

RETENÇÃO DE METAIS PESADOS EM MICÉLIO DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES

Lucélia Cabral

Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 7712, 91540-000 Porto Alegre – RS, Brasil

José Oswaldo Siqueira e Cláudio Roberto Fonsêca Sousa Soares*

Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, CP 3037, 37200-000 Lavras - MG, Brasil

José Eduardo Brasil Pereira Pinto

Departamento de Agricultura, Universidade Federal de Lavras, CP 3037, 37200-000 Lavras – MG, Brasil

Recebido em 26/8/08; aceito em 7/6/09; publicado na web em 27/11/09

RETENTION OF HEAVY METALS BY ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI MYCELIUM. This work evaluated the kinetics as well as the retention capacity of Cu, Zn, Cd, and Pb by arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) mycelium. The metal retention is a fast process with Cu being retained 3, 30, and 60 times faster than Zn, Cd, and Pb, respectively. Metal retention capacity varied amongst the different tested AMF species and decreased in the following order: Cu>Zn>>Cd>Pb. The *Glomus clarum* mycelium showed the highest retention capacity for Cu, Cd and Pb, whereas Zn was mostly retained by *Gigaspora gigantea* mycelium. The simultaneous application of all tested metals in solution decreased Cu and Zn retention by AMF mycelium. The high retention capacity of Cu and Zn by mycelium of *G. clarum* and *G. gigantea* suggests a promising use of these isolates in phytoremediation.

Keywords: arbuscular mycorrhiza; biosorption; soil pollution.

INTRODUÇÃO

A contaminação do solo por metais pesados causa interferência nas diversas formas de vida e no funcionamento dos ecossistemas como um todo. Uma das consequências é a difícil revegetação de áreas contaminadas e, por isso, há grande interesse no papel de microrganismos do solo capazes de minimizar a toxidez destes metais no ambiente. Alguns estudos têm demonstrado o potencial dos microrganismos tais como algas, bactérias e fungos para retenção e biosorção de metais pesados no ambiente.¹ Dentre os fungos do solo destacam-se os que formam simbiose mutualística com as plantas denominadas micorriza arbuscular (MA).² Esta simbiose é caracterizada pela formação de estrutura simbiótica nas raízes com colonização intracelular do córtex, formação de hifas enroladas e outras profusamente ramificadas (denominadas arbúsculos) e micélio extra-radicular que cresce solo adentro além da rizosfera.³ Os fungos formadores de micorriza arbuscular (FMAs) são cosmopolitas, com ocorrência abundante mesmo em áreas com elevado grau de degradação⁴ e são encontrados em quase todas as famílias de espécies herbáceas e arbóreas, especialmente aquelas de interesse para recuperação ambiental.⁵ Apesar de a poluição química afetar negativamente vários processos do ciclo de vida dos FMAs, tais como germinação de esporos, crescimento de hifas e colonização radicular, tem-se verificado a ocorrência de vários isolados fúngicos aparentemente adaptados ao excesso de metais pesados em diversas regiões do mundo.⁶

A introdução de FMAs em ambientes contaminados pode exercer efeito positivo na tolerância das plantas a elementos tóxicos, atuando como agentes de proteção para as mesmas,⁷ além de aumentar a extração dos metais pesados do solo.⁸ Este processo é de grande interesse para a fitorremediação, visto que a maioria das plantas forma micorriza mesmo em condições de elevada contaminação por metais.⁶

Embora haja suficiente evidência da contribuição das MAs para o crescimento das plantas em solos contaminados por metais pesados, os mecanismos envolvidos na proteção ainda estão sendo pesquisados. Vários mecanismos têm sido sugeridos para explicar esses efeitos,

tais como, diluição dos metais nos tecidos vegetais em decorrência do favorecimento da maior produção de massa;⁹ exclusão da absorção por meio da precipitação ou quelação dos metais na rizosfera¹⁰ e redução da absorção pela planta devido à retenção e imobilização dos metais nas estruturas fúngicas.¹¹ A capacidade de retenção de metais pesados pelos FMAs pode ser diferenciada em função das características morfo-anatômicas do micélio,¹² assim como o teor e estrutura da quitina e dos diferentes componentes da parede celular dos fungos.^{13,14}

