ecossistema degradado. Johnson et al. (2010) demostraram que as populações nativas de FMA apresentam adaptações às condições locais, o que proporciona uma absorção mais efetiva de nutrientes.

Ao contrário da colonização observada no maricá e na bracatinga, a inoculação de FMA promoveu baixa colonização micorrízica no angico-vermelho, demonstrando uma maior sensibilidade dessa espécie à presença de rejeitos, comprometendo o estabelecimento da simbiose micorrízica (NOGUEIRA; SOARES, 2010), principalmente quando essa planta esteve em contato com *A. colombiana*.

A simbiose micorrízica é intensamente afetada pelos fatores físico-químicos do ambiente, interferindo no seu desenvolvimento quando há alteração em algum deles (KLAUBERG-FILHO et al., 2005). Assim, as concentrações de elementos-traço presentes no rejeito podem ter reduzido a colonização micorrízica e o crescimento dos FMA no angico-vermelho, reduzindo a germinação dos esporos, o crescimento miceliano, o grau de colonização e a esporulação desses fungos.

Teor e acúmulo de fósforo na parte aérea

Todos os FMA apresentaram incrementos no teor de P da parte aérea da bracatinga e do maricá. Dos tratamentos avaliados, a inoculação de *A. colombiana*

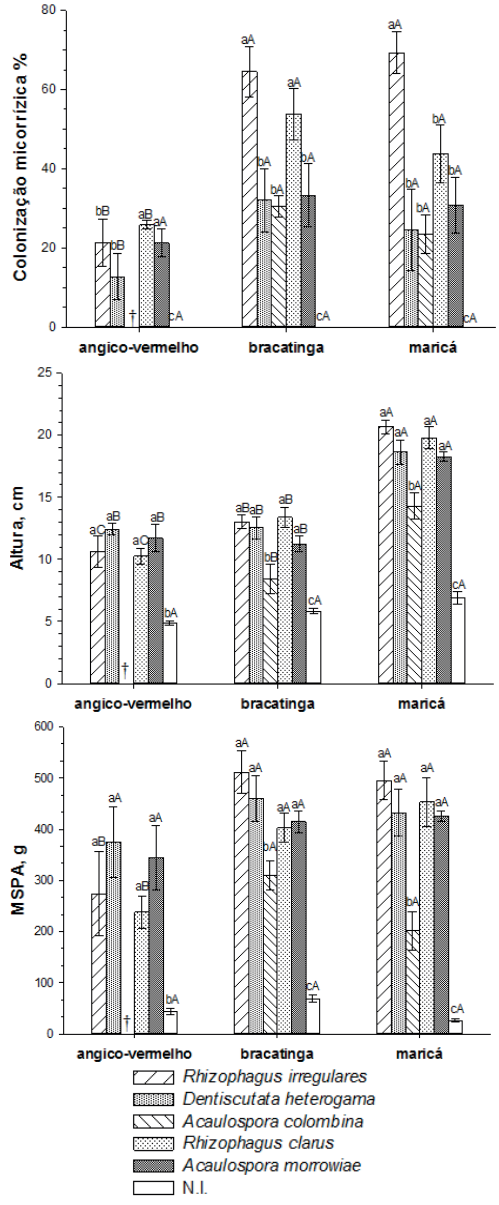

FIGURA 1 Colonização micorrízica, altura e produção de matéria seca de parte aérea (MSPA) aos 137 dias de crescimento de leguminosas arbóreas após inoculação de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) em substrato contendo rejeito de mineração de carvão. N.I. (tratamento não inoculado); † = plantas mortas. Letras minúsculas iguais dentro de cada espécie arbórea e maiúsculas para cada tratamento de inoculação de FMA, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

FIGURE 1 Mycorrhizal colonization, height and shoot dry matter (MSPA) of leguminous trees grown for 137 days in a coalmine waste enriched substrate after the inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). N.I. (not inoculated); † = deadplants. Means with the same lowercase letters within each species, and uppercase letters within a specific AMF inoculation treatment are not statistically different (Scott-Knott at 5% probability).

