



ARTIGO ORIGINAL

Kaio Gráculo Vieira Garcia^{1*}
Vânia Felipe Freire Gomes¹
Paulo Furtado Mendes Filho¹
Claudia Miranda Martins²
Aldênia Mendes Mascena de Almeida¹
José Maria Tupinambá da Silva Júnior¹

Tolerância de *Mimosa caesalpiniaefolia* Benth. associada a micorrizas arbusculares em substrato da mineração de manganês

Tolerance of Mimosa caesalpiniaefolia Benth combined with arbuscular mycorrhiza in manganese mining substrate

¹ Universidade Federal do Ceará – UFC,
Departamento de Ciência do Solo, Av. Mister
Hull, 2977 – Campus do Pici, Bloco 807,
60440-554, Fortaleza, CE, Brasil
² Universidade Federal do Ceará – UFC,
Departamento de Biologia, Av. Mister Hull,
2977 – Campus do Pici, Bloco 902, 60440-970,
Fortaleza, CE, Brasil

*Autor Correspondente:
E-mail: kaiovieira88@hotmail.com

PALAVRAS-CHAVE

Sabiá
Colonização Micorrízica
Fitoestabilização
Metais

KEYWORDS

Sabiá
Mycorrhiza colonization
Phytostabilization
Heavy metals

RESUMO: A exploração mineral é considerada uma das principais ações antrópicas que causam a poluição do solo com metais, dentre os quais se encontra o manganês (Mn), que quando em excesso pode causar sintomas de toxidez, inibir o crescimento das plantas e causar alterações nas comunidades vegetais. Objetivou-se avaliar os efeitos dos fungos micorrízicos arbusculares (FMA) na tolerância da espécie *Mimosa caesalpiniaefolia* Benth. ao substrato degradado pelo rejeito da mineração de Mn e mata preservada. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em arranjo fatorial 2 x 4, considerando-se: i) dois tipos de substrato (degradado pelo rejeito da mineração de Mn e mata preservada); ii) quatro tratamentos de inoculação com FMA (controle não inoculado, *Rhizophagus clarus*, *Claroideoglossum etunicatum* e Mix) com quatro repetições. Aos 60 dias após o transplante, as variáveis analisadas foram: massa da matéria seca da parte aérea e raiz, densidade de esporos, colonização micorrízica, teor de N e P na parte aérea, teor de Mn na parte aérea e raiz e o fator de translocação de Mn. A inoculação com FMA influencia de forma positiva no aumento da massa da matéria seca da parte aérea e raiz, bem como na tolerância da espécie *M. caesalpiniaefolia* Benth ao Mn. A espécie vegetal apresenta colonização micorrízica mesmo sob condições de baixa densidade de esporos no substrato com elevado teor de Mn. *M. caesalpiniaefolia* Benth atua como fitoestabilizadora em áreas degradadas pela mineração de Mn, independente da inoculação com FMA.

ABSTRACT: Mineral exploration is considered one of the major human activities that cause soil pollution with metals, among which is the manganese (Mn), which when in excess may be toxic, inhibiting the growth of plants and changing the vegetables communities. This study aimed to evaluate the effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the tolerance of the species *Mimosa caesalpiniaefolia* Benth to the substrate degraded by Mn mining waste and preserved forest. The experimental design was completely randomized in a factorial arrangement 2 x 4, considering: i) two types of substrate (degraded by Mn mining waste and preserved forest); ii) four inoculation treatments with AMF (non-inoculated control, *Rhizophagus clarus*, *Claroideoglossum etunicatum* and Mix) with four replications. The following variables were analyzed 60 days after transplant: dry matter of shoot and roots, spore density, mycorrhizal colonization, shoot N and P content, Mn content in shoot and root and factor translocation of the Mn. Inoculation with AMF positively influence the increase in dry matter of shoot and root, as well as the tolerance of the species *M. caesalpiniaefolia* Benth to the Mn. The vegetable species presents mycorrhizal colonization even under conditions of low spore density at the substrate with high Mn content. *M. caesalpiniaefolia* Benth acts as phytostabilizer in areas degraded by mining Mn, independent the inoculation with AMF.

Recebido: 12 Out. 2016
Aceito: 12 Nov. 2017

1 Introdução

A exploração mineral é uma atividade está ligada ao desenvolvimento econômico mundial, que gera matéria-prima para diversas indústrias e bens de consumo. Entre os diversos minerais explorados no mundo, o manganês (Mn) destaca-se principalmente na utilização para fabricação de aço, sendo utilizado como elemento de liga e no mercado da produção de pilhas (Brasil, 2009). Apesar dessa prática encontrar-se fortemente ligada ao desenvolvimento social, a atividade mineradora é considerada uma das grandes causas da degradação do solo, pois a retirada da vegetação e a movimentação intensa do solo realizada na abertura dos locais para extração do minério geram diversas consequências ambientais (García-Lorenzo et al., 2014).

Além disso, a extração mineral produz grandes quantidades de rejeitos, sendo considerada uma das principais ações antrópicas de poluição do solo com metais, dentre os quais se encontra o Mn, que quando em excesso pode causar toxidez, inibir o crescimento de plantas e causar alterações nas comunidades vegetais (Rivera-Becerril et al., 2013; Yang et al., 2015).

Diversas estratégias vêm sendo desenvolvidas a fim de remediar áreas contaminadas com metais pesados, no entanto, a grande maioria implica altos investimentos, além de poder gerar alterações irreversíveis nas propriedades do solo (Ali et al., 2013; Leung et al., 2013). Neste sentido, a busca por alternativas que minimizem este tipo de impacto tem se tornado uma preocupação ambiental constante.

Uma técnica recente e considerada bastante promissora que vem sendo utilizada na reabilitação dessas áreas é a Fitorremediação, que consiste na utilização de plantas para extrair, conter ou imobilizar metais pesados do solo (Vasconcelos et al., 2012). A eficiência dessa técnica pode ainda ser potencializada pela inoculação com fungos micorrízicos arbusculares (FMA) (Hassan et al., 2013), os quais podem conferir melhor absorção de água e nutrientes para as plantas, bem como atuar na redução da disponibilidade de metais por diferentes mecanismos (Meier et al., 2012). Dentre esses, destacam-se a diluição em tecidos vegetais devido ao crescimento das plantas (Christie et al., 2004; Schneider et al., 2013); redução na absorção devido à retenção e imobilização em certas estruturas fúngicas e raízes micorrizadas (Gonzalez-Chavez et al., 2002); quelação dos metais por compostos secretados pelos FMA, como a glomalina (Vodnik et al., 2008; Leung et al., 2013) e imobilização temporária em função do transporte através das hifas (Carneiro et al., 2001).