O conhecimento dos processos envolvidos na retenção de metais pesados pelos FMAs, seja pelo seu papel na maior tolerância das plantas ao excesso de metais pesados no solo ou por meio da diminuição da biodisponibilidade destes elementos nos sistemas biológicos, pode contribuir para a aplicação desses microrganismos em programas de revegetação e fitorremediação de solos contaminados.⁶ Sabe-se que os efeitos das MAs no crescimento de plantas na presença de metais tóxicos são muito dependentes das espécies e dos isolados fúngicos, mas a razão para o comportamento diferenciado dos FMAs ainda não foi elucidado. Uma vez que os FMAs são biotróficos obrigatórios, a maioria dos estudos desenvolvidos para avaliar a influência destes microrganismos na retenção de metais pesados é realizada em condições que utilizam solo e planta, os quais interferem no processo de retenção dos metais, dificultando a determinação do efeito real de proteção dos FMAs. Desta forma, a avaliação da retenção de metais pesados em micélios fúngicos limpos e separados da planta pode contribuir para o entendimento dos mecanismos envolvidos na proteção desta ao excesso de metais pesados. Neste trabalho, avaliou-se a capacidade e a velocidade de retenção de metais pesados em micélio de diferentes fungos micorrízicos arbusculares.

PARTE EXPERIMENTAL

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Microbiologia do Solo do Departamento de Ciência do Solo (DCS) e no Laboratório de Cultura de Tecidos do Departamento de Agricultura (DGA) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), onde se avaliou a capacidade de retenção dos metais pesados Cu, Zn, Cd e Pb, aplicados isoladamente ou em mistura em micélio de FMAs *in vitro*.

*e-mail: crfsoares@gmail.com

Micélios de *Glomus clarum* (acesso Embrapa nº CNPAB5) e *Glomus FDSI* (acesso Embrapa nº CNPAB12) foram obtidos por meio de cultura monoxênica, utilizando-se o cultivo de raízes transformadas por *Agrobacterium rizogenes*.^{15,16} O fungo *G. clarum* foi isolado em uma área na Flórida (EUA), enquanto o *G. FDSI* foi isolado por pesquisadores da Embrapa em uma área degradada com solo intensamente erodido no Brasil.¹⁷ Além destes fungos, avaliou-se a capacidade de retenção dos metais em *Gigaspora gigantea*; devido à dificuldade de crescimento micelial em cultura monoxênica, optou-se por realizar a inoculação desse isolado em plântulas de batata doce *in vitro*. Este fungo foi isolado de área com pastagem em Lavras, MG, e cultivado em vasos de *Brachiaria decumbens* na coleção de FMAs do DCS-UFLA

As raízes transformadas contendo micélio de *G. clarum* e *G. FDSI* foram gentilmente cedidas pelo pesquisador Dr. Francisco Adriano de Souza, da Embrapa Agrobiologia. O meio utilizado para repicar as raízes transformadas foi o meio mínimo (MM), segundo metodologia descrita por Becárd e Fortin,¹⁸ solidificado com 0,3% de Fitigel. As raízes transformadas foram abertas em placas de petri e cortadas com bisturi, em pequenos pedaços de aproximadamente 1 cm² contendo meio e raízes colonizadas e transferidos para as placas contendo MM, vedadas com plástico filme e colocadas em BOD com temperatura constante de 25 °C, na ausência de luz, onde permaneceram nestas condições por um período de 3 meses.

Para a obtenção de micélio de *G. gigantea* realizou-se a inoculação de esporos em plântulas de batata doce *in vitro*. Para isto, promoveu-se o crescimento de plântulas de batata doce utilizando-se segmento nodal de 1,0 cm sem folhas, transferido para tubos de ensaio contendo aproximadamente 10 mL de meio MS,¹⁹ com pH ajustado para 5,7 ± 0,1, em câmara aclimatizada com temperatura 25 ± 1 °C e fotoperíodo de 16 h, sob intensidade luminosa de 1.500 lux. Após 30 dias de crescimento, as plântulas foram utilizadas para a montagem das placas contendo meio MS diluído 10 vezes e solidificado com 0,6% de Fitigel. Para a inoculação, realizou-se a extração de esporos de vasos de cultivo de *Brachiaria decumbens* da coleção de FMAs do DCS-UFLA, seguindo metodologia descrita por Gerdemann e Nicolson.²⁰ Os esporos foram selecionados e desinfestados conforme metodologia adaptada de Colozzi-Filho,²¹ sendo inoculados, em média, 20 esporos de *G. gigantea* por planta. As placas foram vedadas, sendo as raízes cobertas com papel alumínio, de modo a evitar a exposição à luz e facilitar o crescimento micelial, armazenadas em câmara de crescimento aclimatizada, conforme descrito anteriormente, onde permaneceram por um período de 40 dias.