proporcionou os maiores incrementos nos teores de P, na ordem de 251% para a bracatinga e 571% para o maricá, em relação ao tratamento não inoculado. Dentre os isolados de FMA testados, *R. irregularis* destacou-se no aumento dos teores de P para o angico-vermelho. Devido à produção de matéria seca e teores foliares de P, verificou-se que a inoculação de FMA aumentou em até 37 vezes o acúmulo de P na parte aérea do maricá em relação ao tratamento NI. Entretanto, o favorecimento da absorção de P não teve relação com a porcentagem de colonização micorrízica, uma vez que isolados que apresentaram colonização de apenas 31% (como *A. morrowiae* para o maricá), apresentaram elevadas quantidades de P acumuladas na parte aérea (Figura 2).

O aumento de biomassa vegetal exige maior absorção de nutrientes e, em todos os tratamentos com bracatinga e maricá, verificou-se que a associação micorrízica aumentou o teor de P na parte aérea das plantas. Sheng et al. (2008) também observaram que plantas micorrizadas tiveram suas concentrações de P aumentadas, evidenciando a capacidade do FMA em aumentar a absorção desse elemento.

O P é um nutriente requerido para a formação do DNA e RNA, desempenhando papel fundamental na formação de ATP e Pi durante a fotossíntese, fazendo parte também da composição das membranas celulares na forma de fosfolipídios (BÜNEMANN; CONDRON, 2007). Dessa forma, a inoculação de FMA previamente selecionados torna-se uma importante ferramenta para o estabelecimento de mudas de bracatinga e maricá para a recuperação de áreas degradadas pela mineração de carvão.

O angico-vermelho também apresentou teores elevados de P nas plantas inoculadas com *A. colombiana*, mas acredita-se que isso se deve ao efeito de concentração, uma vez que as plantas apresentaram baixa produção de matéria seca e, consequentemente, um baixo acúmulo. Por outro lado, quando inoculado com *A. morrowiae*, *D. heterogama* e *R. clarus*, o teor de P no angico-vermelho foi inferior às plantas não inoculadas. Isso se deve ao efeito de diluição decorrente do maior crescimento das mudas inoculadas, favorecido pela simbiose micorrízica.

Absorção de Elementos-traço

Os teores de elementos-traço na parte aérea das leguminosas arbóreas apresentaram comportamento diferenciado em relação aos tratamentos de inoculação e elemento químico analisado. De maneira geral, a inoculação de FMA promoveu redução nos teores de elementos-traço nas leguminosas arbóreas, principalmente para os isolados mais eficientes para essas espécies. Todos os tratamentos inoculados aumentaram o acúmulo de elementos-traço, sendo que na bracatinga o aumento médio de Cr, Zn e Cu foi de 4,0, 4,7 e 5,5 vezes, respectivamente, quando comparados ao tratamento N.I.

O acúmulo de As foi aproximadamente 7,3 vezes maior em mudas micorrizadas, com exceção do tratamento inoculado com *A. colombiana*, que proporcionou um aumento de 3,5 vezes quando comparado ao controle N.I. No maricá, o tratamento inoculado com *A. colombiana*, mesmo com menor produção de MSPA, apresentou o