No entanto, estudos envolvendo leguminosas arbóreas, mais especificamente o Sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth.), associado a FMA e seu efeito em solos degradados pela mineração de Mn ainda são escassos. Objetivou-se avaliar os efeitos dos fungos micorrízicos arbusculares na tolerância da espécie *Mimosa caesalpiniaefolia* Benth. ao substrato degradado pelo rejeito da mineração de Mn e mata preservada.

2 Material e Métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciências do Solo (DCS) do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará (UFC), localizada no Campus do Pici, Fortaleza, Ceará (3°45'47" de latitude sul e 38°31'23" de longitude oeste, altitude média de 47m), por

um período de 60 dias. O clima da região é classificado como tropical, quente, com temperatura e precipitação médias anuais de 27 °C e 1600 mm respectivamente, sendo caracterizado por Köppen como tipo Aw⁷.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, em arranjo fatorial 2 x 4, considerando-se: i) dois tipos de substratos (degradado pelo rejeito e mata preservada); ii) quatro tratamentos de inoculação com FMA (não inoculado (controle), inoculado com *Rhizophagus clarus*; inoculado com *Claroideoglossum etunicatum* e inoculado com *R. clarus* + *C. etunicatum* (Mix)), com quatro repetições, constituindo 32 unidades experimentais.

Os substratos utilizados nesse experimento foram coletados a uma profundidade de 0-20 cm, em uma área de exploração mineral de Mn localizada no município de Ocara-CE (Figura 1). A coleta dos substratos foi realizada em duas áreas diferentes. A primeira é uma área de mata preservada, isenta do processo de mineração (A1), e a segunda é uma área degradada pelo rejeito da mineração de Mn (A2). Após a coleta, foi realizado o peneiramento do substrato em malha de 4 mm, visando à retirada de partículas grosseira.

As características químicas e físicas (Tabela 1) do substrato foram determinadas pelo Laboratório de Rotina de Solo e Água da UFC, seguindo os referenciais metodológicos da Embrapa (1997).

Os substratos foram distribuídos em vasos de plásticos com capacidade de 5 kg de substrato, sendo utilizados 4 kg de substrato por vaso, os quais receberam uma adubação básica com 6,75 mg de N, 25 mg de K, 10 mg de P e 7,5 mg de Ca por kg⁻¹ de substrato. As fontes dos nutrientes utilizados foram: NH₂CONH₂, KCl, Ca(H₂PO₄)₂·H₂O e CaSO₄ respectivamente.

As sementes de Sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth.) foram adquiridas da empresa Biosementes[®]. As mudas foram produzidas em bandejas de isopor com 128 células, colocando duas sementes por célula, na profundidade de 2 cm. O substrato utilizado para produção das mudas nas bandejas foi areia lavada e autoclavada a 121 °C a 1 atm de pressão por duas horas. Com 11 dias após a semeadura (DAS), foi realizado o desbaste em cada célula, mantendo-se a planta mais vigorosa. Após o estabelecimento da germinação, as mudas foram inoculadas com 40 g de solo inóculo contendo esporos e fragmentos de raízes de milho (*Zea mays* L.) colonizadas por fungos micorrízicos arbusculares (FMA) das espécies *Rhizophagus clarus* e *Claroideoglossum etunicatum* isoladamente e em mistura, por ocasião do transplantio das mudas para os vasos plásticos contendo substrato não estéril. Cada vaso recebeu duas mudas.

Os isolados de FMA utilizados nesse experimento foram provenientes do Banco de Inóculo do Setor de Microbiologia do Solo da UFC. O inóculo foi colocado aproximadamente a 4 cm, abaixo da superfície do substrato. As plantas foram mantidas em casa de vegetação e irrigadas diariamente durante todo o período de condução do experimento, que foi de 60 dias.

Aos 60 dias após o transplantio (DAT), as plantas tiveram a parte aérea cortada rente ao substrato, em seguida o material foi identificado, acondicionado em sacos de papel e levado para secar em estufa de circulação de ar forçada com temperatura em torno de 65 °C, para obtenção da massa da matéria seca da parte aérea. As raízes foram removidas do substrato, lavadas com água de torneira e secadas utilizando a mesma sequência da