Após o período de crescimento dos FMAs estudados, foi realizada a dissolução dos meios MS e MM modificados em tampão de citrato de sódio 0,01 mol L⁻¹,²² de modo a facilitar a separação do micélio tanto das raízes transformadas como das plântulas de batata. O micélio foi retirado das placas de petri com auxílio de pinça de ponta fina, em microscópio estereoscópio. Para a realização dos ensaios de retenção, foram retirados aproximadamente 0,030 g de micélio fúngico, os quais foram lavados em água destilada e acondicionados em cápsula de náilon de 700 mesh.

Os ensaios de retenção de metais foram conduzidos em copos plásticos, conforme descrito por González-Chavez e colaboradores,²³ aos quais se adicionaram 20 mL de solução contendo 15 µmol L⁻¹ de Cu, Cd, Zn e Pb, aplicados isoladamente ou em mistura, sendo todos os metais aplicados na forma de sulfato. Estes ensaios foram realizados com 3 repetições, sendo o micélio fúngico exposto aos metais por períodos de 1, 3, 5, 15, 30, 45 e 120 min, e a solução renovada ao final de cada período. Para se obter o volume exato de solução utilizada no ensaio, foi realizada uma pesagem com os copos plásticos vazios, após a adição da solução e ao final do ensaio de retenção, procedimentos necessários para detectar variações no volume da solução durante o ensaio. Estes ensaios foram realizados a baixas temperaturas (4 °C) em

agitador orbital a 120 rpm. Após o período de exposição do micélio aos metais, realizou-se a leitura das soluções em espectrofotômetro de absorção atômica para a quantificação dos metais retidos no micélio. Amostras de micélio foram preparadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica (LME) do Departamento de Fitopatologia da UFLA para a caracterização da parede e espessura das hifas por meio de imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura.^{24,25}

Os resultados foram submetidos a teste de significância das regressões ($P < 0,05$) por meio do programa estatístico Sisvar,²⁶ sendo os intervalos de confiança calculados pelo programa SAS.²⁷ A partir dos modelos de regressão obtidos para a taxa de retenção dos metais (em µg de metal g⁻¹ micélio) foi possível calcular a velocidade de retenção destes dividindo-se o coeficiente angular da regressão pelo respectivo tempo de exposição, sendo a velocidade expressa em µg de metal g⁻¹ micélio min⁻¹.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A taxa de retenção de Cu, Zn, Cd e Pb em micélio fúngico, quando avaliados isoladamente, foi muito diferenciada entre os isolados de FMAs e os metais estudados. Independentemente dos isolados fúngicos e metais, observa-se que a taxa de retenção ajustou-se ao modelo linear neperiano. A quantidade de Cu retida no micélio dos FMAs testados em função do tempo de contato com a solução contendo este elemento é apresentada na Figura 1. Dentre os metais pesados testados, observa-se que o Cu apresentou maior retenção pelo micélio, destacando-se *G. clarum* o qual atingiu valores de 3.259 µg de Cu g⁻¹ micélio.

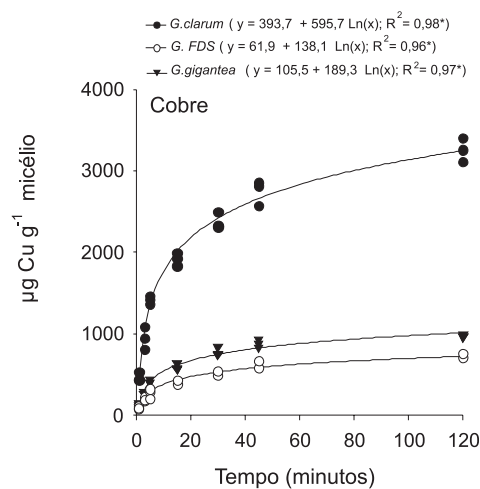


Figura 1. Taxa de retenção de Cu em micélio de *Glomus clarum*, *Glomus FDSI* e *Gigaspora gigantea* *in vitro* (µg g⁻¹ micélio fúngico)

A taxa de retenção para os outros metais (Zn, Cd, Pb) também foi diferenciada entre os FMAs. Para Zn, a capacidade de retenção foi menor que Cu, mas foi maior do que Cd e Pb (Figura 2). O micélio de *G. gigantea* apresentou valores médios de retenção de 729 µg de Zn g⁻¹ micélio, enquanto para *G. clarum* e *G. FDSI* a retenção média foi de 392 e 328 µg de Zn g⁻¹ micélio, respectivamente.