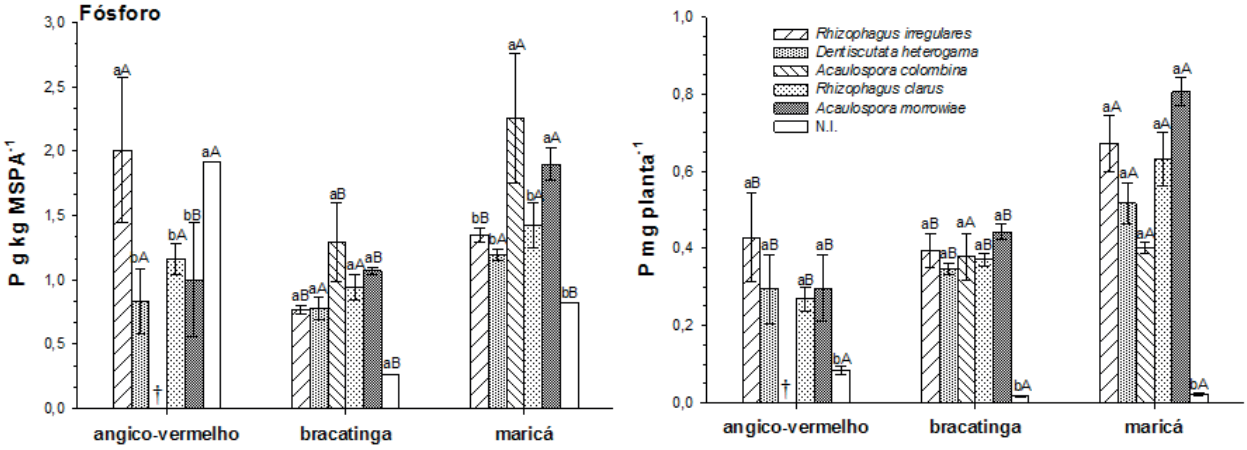

FIGURA 2 Teor e acúmulo de P na matéria seca da parte aérea (MSPA) aos 137 dias de crescimento de leguminosas arbóreas após inoculação de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) em substrato contendo rejeito de mineração de carvão. N.I. (tratamento não inoculado); † = plantas mortas. Letras minúsculas iguais dentro de cada espécie arbórea e maiúsculas para cada tratamento de inoculação de FMA, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

FIGURE 2 Phosphorus contents and accumulation in the shoots dry mass (MSPA) of leguminous trees grown for 137 days in a coal mine waste enriched substrate after inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). N.I. (not inoculated); † = dead plants. Means with the same lowercase letters within each species, and uppercase letters within a specific AMF inoculation treatment are not statistically different (Scott-Knott at 5% probability).

maior acúmulo de Cd. Os tratamentos inoculados com *A. morrowiae* e *R. clarus* também foram beneficiados pela presença do FMA, acumulando até 5,7 vezes mais do que o tratamento ausente de FMA. Quanto ao acúmulo de As, Cu, Zn e Cr, os acréscimos foram em média de 6,0, 8,5, 3,5 e 2,7 vezes, respectivamente (Figura 3).

A inoculação de *D. heterogama* e *R. clarus* no angico-vermelho proporcionou acréscimos médios na ordem de 3,0 vezes para o acúmulo de As. Os tratamentos com *R. clarus* e *A. morrowiae* promoveram incrementos de 4,8 e 6,2 de Cu e Zn, respectivamente, em relação ao tratamento não inoculado. Quanto ao acúmulo de