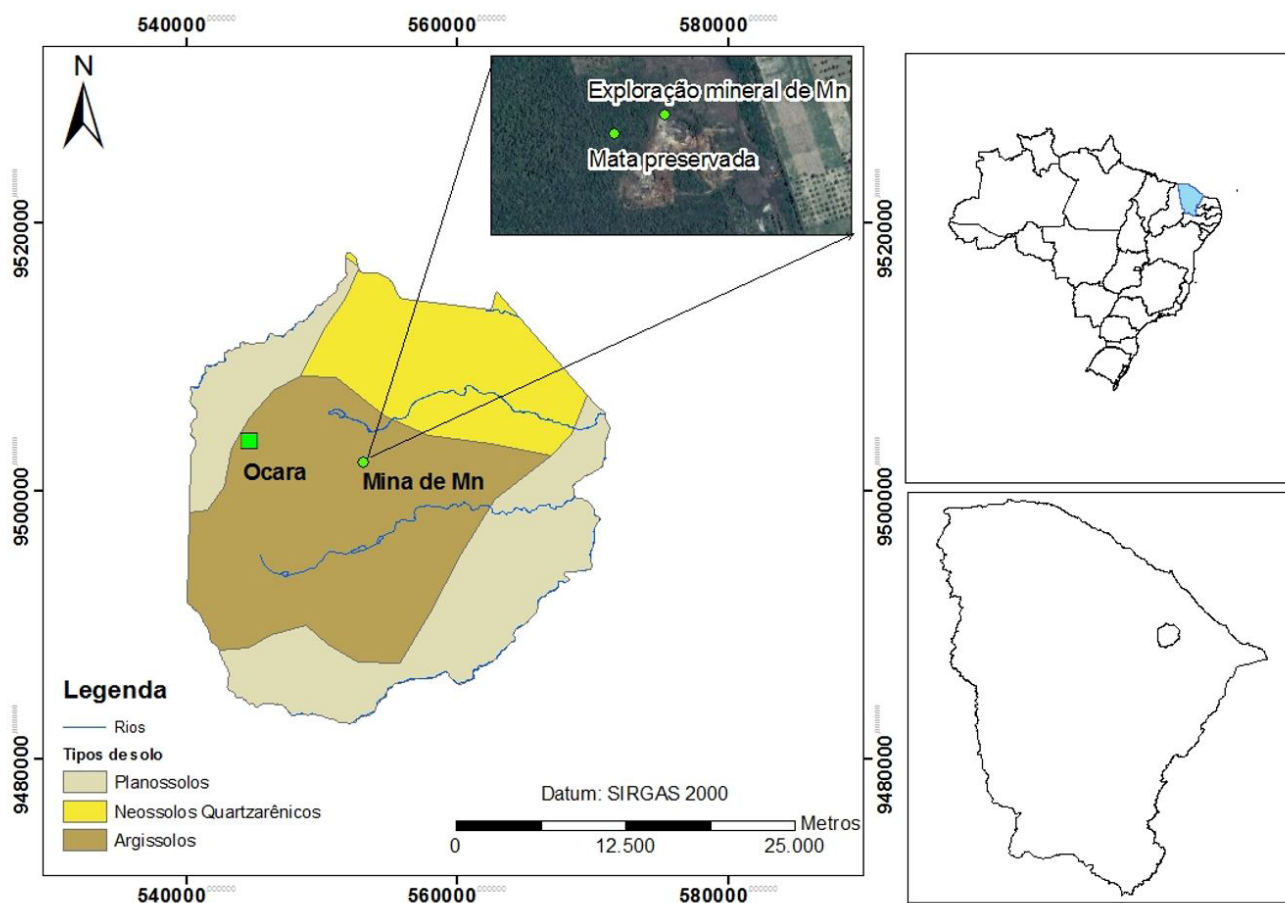


Figura 1. Localização e tipo de solo da área de estudo na região de Ocara, Ceará. Fonte: autor; Google Earth (2016).

Figure 1. Location and type of soil of the study area in the region of Ocara, Ceará. Source: author; Google Earth (2016).

parte aérea. Após a obtenção da massa da matéria seca da parte aérea e raiz, o material foi triturado em moinho do tipo Willey para determinação dos teores: N, P e Mn. Os teores de N total foram determinados pelo método semimicro Kjeldahl após digestão sulfúrica (Bremner & Mulvaney, 1982; Tedesco et al., 1995), e os demais após digestão nítrico-perclórica, sendo o P por colorimetria e o Mn por espectrofotometria de absorção atômica.

O fator de translocação de Mn foi determinado conforme Santillan et al. (2010) e calculado pela seguinte fórmula: $FT = (\text{Concentração de Mn na parte aérea} / \text{Concentração de Mn na raiz})$.

A densidade de esporos de FMA após o crescimento das mudas foi determinada através da extração de 100 g de solo via peneiramento úmido de cada amostra dos tratamentos, seguindo os procedimentos descritos por Gerdemann & Nicholson (1963). Para avaliação da colonização micorrízica, as raízes foram lavadas em água corrente e colocadas em um recipiente com solução de álcool a 70%. A clarificação e coloração das raízes para análise da colonização foram procedidas de acordo com a metodologia adaptada por Koske & Gemma (1989). A percentagem de colonização foi obtida segundo McGonigle et al. (1990).

Os dados foram submetidos à análise de variância, por meio do teste F ($p \leq 0,05$), e as médias foram comparadas entre si

pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$), utilizando-se o programa estatístico ASSISTAT versão 7.7 Beta (Silva & Azevedo, 2002).

3 Resultados e Discussão

A inoculação com *C. etunicatum* e Mix no substrato de mata preservada apresentou efeito significativo sobre a massa da matéria seca da parte aérea (MMSPA) (Figura 2A), com aumento de 27,7% e 27,8%, respectivamente, quando comparado ao tratamento controle. Não foi encontrada diferença significativa quando se comparou o efeito dos tratamentos de inoculação com FMA no substrato degradado pelo rejeito. De forma geral, plantas cultivadas no substrato degradado pelo rejeito apresentaram redução significativa na produção de MMSPA quando comparado às plantas cultivadas no substrato de mata preservada (Figura 2A).

Os maiores teores de Mn ($425,8 \text{ mg kg}^{-1}$) e elevada acidez presentes no substrato degradado pelo rejeito podem ter inibido o aumento da MMSPA, bem como atuação dos FMA neste ambiente, em consequência da maior absorção desse elemento pela planta, assim como observado também por Lins et al. (2007) em mudas de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. em solos sob impacto da mineração de Cu. Por outro lado, aumento significativo na produção de MMSPA foram observados por Cardoso et al. (2003) em plantas de soja inoculadas com *Glomus*

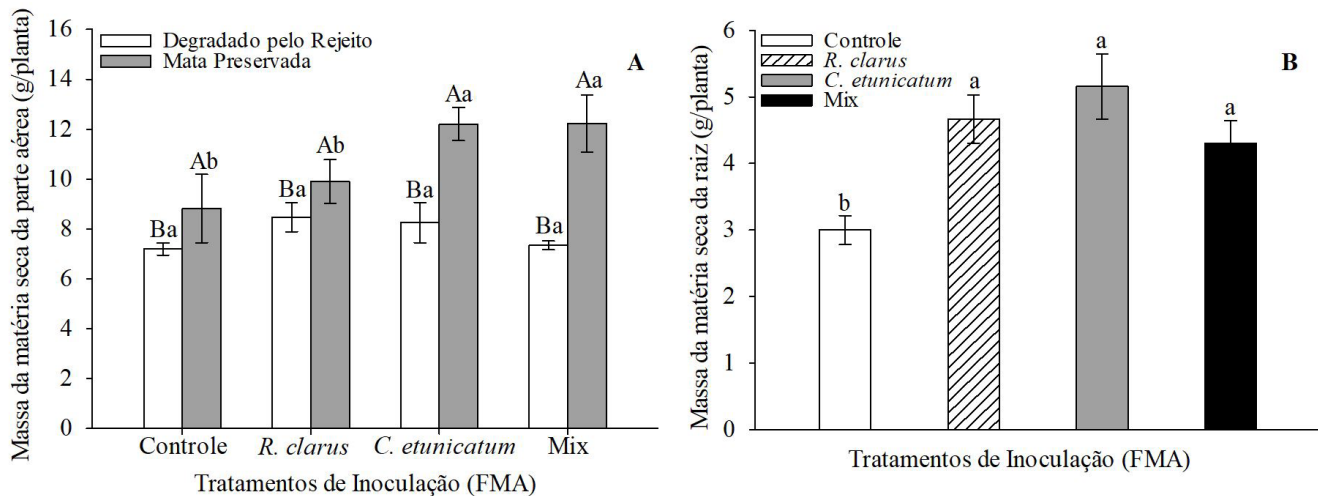


Figura 2. Efeito da interação entre tipo de substrato (TS) e tratamento de inoculação (FMA) sobre a massa da matéria seca da parte aérea (A) e efeito do fator tratamento de inoculação (FMA) sobre a massa da matéria seca da raiz (B) de *M. caesalpiniaefolia* Benth. Os valores representam a média de quatro repetições \pm erro padrão. Médias seguidas por letras iguais maiúsculas entre os tipos de substrato dentro de cada tratamento de inoculação com FMA, e minúsculas entre os tratamentos de inoculação em um mesmo tipo de substrato, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,01$).