Para Cd e Pb, foram encontrados menores valores de retenção do que os observados para Cu e Zn (Figuras 3 e 4). A capacidade máxima de retenção de Cd para *G. clarum* e *G. FDSI* foi de 69 e 56 µg g⁻¹ micélio, respectivamente. A capacidade máxima de retenção de Pb foi a menor entre todos os metais testados, tendo o isolado *G. clarum* apresentado a maior retenção deste metal, atingindo 39 µg de Pb g⁻¹ micélio.

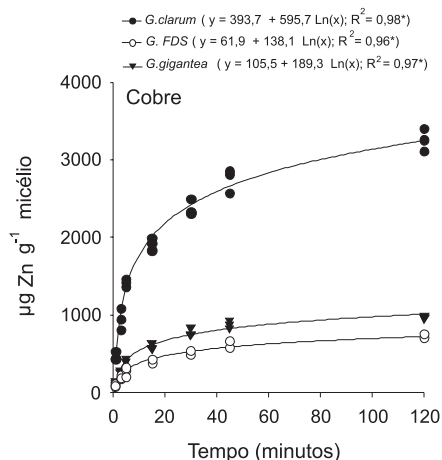


Figura 2. Taxa de retenção de Zn em micélio de *Glomus clarum*, *Glomus FDS1* e *Gigaspora gigantea* in vitro ($\mu\text{g g}^{-1}$ micélio fúngico)

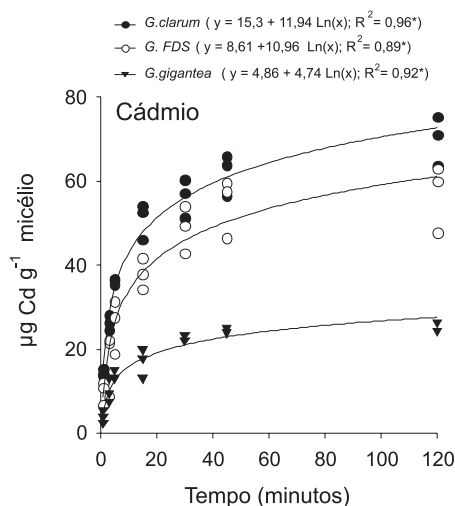


Figura 3. Taxa de retenção de Cd em micélio de *Glomus clarum*, *Glomus FDS1* e *Gigaspora gigantea* in vitro ($\mu\text{g g}^{-1}$ micélio fúngico)

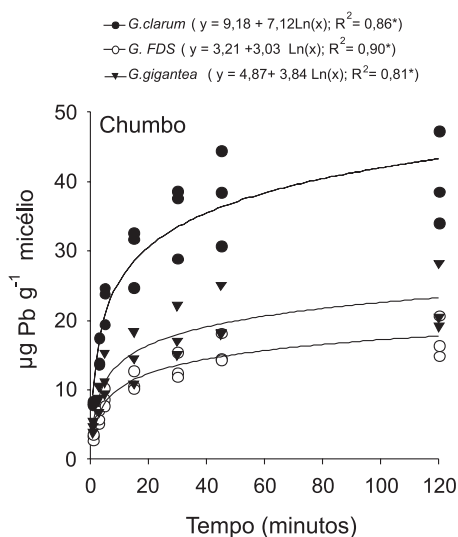


Figura 4. Taxa de retenção de Pb em micélio de *Glomus clarum*, *Glomus FDS1* e *Gigaspora gigantea* in vitro ($\mu\text{g g}^{-1}$ micélio fúngico)

Os valores de retenção de Cu obtidos corroboram com os resultados de estudos utilizando alguns fungos do solo, como, por exemplo, *Aspergillus niger* ($2.000\text{-}10.000 \mu\text{g Cu g}^{-1}$) e *Mucor rouxi* ($1.000\text{-}3.000 \mu\text{g Cu g}^{-1}$),^{14,28} *Rhizopus arrhizus* ($1.500 \mu\text{g Cu g}^{-1}$) e *Trichoderma viride* ($2.200 \mu\text{g Cu g}^{-1}$).²⁹

A retenção máxima de Zn pelos FMAs variou de 328 a 729 $\mu\text{g Zn g}^{-1}$ micélio, sendo estes valores muito inferiores aos encontrados para alguns microrganismos do solo, tais como, *Streptomyces noursei* $1.600 \mu\text{g Zn g}^{-1}$ ³⁰ e *Rhizopus arrhizus* $14.000\text{-}20.000 \mu\text{g Zn g}^{-1}$.^{13,31} Chen e colaboradores³² demonstraram que os micélios de *Glomus mosseae* e *Glomus versiforme* apresentaram retenção de 1.200 e 600 $\mu\text{g g}^{-1}$ de Zn, respectivamente.