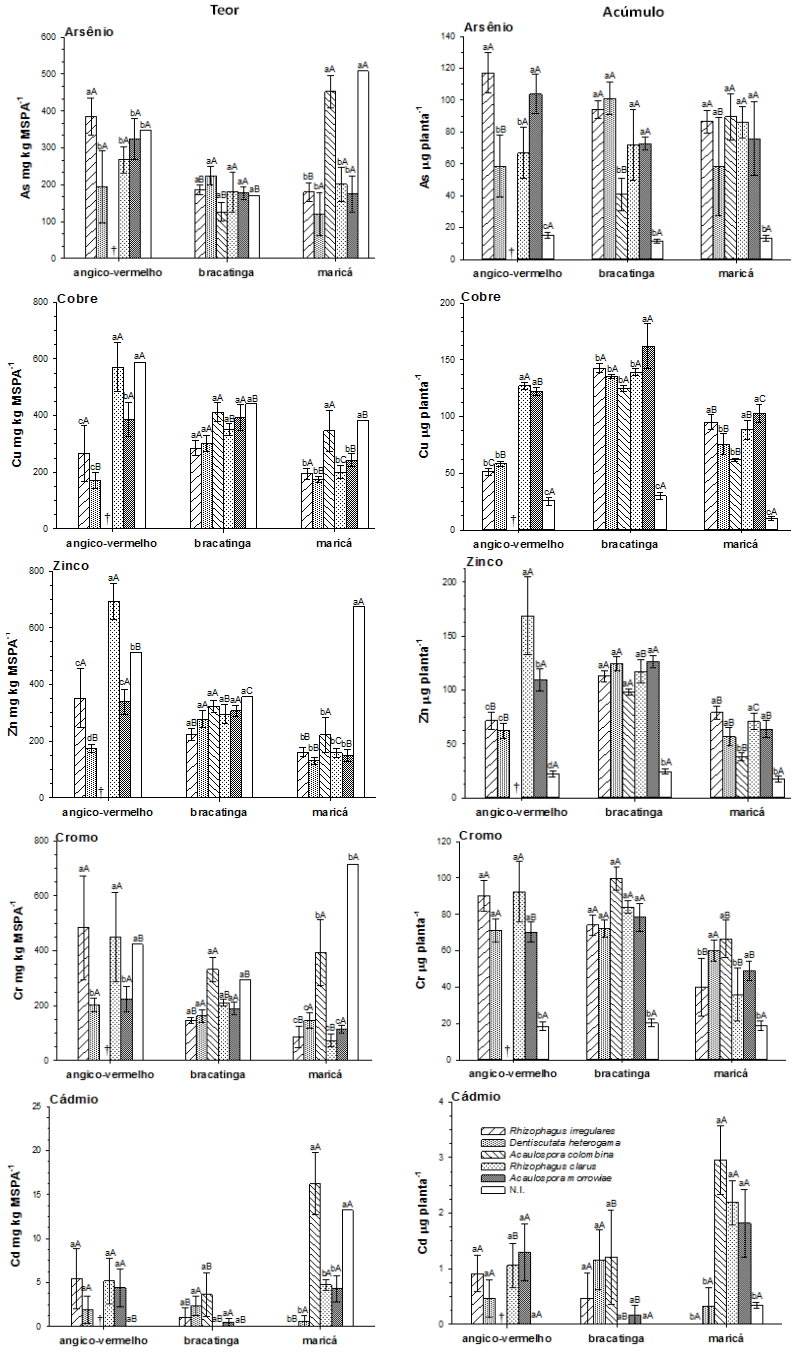

FIGURA 3 Teor e acúmulo de elementos-traço na matéria seca da parte aérea (MSPA) aos 137 dias de crescimento de leguminosas arbóreas após inoculação de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) em substrato contendo rejeito de mineração de carvão. N.I. (tratamento não inoculado); † = plantas mortas. Letras minúsculas iguais dentro de cada espécie arbórea e maiúsculas para cada tratamento de inoculação de FMA, não diferem entre si pelo teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade.

FIGURE 3 Trace elements contents and accumulation in the shoots dry mass (MSPA) of leguminous trees grown for 137 days in a coal mine waste enriched substrate after inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). N.I. (not inoculated); † = dead plants. Means with the same lowercase letters within each species, and uppercase letters within a specific AMF inoculation treatment are not statistically different (Scott-Knott at 5% probability).

Cr, os acréscimos proporcionados pelos tratamentos inoculados foram em média de 4,3 vezes. Dos valores de acúmulo de Cd, destacam-se os tratamentos de maricá inoculados com *A. colombiana*, acumulando 8,4 vezes mais, e *R. clarus* e *A. morroviae*, com valores médios de 5,7 vezes. Não puderam ser estimados os valores do acréscimo de Cd para angico-vermelho e bracatinga, pois nos tratamentos não inoculados não foi constatada a presença deste elemento.

Sabe-se que os FMA têm a capacidade de imobilizar elementos potencialmente fitotóxicos como Cu, Zn, Cd, Pb (CABRAL et al., 2010) e As (SCHNEIDER et al., 2013). No presente estudo foi constatado que mudas micorrizadas apresentaram teor de elementos-traço inferiores aos tratamentos não inoculados e isso se deve principalmente ao efeito de diluição, uma vez que as plantas inoculadas apresentaram maior produção de matéria seca na parte aérea. Essa contribuição dos FMA no crescimento das mudas proporcionou incrementos na quantidade acumulada de vários elementos-traço, evidenciando o potencial dos FMA na fitoacumulação desses elementos contidos no rejeito. Vodnik et al. (2008) demonstraram que os FMA reduzem a concentração de elementos-traço do solo e melhoram o estado nutricional das plantas com consequente aumento da produção de clorofila.