Figure 2. Effect of the interaction among type of substrate (TS) and inoculation treatment (AMF) on the shoot dry matter (A) and effect of the inoculation treatment factor (AMF) on the root dry matter (B) of *M. caesalpiniaefolia* Benth. The values represent the average of four replications \pm standard error. Means followed by the same uppercase letters between the types of substrate within each inoculation treatment with AMF and tiny among inoculation treatments in the same type of substrate, do not differ by the Scott-Knott test ($p \leq 0,01$).

macrocarpum cultivadas em solo com elevados teores de Mn e por Solís-Domínguez et al. (2011) em plantas de algaroba associadas com *Glomus intraradices* em solo com Pb.

Para massa da matéria seca da raiz (MMSR) (Figura 2B), a inoculação com os tratamentos *R. clarus*, *C. etunicatum* e Mix proporcionou aumento significativo de 35,7%, 41,8% e 30,2%, respectivamente, quando comparado ao controle.

Dessa forma, é importante ressaltar a influência dos FMA no aumento da MMSR, uma vez que em áreas como a desse estudo a ausência de raízes podem causar redução na densidade de propágulos de FMA, comprometendo assim o potencial de revegetação da área (Pouyu-Rojas et al., 2006).

Resultados semelhantes no aumento da MMSR em plantas inoculadas com FMA também foram observados por Solís-Domínguez et al. (2011) trabalhando com FMA em plantas de algaroba cultivadas em solo da mineração de Zn. Jankong & Visoottiviseth (2008), ao estudarem três espécies de plantas inoculadas com FMA em solo contaminado com As, observaram que a MMSR da espécie *Melastoma malabathricum* inoculada com FMA apresentou incremento de 78,9% quando comparado à ausência de inoculação.

Com relação à densidade de esporos (Figura 3A), é possível observar que houve redução significativa no substrato degradado pelo rejeito quando comparado ao de mata preservada. Ao observar a influência dos tratamentos de inoculação com FMA, é possível verificar que somente houve efeito significativo no substrato de mata preservada, no qual o FMA *C. etunicatum* proporcionou aumento na densidade de esporos de 41,4%, quando comparado ao tratamento controle (Figura 3A).

Schneider et al. (2012), estudando o uso de pteridófitas associadas a FMA em solo contaminado com arsênio, também verificaram redução na densidade de esporos de FMA no solo com rejeito em relação ao solo menos contaminado. Resultados

semelhantes também foram observados por Klauberg-Filho et al. (2002), os quais constataram maior densidade de esporos em locais com menor contaminação por metais pesados. De acordo com Stürmer & Bellei (1994), possivelmente este fato possa estar relacionado com o melhor crescimento vegetativo da planta simbiótica e o maior nível de colonização micorrízica em solos com menor teor de contaminação, o que foi evidenciado no presente estudo. Outra hipótese a ser considerada na redução da densidade de esporos no solo degradado pelo rejeito da mineração de Mn é o fato do menor desenvolvimento das plantas, aliado à menor presença de matéria orgânica e dos elevados teores de Mn quando comparados ao solo de mata preservada. Fatores estes que, conforme Pawlowska & Charvat (2004), podem limitar a germinação dos esporos, desenvolvimento do micélio extrarradicular e esporulação do fungo.

Com relação à colonização micorrízica (CM) (Figura 3B), observa-se que houve redução significativa para esta variável no substrato degradado pelo rejeito quando comparado ao de mata preservada, demonstrando assim comportamento similar à densidade de esporos de FMA no solo. Diante desses resultados é importante ressaltar que, mesmo sob um baixo nível de esporos de FMA, as plantas cultivadas no substrato degradado pelo rejeito apresentaram colonização micorrízica. Em geral, os níveis de colonização micorrízica no presente estudo foram considerados altos, quando comparados a outros resultados na literatura.

Rivera-Becerril et al. (2013), ao analisarem os impactos do Mn no meio ambiente, interações entre solos, plantas e micorrizas arbusculares, observaram ausência de colonização micorrízica em plantas de *A. psilostachya* que cresceram em solos com resíduos da mineração de Mn, mesmo apresentando 44,7 esporos/250 g de solo. Em contrapartida, esses autores relatam que essa mesma espécie cultivada em solo de mata

nativa apresentou valores superiores na colonização micorrízica e na densidade de esporos em comparação com as plantas cultivadas em resíduo da mineração de Mn. Por outro lado, Nogueira et al. (2007), estudando a influência de micorrizas arbusculares na extração de Fe e Mn no solo por plantas de soja, observaram uma taxa de colonização micorrízica de 29% e 35%, respectivamente, para as espécies de FMA *G. etunicatum* e *G. macrocarpum*. Já Cardoso et al. (2003), trabalhando com absorção e translocação de Mn por plantas de soja micorrizadas, relataram baixos percentuais de colonização radicular, atingindo uma média de 4,5%.

Para a o teor de nitrogênio (N) na parte aérea (Figura 4A), observa-se que as plantas de *M. caesalpiniaefolia* Benth. apresentaram aumento significativo deste nutriente quando cultivadas no substrato de mata preservada (13,78 mg kg⁻¹), comparado ao degradado pelo rejeito. Todavia, esses resultados já eram esperados, tendo em vista que o substrato de mata preservada apresentava maiores teores de matéria orgânica e N (Tabela 1).

Ao analisar o efeito dos tratamentos de inoculação com FMA sobre o teor de N na parte aérea (Figura 4B), observa-se que o tratamento Mix apresentou aumento significativo no teor