Quando são considerados os valores médios de capacidade de retenção dos metais (Figura 1S, material suplementar), verifica-se que o Cu apresenta a maior capacidade máxima de retenção entre os metais estudados, retendo, em média, 1.769 μg de Cu g^{-1} micélio, seguido de Zn, que reteve 483 μg de Zn g^{-1} micélio. Já Cd e Pb tiveram valores médios de retenção muito baixos: 50 e 26 $\mu\text{g g}^{-1}$ micélio, respectivamente. Considerando que a quantidade de micélio dos FMAs é responsável por mais de 50% do comprimento total de hifas fúngicas do solo,³³ representando de 20 a 30% da biomassa microbiana total do solo,³⁴ e que apresenta rápido crescimento quando associado à planta hospedeira,³⁵ pode-se assumir que o micélio dos FMAs tem grande potencial para reter o excesso de metais do solo. Neste caso, o micélio fúngico exerceria uma função na tolerância das plantas hospedeiras aos metais pesados, promovendo uma barreira física à transferência desses elementos das raízes para a parte aérea. Assim, a tolerância de plantas micorrizadas a metais pesados pode estar associada a fungos de crescimento rápido e que produzem grande massa de micélio, com constante renovação, visto que isto promoveria o acúmulo desses elementos no fungo, diminuindo a transferência dos metais para a planta.³⁶

Na Figura 5 é apresentada a velocidade média de retenção dos FMAs testados para os diferentes metais pesados em solução. Verifica-se que a velocidade de retenção é bastante rápida nos primeiros 20 min de exposição, decrescendo com o tempo de contato entre o material fúngico e os metais. Dentre os metais testados, o Cu apresentou a maior velocidade máxima de retenção, atingindo valores médios da ordem de 307,7 μg de Cu g^{-1} micélio min^{-1} . Já para Zn, observaram-se valores médios de 90,1 μg de Zn g^{-1} micélio min^{-1} . As velocidades máximas de retenção de Cd e Pb foram as menores entre os metais estudados, os quais obtiveram, em média, 9,2 e 4,7 μg de metal g^{-1} micélio min^{-1} , respectivamente. A partir destes valores, observa-se que a velocidade de retenção de Cu pelo micélio dos FMAs testados é da ordem de 3, 30 e 60 vezes superior à velocidade estimada para Zn, Cd e Pb, respectivamente. Portanto, é evidente a rápida retenção dos metais no micélio fúngico e independentemente dos isolados testados, a velocidade de retenção decresce na seguinte ordem: Cu > Zn >> Cd > Pb.

Assim como no presente estudo, González-Chavez e colaboradores²³ observaram também que as maiores velocidades de retenção de Cu ocorreram nos primeiros 20 min de exposição. Além disso, estes autores verificaram valores de retenção de 13.800, 13.200 e 2.800 μg de Cu g^{-1} micélio para *Glomus claroideum*, *G. mosseae* e *G. caledonium*, respectivamente, coletados em solos contaminados. Considerando que a capacidade máxima de retenção de Cu para *G. clarum* no presente estudo foi de 3.259 μg de Cu g^{-1} micélio, verifica-se que há uma variabilidade na capacidade de retenção de Cu dentro do gênero *Glomus* e que isolados provenientes de áreas não contaminadas, como é o caso do *G. clarum* deste estudo, podem apresentar uma capacidade intrínseca de elevada retenção de metais, mesmo quando não apresentam histórico de exposição aos poluentes. Essa maior capacidade dos fungos do gênero *Glomus* em reter Cu, comparada a outros FMAs, pode ser devida a diferenças na composição química da parede celular,^{14,37} a qual possui quitina e polissacarídeos β -glucan (1-3), que são os principais componentes da