Outros benefícios proporcionados pelos FMA estão relacionados com a capacidade dos fungos em produzir glicoproteínas denominadas glomalinas, as quais têm o papel de melhorar a estabilidade de agregados e elevar o estoque de carbono no solo (RILLIG et al., 2007), além de reduzir a biodisponibilidade de elementos-traço fitotóxicos para as plantas complexando-os às suas moléculas (GONZÁLEZ et al., 2004; VODNIK et al., 2008).

Considerando que solos degradados contendo rejeitos da mineração de carvão apresentam sérias limitações físico-químicas para o crescimento e estabelecimento vegetal, os benefícios proporcionados pelos FMA precisam ser melhor investigados, de modo a incrementar a tecnologia de inoculação micorrízica em programas de revegetação desses ambientes.

Os resultados evidenciam a importância da inoculação controlada de FMA no crescimento de leguminosas arbóreas pelo aumento na absorção de elementos pouco móveis no solo, como é o caso do P e muitos elementos-traço. Com isso, os FMA podem desempenhar papel importante no enriquecimento da camada superficial do solo, disponibilizando esses nutrientes para outras espécies vegetais, acelerando o processo de recuperação de áreas impactadas pela deposição de rejeitos de mineração.

CONCLUSÕES

A inoculação de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) propiciou elevada colonização micorrízica para a bracatinga e maricá, beneficiando o crescimento dessas espécies em substrato contendo rejeito de mineração de carvão, sendo esse comportamento menos evidente para o angico-vermelho.

Mudas de angico-vermelho, bracatinga e maricá inoculadas com *A. colombiana*, *R. irregularis* e *A. morrowiae*, foram as mais eficientes com relação à absorção de P.

Apesar de se verificar redução nos teores de elementos-traço, a inoculação de FMA promoveu incrementos no acúmulo desses elementos na parte aérea das plantas em substrato contendo rejeito de mineração de carvão.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo fomento ao projeto de pesquisa proc. 561819/2010-6.

REFERÊNCIAS

BI, Y. L.; WU, F. Y.; WU, Y. K. Application of arbuscular mycorrhizal in ecological restoration of areas affected by coal mining in China. **Acta Ecologica Sinica**, v. 25, p. 2068-2073, 2005.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. In: LIMA, T. M.; NEVES, C. A. R. (Coord.). **Sumário mineral**. Brasília: DNPM, 141 p.56-57, 2014.

BÜNEMANN, E. K.; CONDRON, L. M. Phosphorus and sulphur cycling in terrestrial ecosystems. In: MARSCHNER, P.; RENGEL, Z. (Ed.). **Nutrient cycling in terrestrial ecossystms**. Berlin: Springer-Verlag, 2007. p. 65-85.

CABRAL, L.; SIQUEIRA, J. O.; SOARES, C. R. F. S.; PINTO, J. E. B. P. Retenção de metais pesados em micélio de fungos micorrízicos arbusculares. **Química Nova**, São Paulo, v. 33, n. 1, p. 25-29, 2010.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Valores orientadores para solos e águas subterrâneas. **Diário Oficial Estado [de]** São Paulo, Caderno Executivo I, Poder Executivo, São Paulo, n. 124, p. 36, 2014. Seção 1.

COSTA, C. N.; MEURER, E. J.; LIMA, C. V. S. de; SANTOS, R. C. dos. Contaminantes e poluentes do solo e do ambiente. In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de química do solo**. 5. ed. Porto Alegre: Evangraf, 2012. p. 201-241.

FARIA, S. M.; FRANCO, A. A.; CAMPELLO, E. F. C.; SILVA, E. M. R. **Recuperação de solos degradados com leguminosas noduladas e micorrizadas**. Seropédica: EMBRAPA Agrobiologia, 1998. 23 p. (EMBRAPA-CNPAB. Documentos, 77).

FERREIRA, D. F. **Sistemas de análise estatística para dados balanceados**. Lavras: UFLA, 1998. 141 p.

FOLLI-PEREIRA, M. da S.; MEIRA-HADDAD, L. S.; BAZZOLLI, D. M. S.; KASUYA, M. C. M. Revisão bibliográfica: micorriza arbuscular e a tolerância das plantas ao estresse. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1663-1679, 2012.

GIOVANNETTI, M.; MOSSE, B. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. **New Phytologist**, Oxford, v. 84, n. 3, p. 489-500, 1980.