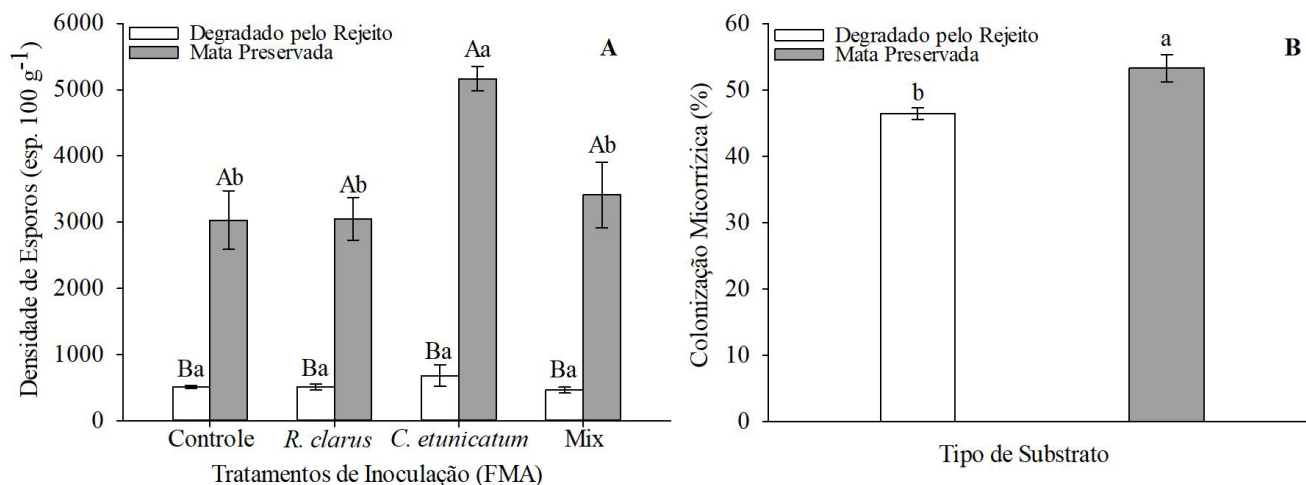


Figura 3. Efeito da interação entre tipo de substrato (TS) x tratamento de inoculação (FMA) sobre a densidade de esporos (A) e efeito do fator tipo de substrato (TS) sobre a colonização micorrízica radicular (B) de *M. caesalpiniaefolia* Benth. Os valores representam a média de quatro repetições \pm erro padrão. Médias seguidas por letras iguais maiúsculas entre os tipos de substrato dentro de cada tratamento de inoculação com FMA, e minúsculas entre os tratamentos de inoculação em um mesmo tipo de substrato, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,01$).

Figure 3. Effect of the interaction among type of substrate (TS) and inoculation treatment (AMF) on the spore density (A) and effect of the inoculation treatment factor (AMF) on the mycorrhizal colonization (B) of *M. caesalpiniaefolia* Benth. The values represent the average of four replications \pm standard error. Means followed by the same uppercase letters between the types of substrate within each inoculation treatment with AMF and tiny among inoculation treatments in the same type of substrate, do not differ by the Scott-Knott test ($p \leq 0,01$).

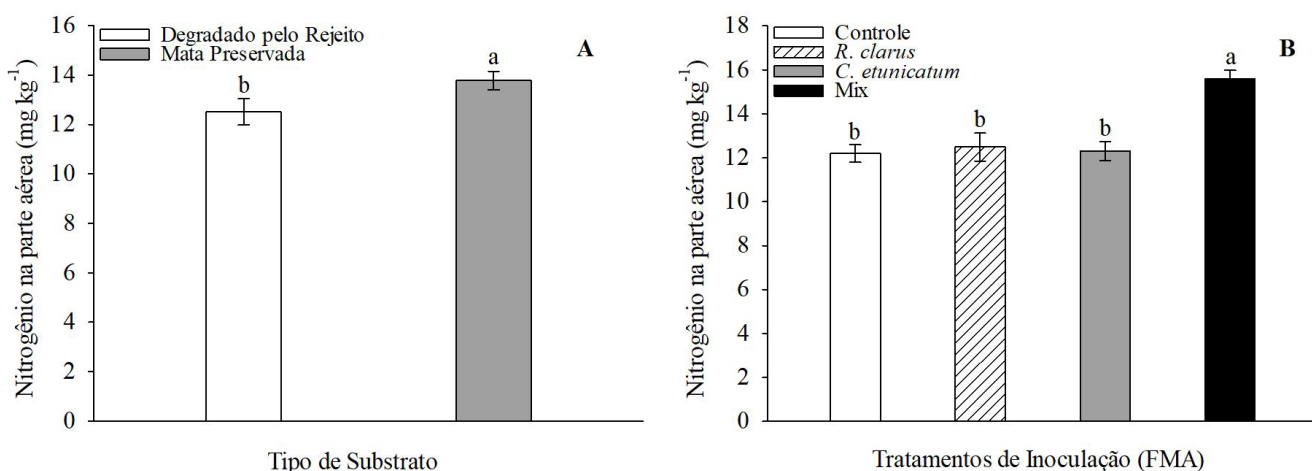


Figura 4. Efeito do fator tipo de substrato (TS) (A) e tratamento de inoculação (FMA) (B) sobre o teor de nitrogênio da parte aérea de *M. caesalpiniaefolia* Benth. Os valores representam a média de quatro repetições \pm erro padrão. Médias seguidas por letras iguais minúsculas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,01$).

Figure 4. Effect of type factor of substrate (TS) (A) and inoculation treatment (AMF) (B) on the shoot nitrogen content of *M. caesalpiniaefolia* Benth. The values represent the average of four replications \pm standard error. Means followed by the same lowercase letters do not differ by the Scott-Knott test ($p \leq 0,01$).

deste nutriente (15,60 mg kg⁻¹) quando comparado aos demais tratamentos, inclusive o controle.

De acordo com Shukla et al. (2012), o nitrogênio é considerado um dos elementos essenciais de grande importância para o crescimento e desenvolvimento das plantas, principalmente em áreas sob condições limitantes deste nutriente. Nestas áreas, a presença de FMA pode favorecer a absorção de diversos elementos considerados como essenciais, por exemplo, o N (Johnson, 2010). Segundo Hodge et al. (2001), as hifas extraradiculares de FMA são capazes de absorver amônio, nitrato e alguns aminoácidos em seu entorno e translocar o N para a planta.

Aram & Golchin (2013), ao estudarem o efeito de FMA sobre a concentração de nitrogênio em *Berseem clover* em solo contaminado com cádmio, relataram maior incremento no acúmulo de N em plantas inoculadas por FMA comparado a plantas não inoculadas. Estes resultados também corroboram com os obtidos por Guo et al. (2013) ao trabalharem com inoculação de plantas de milho e sorgo cultivadas em rejeitos de minas contendo metais de terras raras.

Com relação aos teores de P, não houve efeito das interações e nem dos tratamentos de inoculação com FMA (não apresentados). Resultados semelhantes foram observados por Cardoso et al. (2003) ao trabalharem com plantas de soja inoculadas com FMA sob doses crescentes desse elemento. Esses autores relataram que não houve efeito da micorrização quanto aos teores de P na parte aérea. Conforme Antonioli & Kaminski (1991), nem sempre a micorrização é caracterizada por representar benefício entre os simbiontes.