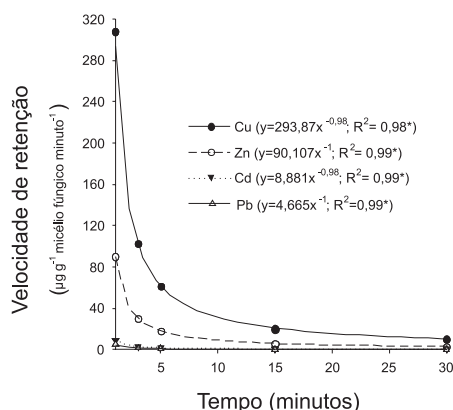


Figura 5. Velocidade de retenção de Cu, Zn, Cd e Pb aplicados isoladamente em solução (média dos três isolados em $\mu\text{g g}^{-1}$ micélio fúngico min^{-1})

parede celular desta espécie.³⁸ Tem sido especulado também que outros componentes da parede celular dos fungos, tais como grupos amino, hidroxílicos, carboxílicos, dentre outros, podem representar sítios de ligação para os íons Cu^{2+} em fungos.^{13,14} Além disso, os metais podem interagir com as proteínas, favorecendo a retenção desses elementos na parte externa da parede celular.^{39,40} Dentre estas substâncias, pode-se destacar a glomalina, que é uma glicoproteína que possui elevada afinidade por Cu, além de formar complexos bastante estáveis com este metal.⁴¹ Contudo, neste trabalho não foram avaliados os componentes da parede celular dos FMAs estudados, sendo necessário o desenvolvimento de novas pesquisas para elucidar os mecanismos que controlam a retenção diferenciada de metais nos FMAs.

A taxa de retenção de Cu, Zn, Cd e Pb pelos FMAs também foi avaliada quando estes elementos foram aplicados simultaneamente em solução. Neste estudo, foram testados apenas os isolados *G. clarum* e *G. gigantea* (Figuras 6 e 7), uma vez que não foi possível obter quantidade suficiente de micélio de *G. FDSI* para a condução do ensaio. Para *G. clarum*, verifica-se, novamente, a maior retenção de Cu no micélio fúngico, em relação aos demais metais. Entretanto, a retenção máxima de Cu neste ensaio foi de apenas $295 \mu\text{g g}^{-1}$ de micélio fúngico. Esta tendência também foi observada para o *G. gigantea*, cuja capacidade máxima de retenção de Cu foi de apenas $212 \mu\text{g g}^{-1}$. Para Zn, verificou-se que a capacidade máxima de retenção para *G. clarum* e *G. gigantea* foi de 113 e $210 \mu\text{g g}^{-1}$ micélio, respectivamente. Mesmo havendo uma redução nos valores de Zn quando esse elemento é aplicado simultaneamente com outros metais, verifica-se que *G. gigantea* apresentou maior capacidade de retenção de Zn que *G. clarum*. Para Cd e Pb, os valores obtidos foram muito baixos para ambos os isolados, confirmando a baixa capacidade de retenção desses elementos pelos FMAs. Estes resultados indicam que quando os metais são aplicados simultaneamente em solução há uma redução acentuada na retenção de Cu e Zn. Isto pode estar relacionado com a competição entre os sítios de ligação dos metais, diminuindo, por consequência, a capacidade de retenção no micélio. Vale ressaltar que a avaliação deste tipo é importante, pois os solos são geralmente contaminados por mais de um metal. Além disso, os resultados confirmam a maior afinidade do *G. clarum* pelo Cu e do *G. gigantea* pelo Zn demonstrado no ensaio em que estes elementos foram aplicados isoladamente em solução e isso justifica a importância da introdução de mais de uma espécie fúngica em solos multicontaminados.

Considerando que os diferentes FMAs apresentam características distintas quanto à espessura, morfologia e composição de parede celular, é provável que tais características se relacionem com a capacidade destes em reter metais pesados em seu micélio. É razoável considerar que a retenção de metais seja maior em micélio com menor espessura, como observado em membros da família Glomeraceae, os quais apresentam

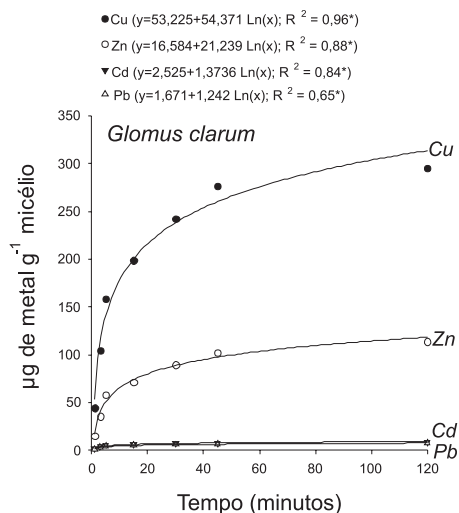


Figura 6. Taxa de retenção de Cu, Zn, Cd e Pb, aplicados simultaneamente em solução, em micélio de *Glomus clarum* in vitro ($\mu\text{g g}^{-1}$ micélio fúngico)