GONZÁLEZ, M.; CARRILLO, R.; WRIGHT, S.; NICHOLS, K. The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements. **Environmental Pollution**, v. 130, p. 317-323, 2004.

HOAGLAND, D.; ARNON, D. I. **The water culture method for growing plants without soil**. California Agriculture Experimental Station Circular, 1950. 347p.

JOHNSON, N. C.; WILSON, G. W. T.; BOWKER, M.; WILSON, A. J.; MILLER, A. R. M. Resource limitation is a driver of local adaptation in mycorrhizal symbioses. **Proceedings of the National Academy of USA**, Washington, v. 107, p. 2093-2098, 2010.

KLAUBERG-FILHO, O.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; SOARES, C. R. F. S.; SILVA, S. Ecologia, função e potencial de aplicação de fungos micorrízicos arbusculares em condições de excesso de metais pesados. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M.; SILVA, A. P.; CARDOSO, E. J. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. v. 4, p. 85-144.

KOSKE, R. E.; GEMMA, J. N. A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhiza. **Mycological Research**, v. 92, p. 486-505, 1989.

LINDENMAYER, D. B.; KNIGHT, E. J.; CRANE, M. J.; MONTAGUE-DRAKE, R.; MICHAEL, D. R.; MACGREGOR, C. I. What makes an effective restoration planting for woodland birds? **Biological Conservation**, v. 143, p. 289-301, 2010.

MURPHY, J. & RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Anal. Chim. Acta**, 27. p. 31-36, 1962.

NOGUEIRA, M. A.; SOARES, C. R. F. S. Micorrizas arbusculares e elementos-traço. In: SIQUEIRA, J. O.; SOUZA, F. A.; CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M. (Ed.). **Micorrizas:** 30 anos de pesquisas no Brasil. Lavras: UFLA, 2010. p. 475-501.

POUYÚ-ROJAS, E.; SIQUEIRA, J. O. Micorriza arbuscular e fertilização do solo no desenvolvimento pós-transplante de mudas de sete espécies florestais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 1, p. 103-114, jan. 2000.

RILLIG, M. C.; CALDWELL, B. A.; WÖSTEN, H. A. B.; SOLLINS, P. Role of proteins in soil carbon and nitrogen storage: controls on persistence. **Biogeochemistry**, v. 85, p. 25-44, 2007.

SCHNEIDER, J.; LABORY, C. R. G.; RANGEL, W. M.; ALVES, E.; GUILHERME, L. R. G. Anatomy and ultrastructure alterations of *Leucaenaleucocephala* (Lam.) inoculated with mycorrhizal fungi in response to arsenic-contaminated soil. **Journal of Hazardous Materials**, v. 262, p. 1245-1258, 2013.

SHENG, M.; TANG, M.; CHEN, H.; YANG, B.; ZHANG, F.; HUANG, Y. Influence of arbuscular mycorrhizae on photosynthesis and water status of maize plants under salt stress. **Mycorrhiza**, v. 18, p. 287-296, 2008.

SILVA, L. F. O.; VALLEJUELO, S. F. O.; MARTINEZ-ARKARAZO, I.; CASTRO, K.; OLIVEIRA, M. L. S.; SAMPAIO, C. H.; BRUM, I. A. S.; LEÃO, F. B.; TAFFAREL, S. R.; MADARIAGA, J. M. Study of environmental pollution and mineralogical characterization of sediment rivers from Brazilian coal mining acid drainage. **Science of the Total Environment**, v. 447, p. 169-178, 2013.

SIQUEIRA, J. O.; SOARES, C. R. F. S.; SANTOS, J. G. D.; SCHNEIDER, J.; CARNEIRO, M. A. C. Micorrizas e a degradação do solo: caracterização, efeitos e ação recuperadora. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 5, p. 219-306, 2007.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A. **Análise de solos, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174 p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

VODNIK, D.; GRÈMANA, H.; MAÈEKA, I.; ELTERENB, J. T. van; KOVAÈEVIÈC, M. The contribution of glomalin related soil protein to Pb and Zn sequestration in polluted soil. **Science of Total Environment**, v. 392, p. 130-136, 2008.