Quanto aos teores de Mn na parte aérea e raiz, somente houve efeito significativo do fator tipo de substrato (Figura 5). Plantas de *M. caesalpiniaefolia* Benth. aumentaram significativamente os teores de Mn na parte aérea e raiz quando cultivadas no substrato degradado pelo rejeito (Figura 5), o que pode ser explicado em função da maior disponibilidade desse elemento presente nesse substrato em comparação ao de mata preservada (Tabela 1).

Apesar de as plantas terem aumentado os teores de Mn em resposta aos maiores níveis deste elemento no substrato (degradado pelo rejeito), os teores de Mn na parte aérea não alcançaram valores considerados tóxicos para a maioria das espécies vegetais em geral (400 mg kg⁻¹ de Mn na massa seca da parte aérea) (Kabata-Pendias & Pendias, 2001).

Entretanto, os maiores teores de Mn encontrados nas raízes (13801,22 e 6425,03 mg kg⁻¹ de Mn) evidenciam de certa forma a redução desse elemento para a parte aérea, assim como mostrado na Tabela 2 com o fator de translocação, o que caracteriza de certa forma o aumento de tolerância dessa espécie vegetal e sua possibilidade de utilização em programas de fitoestabilização.

De acordo com Santos et al. (2007) e Santibáñez et al. (2008), plantas fitoestabilizadoras são caracterizadas por absorver

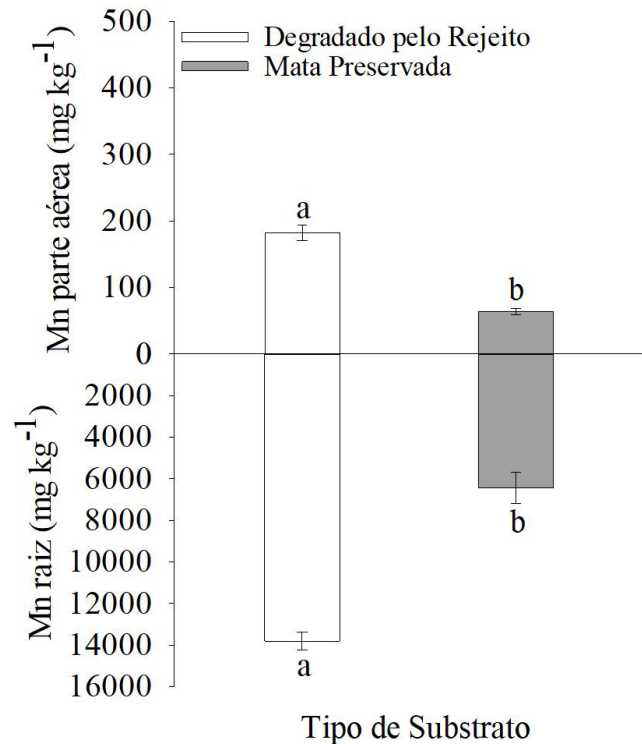


Figura 5. Efeito do fator tipo de substrato (TS) sobre o teor de Mn na parte aérea e na raiz de *M. caesalpiniaefolia* Benth. Os valores representam a média de quatro repetições ± erro padrão. Médias seguidas por letras iguais minúsculas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,01$).

Figure 5. Effect of type factor of substrate (TS) on the Mn content in shoot and root of *M. caesalpiniaefolia* Benth. The values represent the average of four replications ± standard error. Means followed by the same lowercase letters do not differ by the Scott-Knott test ($p \leq 0.01$).

Tabela 1. Características químicas e físicas do substrato de mata preservada e degradado pelo rejeito da mineração de Mn utilizado para o cultivo de *M. caesalpiniaefolia* Benth.

Table 1. Chemical and physical characteristics of the substrate of forest preserved and degraded by mining tailings Mn used for growing *M. caesalpiniaefolia* Benth.

A ⁽¹⁾	pH	Al	Ca	Mg	Na	K	S	H+Al	P	N	M.O.
	(H ₂ O)	----- (cmolc/kg) -----						(mg/kg)	----- (g/kg) -----		
SMP	6,70	0,1	3,7	1,1	0,04	0,35	5,19	2,2	6,8	1,12	15,52
SDR	4,95	0,2	1,4	1,2	0,12	0,15	2,87	4	2,9	0,28	3,93
A	Mn	Fe	Cu	Zn	Areia			Silte	Argil	CT	
	----- (mg/kg) -----						----- (%) -----				
SMP	253,5	13,72	2,57	6,26	76,97			13,15	9,88	FA	
SDR	425,8	82,81	2,39	2,91	72,81			16,62	10,57	FA	

⁽¹⁾A = amostra; SMP = substrato de mata preservada; SDR = substrato degradado pelo rejeito da mineração de manganês; CT = classificação textural; FA = franco-arenoso.

Tabela 2. Fator de translocação do Mn em *M. caesalpiniaefolia* Benth. cultivada em dois tipos de substrato (degradado pelo rejeito da mineração de Mn e mata preservada) e quatro tratamentos de inoculação com FMA.

Table 2. Mn translocation factor in *M. caesalpiniaefolia* Benth. grown on two types of substrate (degraded by Mn mining waste and preserved forest) and four inoculation treatments with AMF.

Tratamentos de Inoculação (FMA)	Fator de Translocação do Mn	
	Degradado pelo Rejeito	Mata Preservada
Controle	0,0143 ± 0,0020	0,0122 ± 0,0028
<i>R. clarus</i>	0,0124 ± 0,0018	0,0159 ± 0,0053
<i>C. etunicatum</i>	0,0113 ± 0,0016	0,0079 ± 0,0017
Mix	0,0153 ± 0,0019	0,0125 ± 0,0016

grande quantidade de um metal, mantendo-o principalmente nas raízes. Espécies com essas propriedades podem facilitar o processo de imobilização do metal, reduzindo dessa forma sua disponibilidade para outros organismos e a lixiviação do contaminante para áreas não contaminadas.

Mesmo sem o efeito dos tratamentos de inoculação, esses resultados demonstram o potencial desta planta como tolerante a elevadas concentrações de Mn. Tal estratégia pode estar relacionada com algum mecanismo de exclusão da própria planta, o que lhe permite formar complexos de Mn mais estáveis em suas raízes, resultando em uma translocação limitada para parte aérea, assim como demonstrado por Santillán et al. (2010) ao estudar o acúmulo de Mn em plantas de uma zona de mineração. Resultados semelhantes também foram observados por Cipriani et al. (2013) em *Acacia mangium* e *Mimosa caesalpiniaefolia* com relação ao acúmulo de As.

O fator de translocação (FT) de Mn variou de 0,0113 a 0,0153 para o substrato degradado pelo rejeito e de 0,0079 a 0,0159 para o de mata preservada (Tabela 2).