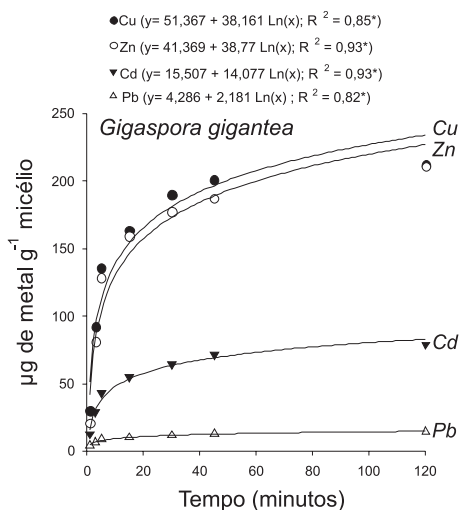


Figura 7. Taxa de retenção de Cu, Zn, Cd e Pb, aplicados simultaneamente em solução, em micélio de *Gigaspora gigantea* in vitro ($\mu\text{g g}^{-1}$ micélio fúngico)

hifas finas, com diâmetro variando entre $0,8$ - $4,5 \mu\text{m}$ e parede celular da hifa com espessura $\leq 1,2 \mu\text{m}$. Enquanto isso, espécies da família Gigasporaceae apresentam hifas mais espessas, com diâmetro que pode atingir $20 \mu\text{m}$ e espessura de parede das hifas multilaminadas variando de 4 a $7 \mu\text{m}$.¹² No presente estudo, análises de microscopia eletrônica de varredura (Figura 2S, material suplementar) revelaram detalhes e espessuras das hifas dos FMAs testados, destacando-se *G. clarum* que apresentou hifas mais finas (aproximadamente $4 \mu\text{m}$ de diâmetro) em comparação à *G. gigantea* cujo diâmetro foi de $13 \mu\text{m}$. As hifas mais finas de *G. clarum* conferem maior superfície específica de contato, facilitando o processo de retenção dos metais. A maior capacidade de retenção de metais neste fungo pode estar relacionada com esta característica, em contraste ao que é observado para *G. gigantea*. No entanto, a relação entre espessura de hifa e retenção de metais não pode ser atribuída ao *G. FDSI*, uma vez que este fungo também apresenta hifas finas, porém, com baixa capacidade de retenção dos metais. Apesar de *G. gigantea* apresentar hifas mais espessas, verifica-se que esta espécie apresenta maior capacidade de retenção de Zn dentre os fungos testados. Neste caso, a maior retenção verificada por este isolado pode estar associada à composição do micélio e não necessariamente com a espessura da hifa como havia sido preconizado anteriormente. De fato, Christie e Chen⁹ afirmam que a maior

capacidade de retenção de Zn pelos FMAs é determinada pela presença de proteínas ligantes nas estruturas dos FMAs contendo cisteínas, as quais têm a habilidade de complexar este elemento presente em solução. Desta forma, estudos adicionais são necessários para compreender a natureza do acúmulo, os componentes da parede celular dos fungos e os mecanismos envolvidos. Estas informações podem auxiliar no melhor entendimento da participação dos FMAs na tolerância de plantas e seu significado ecológico em solos poluídos.^{9,23}

CONCLUSÕES

A retenção de metais pesados no micélio dos fungos micorrízicos arbusculares é um processo rápido e mais diferenciado para metal do que para espécie fúngica, sendo a velocidade de retenção do Cu da ordem de 3, 30 e 60 vezes maior que a do Zn, Cd e Pb, respectivamente.

A capacidade de retenção também difere para os metais e espécies fúngicas, sendo esta decrescente na seguinte ordem para metais: Cu>Zn>>Cd>Pb. O micélio de *Glomus clarum* apresentou maior capacidade de retenção para Cu, Cd e Pb, enquanto que para Zn a maior retenção ocorreu em micélio de *Gigaspora gigantea*.

A aplicação simultânea de Cu, Zn, Cd e Pb em solução reduz a capacidade de retenção de Cu e Zn no micélio dos fungos micorrízicos arbusculares.

MATERIAL SUPLEMENTAR

As Figuras 1S e 2S, estão disponíveis em <http://quimicanova.sbq.org.br>, na forma de PDF, com acesso livre.