Em geral, os resultados encontrados nesse estudo revelam que plantas inoculadas com *C. etunicatum* apresentaram menor capacidade em translocar Mn para a parte aérea em ambos os substratos (degradado pelo rejeito e mata preservada) em relação ao tratamento controle. Sobretudo, os valores verificados no presente estudo demonstram restrição na translocação de Mn para parte aérea, já que somente valores maiores que 1 são considerados elevados (Deng et al., 2004). Resultados semelhantes foram observados por Rangel et al. (2014) ao estudarem o efeito protetor dos FMA contra a toxidez por As em espécies leguminosas. Esses autores verificaram valores de FT <1 e constataram que a inoculação com FMA reduz a translocação de As da raiz para parte aérea em todas as espécies de leguminosas estudadas.

De acordo com Santillán et al. (2010), as plantas podem ser classificadas como tolerantes quando o FT <1 e acumuladoras de Mn quando FT >1. Dessa forma, os resultados obtidos no presente estudo demonstram a capacidade de tolerância das plantas de sabiá, principalmente quando inoculadas com *C. etunicatum*, reforçando mais uma vez a possibilidade de uso delas em programas de fitorremediação que tem a raiz como agente principal, como no caso da fitoestabilização.

4 Conclusões

A inoculação com fungos micorrízicos arbusculares, principalmente *C. etunicatum* e Mix influencia de forma positiva na tolerância da espécie *Mimosa caesalpiniaefolia* Benth. ao manganês.

A espécie *M. caesalpiniaefolia* Benth. apresenta colonização micorrízica radicular mesmo sob condições de baixa densidade de esporos no substrato com elevado teor de manganês.

Independente da inoculação com fungos micorrízicos arbusculares, plantas de *M. caesalpiniaefolia* Benth. são consideradas como fitoestabilizadoras em áreas degradadas pela mineração de manganês.

Referências

- ALI, H.; KHAN, E.; SAJAD, M. A. Phytoremediation of heavy metals – Concepts and applications. *Chemosphere*, v. 91, n. 7, p. 869-881, 2013.
- ANTONIOLLI, Z. I.; KAMINSKI, J. Micorrizas. *Ciência Rural*, v. 2, n. 3, p. 441-455, 1991.
- ARAM, H.; GOLCHIN, A. The effects of arbuscular mycorrhizal fungi on nitrogen concentration of berseem clover in contaminated soil with cadmium. *Journal of Chemical Health Risks*, v. 3, n. 2, p. 35-38, 2013.
- BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. *Economia mineral do Brasil*. Brasília: DNPM, 2009.
- BREMNER, J. M.; MULVANEY, C. S. Total nitrogen. In: PAGE, A. L. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Madison: American Society of Agronomy, 1982. p. 595-624.
- CARDOSO, E. J. B. N.; NAVARRO, R. B.; NOGUEIRA, M. A. Absorção e translocação de manganês por plantas de soja micorrizadas, sob doses crescentes deste nutriente. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n. 3, p. 415-423, 2003.
- CARNEIRO, M. A. C.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Estabelecimento de plantas herbáceas em solo com contaminação de metais pesados e inoculação de fungos micorrízicos arbusculares. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 36, n. 12, p. 1443-1452, 2001.
- CHRISTIE, P.; LI, X.; CHEN, B. Arbuscular mycorrhiza can depressa translocation of zinc to shoots of host plants in soils moderately polluted with zinc. *Plant and Soil*, v. 261, p. 209-217, 2004.
- CIPRIANI, H. N.; DIAS, L. E.; COSTA, M. D.; CAMPOS, N. V.; AZEVEDO, A. A.; GOMES, R. J.; FIALHO, I. F.; AMEZQUITA, S. P. M. Arsenic toxicity in *Acacia mangium* willd. and *Mimosacaesalpiniaefolia* benth. seedlings. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n. 5, p. 1423-1430, 2013.
- DENG, H.; YE, Z. H.; WONG, M. H. Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China. *Environmental Pollution*, v. 132, n. 1, p. 29-40, 2004.
- EMBRAPA. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212 p.
- GARCÍA-LORENZO, M. L. G.; PEREZ, C.; MOLINA-RUIZ, J.; MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, M. J. Mobility indices for the assessment of

- metal contamination in soils affected by old mining activities. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 147, p. 117-129, 2014.
- GERDEMANN, J. W.; NICHOLSON, T. H. Spore of mycorrhizal Endogene specie extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society*, v. 46, p. 235-244, 1963.
- GONZALEZ-CHAVEZ, C.; D'HAEN, J.; VANGRONSVELD, J.; DODD, J.C. Copper sorption and accumulation by the extraradical mycelium of different *Glomus* spp. (arbuscular mycorrhizal fungi) isolated from the same polluted soil. *Plant and Soil*, v. 240, n. 2, p. 287-297, 2002.
- GUO, W., ZHAO, R. X.; ZHAO, W.; ZHANG, J. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) grown in rare earth elements of mine tailings. *Applied Soil Ecology*, v. 72, p. 85-92, 2013.
- HASSAN, S. E.; HIJRI, M.; ARNAUD, M. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on trace metal uptake by sunflower plants grown on cadmium contaminated soil. *New Biotechnology*, v. 30, n. 6, p. 780-787, 2013.
- HODGE, A.; CAMPBELL, C. D.; FITTER, A. H. An arbuscular mycorrhizal fungus accelerates decomposition and acquires nitrogen directly from organic material. *Nature*, v. 413, n. 6853, p. 297-299, 2001.
- JANKONG, P.; VISOOTTIVISETH, P. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on plants growing on arsenic contaminated soil. *Chemosphere*, v. 72, n. 7, p. 1092-1097, 2008.
- JOHNSON, N. C. Resource stoichiometry elucidates the structure and function of arbuscular mycorrhizas across scales. *The New Phytologist*, v. 185, n. 3, p. 631-647, 2010.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. *Trace elements in soils and plants*. Boca Raton: CRC Press, 2001. 413 p.
- KLAUBERG-FILHO, O.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Fungos micorrízicos arbusculares em solos de área poluída com metais pesados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, n. 1, p. 125-134, 2002.
- KOSKE, R. E.; GEMMA, J. N. A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. *Mycological Research*, v. 92, n. 4, p. 486-505, 1989.
- LINS, C. E. L., MAIA, L. C.; CAVALCANTE, U. M. T.; SAMPAIO, E. V. S. B. Efeito de fungos micorrízicos arbusculares no crescimento de mudas de *Leucaena leucocephala* (LAM.) de wit. em solos de caatinga sob impacto de mineração de cobre. *Revista Árvore*, v. 31, n. 2, p. 355-363, 2007.
- LEUNG, H. M.; WANG, Z. W.; YE, Z. H.; CHEUNG, K. C. Interactions between arbuscular Mycorrhizae and plants in Phytoremediation of metal-contaminated soils: a review. *Pedosphere*, v. 23, n. 5, p. 549-563, 2013.
- MCGONIGLE, T. P.; MILLER, M. H.; EVANS, D. G.; FAIRCHILD, G. L.; SWAN, J. A. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, v. 115, n. 3, p. 495-501, 1990.
- MEIER, S.; BORIE, F.; CURAQUEO, G.; BOLAN, N.; CORNEJO, P. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on metallophyte and agricultural plants growing at increasing copper levels. *Applied Soil Ecology*, v. 61, p. 280-287, 2012.
- NOGUEIRA, M. A.; NEHLS, U.; HAMPP, R.; PORALLA, K.; CARDOSO, E. J. B. N. Mycorrhiza and soil bacteria influence extractable iron and manganese in soil and uptake by soybean. *Plant and Soil*, v. 298, n. 1-2, p. 273-284, 2007.
- PAWLOWSKA, T. E.; CHARVAT, I. Heavy-metal stress and developmental patterns of arbuscular mycorrhizal fungi. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 70, n. 11, p. 6643-6649, 2004.
- POUYU-ROJAS, E., SIQUEIRA, J. O.; SANTOS, J. G. D. Compatibilidade simbiótica de fungos micorrízicos arbusculares com espécies arbóreas tropicais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, n. 3, p. 413-424, 2006.
- RANGEL, W. M.; SCHNEIDER, J.; SOUZA, C. E.; SOUSA, S. C.; GUIMARÃES, G. L.; SOUZA, M. F. Phytoprotective effect of arbuscular mycorrhizal fungi species against arsenic toxicity in tropical leguminous species. *International Journal of Phytoremediation*, v. 16, n. 7-8, p. 840-858, 2014.
- RIVERA-BECERRIL, F.; JUÁREZ-VÁZQUEZ, L. V.; HERNÁNDEZ-CERVANTES, S. C.; ACEVEDO-SANDOVAL, O. A.; VELA-CORREA, G.; CRUZ-CHÁVEZ, E.; MORENO-ESPÍNDOLA, I. P.; ESQUIVEL-HERRERA, A.; LEÓN-GONZÁLEZ, F. Impacts of manganese mining activity on the environment: interactions among soil, plants, and arbuscular mycorrhiza. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 64, n. 2, p. 219-227, 2013.
- SANTIBÁÑEZ, C.; VERDUGO, C.; GINOCCHIO, R. Phytostabilization of copper mine tailings with biosolids: Implications for metal uptake and productivity of *Lolium perenne*. *The Science of the Total Environment*, v. 395, n. 1, p. 1-10, 2008.
- SANTILLÁN, L. F. J.; LUCHO-CONSTANTINO, C. A.; VÁZQUEZ-RODRÍGUEZ, G. A.; CERÓN-UBILLA, N. M.; BELTRÁN-HERNÁNDEZ, R. I. Manganese accumulation in plants of the mining zone of Hidalgo, Mexico. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 15, p. 5836-5841, 2010.
- SANTOS, F. S.; MAGALHAES, M. O. L.; MAZUR, N.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B. Chemical amendment and phytostabilization of an industrial residue contaminated with Zn and Cd. *Scientia Agrícola*, v. 64, n. 5, p. 506-512, 2007.
- SCHNEIDER, J.; LABORY, C. R. G.; RANGEL, W. M.; ALVES, E.; GUILHERME, L. R. G. Anatomy and ultrastructure alterations of *Leucaena leucocephala* (Lam.) inoculated with mycorrhizal fungi in response to arsenic-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, v. 262, n. 15, p. 1245-1258, 2013.
- SCHNEIDER, J.; OLIVEIRA, L. M.; GUILHERME, L. R. G.; STÜRMER, S. L.; SOARES, C. R. F. S. Espécies tropicais de pteridófitas em associação com fungos micorrízicos arbusculares em solo contaminado com arsênio. *Química Nova*, v. 35, n. 4, p. 709-714, 2012.
- SHUKLA, A., KUMAR, A.; JHA, A.; RAO, D. Phosphorus threshold for arbuscular mycorrhizal colonization of crops and tree seedlings. *Biology and Fertility of Soils*, v. 48, n. 1, p. 109-116, 2012.
- SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 4, n. 1, p. 71-78, 2002.

SOLÍS-DOMÍNGUEZ, F. A.; VALENTÍN-VARGAS, A.; CHOROVER, J.; MAIER, R. M. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on plant biomass and the rhizosphere microbial community structure of mesquite grown in acidic lead/zinc mine tailings. *The Science of the Total Environment*, v. 409, n. 6, p. 1009-1016, 2011.

STÜRMER, S. L.; BELLEI, M. M. Composition and seasonal variation of spore populations of arbuscular mycorrhizal fungi in dune soils on the island of Santa Catarina, Brazil. *Canadian Journal of Botany*, v. 72, n. 3, p. 359-363, 1994.

TEDESCO, M. J.; VOLKWEISS, S. J.; BOHNEN, J. *Análise de solo, plantas e outros materiais*. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.

VASCONCELOS, M. A.; PAGLIUSO, D.; SOTOMAIOR, V. S. Fitorremediação: uma proposta de descontaminação do solo. *Estudos de Biologia: Ambiente e Diversidade*, v. 34, n. 83, p. 261-267, 2012.

VODNIK, D.; GRČMAN, H.; MAČEK, I.; ELTEREN, J. T.; KOVAČEVIČ, M. The contribution of glomalin-related soil protein to Pb and Zn sequestration in polluted soil. *The Science of the Total Environment*, v. 392, n. 1, p. 130-136, 2008.

YANG, W., DING, Z.; ZHAO, F.; YANG, X. Comparison of manganese tolerance and accumulation among 24 *Salix* clones in a hydroponic experiment: Application for phytoremediation. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 149, p. 1-7, 2015.

Contribuição dos autores: Kaio Gráculo Vieira Garcia conduziu o experimento, realizou as análises (químicas, físicas e microbiológicas) analisou os dados estatísticos, participou da escrita do manuscrito e realizou a tradução do resumo, tabelas e figuras; Vânia Felipe Freire Gomes, Paulo Furtado Mendes Filho e Claudia Miranda Martins auxiliaram na orientação e desenvolvimento do experimento e na revisão ortográfica do manuscrito; José Maria Tupinambá da Silva Júnior e Aldênia Mendes Mascena de Almeida auxiliaram na condução do experimento, realização das análises e revisão ortográfica do manuscrito.

Fonte de financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Conflito de interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.