REFERÊNCIAS

- Volesky, B.; Holan, Z. R.; *Biotechnol. Prog.* **1995**, *11*, 235.
- Leyval, C.; Turnau, K.; Haselwandter, K.; *Mycorrhiza* **1997**, *7*, 139.
- Moreira, F. M. S.; Siqueira, J. O.; *Microbiologia e Bioquímica do Solo*, 5^a ed., UFLA: Lavras, 2006.
- Stürmer, S. L.; Siqueira, J. O. Em *Diversidade de Fungos Micorrízicos Arbusculares em Ecossistemas Brasileiros*; Moreira, F. M. S.; Siqueira, J. O.; Brussaard, L., eds.; UFLA: Lavras, 2008, cap. 16.
- Siqueira, J. O.; Soares, C. R. F. S.; Santos, J. G. D.; Schneider, J.; Carneiro, M. A. C.; *Tópicos em Ciência do Solo* **2007**, *5*, 219.
- Klauber-Filho, O.; Siqueira, J. O.; Moreira, F. M. S.; Soares, C. R. F. S.; Silva, S.; *Tópicos em Ciência do Solo* **2005**, *4*, 85.
- Soares, C. R. F. S.; Siqueira, J. O.; *Biol. Fert. Soils* **2008**, *44*, 833.
- Silva, S.; Soares, C. R. F. S.; Siqueira, J. O.; *Pesq. Agropec. Bras.* **2006**, *41*, 1749.
- Christie, P.; Li, X.; Chen, B.; *Plant Soil* **2004**, *261*, 209.
- Kaldorf, M.; Kuhn, A. J.; Schröder, W. R.; Hildebrandt, U.; Bothe, H.; *J. Plant Physiol.* **1999**, *154*, 718.
- Zhu, Y. G.; Christie, P.; Laidlaw, A. S.; *Chemosphere* **2001**, *42*, 193.
- Beck, A.; Haug, I.; Oberwinkler, F.; *Mycorrhiza* **2007**, *30*, 607.
- Zhou, J. L.; *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **1999**, *51*, 686.
- Kapoor, A.; Virarghavan, T.; *Bioresour. Technol.* **1995**, *53*, 195.
- Mugnier, J.; Mosse, B.; *Phytopathology* **1987**, *77*, 1045.
- Declerck, S.; Strullu, D. G.; Fortin, J. A.; *In vitro culture of mycorrhizas*, Springer – Velarg Berlin Heidelberg: Germany, 2005.
- De Souza, F. A.; Carvalho, F.; Carrenho, R.; *Programa e Resumos do V Congresso Brasileiro de Micologia*, Recife, Brasil, 2007.
- Becárd, G.; Fortin, J. A.; *New Phytologist* **1988**, *108*, 211.
- Murashige, T.; Skoog, F. A.; *Physiologia Plantarum* **1962**, *15*, 473.
- Gerdemann, J. W.; Nicolson, T. H.; *Trans. Br. Mycol. Soc.* **1963**, *46*, 235.
- Colozzi-Filho, A.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Lavras, Brasil, 1998.
- Cranenbrouck, S.; Voets, L.; Bivort, C.; Renard, L.; Strullu, D. G.; Declerck, S. Em ref. 16; Strullu, D. G.; Fortin, J. A., eds.; Springer Berlin Heidelberg: New York, 2005. cap.18.
- González Chavez, M. C.; D'Haen, J.; Vangronsveld, J.; Dodd, J. C. C.; *Plant Soil* **2004**, *240*, 287.
- Bossola, J. J.; Russel, L. D.; *Electron Microscopy*, 2nd ed., Jones and Bartlett: Boston, 1998.
- Alves, E.; *Introdução à Microscopia Eletrônica de Varredura*, UFLA: Lavras, 2007.
- Ferreira, D. F.; *Programas e Resumos da 45ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria*, São Carlos, Brasil, 2000.
- SAS Institute Inc.; *SAS/STAT: users's guide*, 8th release, Cary: SAS Institute, 1988.
- Muellen, M. D.; Wolf, D. C.; Beveridge, T. J.; Bailey, G. W.; *Soil Biol. Biochem.* **1992**, *24*, 129.
- Morley, G. F.; Gadd, G. M.; *Mycological Research* **1995**, *99*, 1429.
- Mattuschka, B.; Straube, G.; *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **1993**, *58*, 57.
- Tobin, J. M.; Cooper, D. G.; Neufeld, R. J.; *Appl. Environ. Microbiol.* **1984**, *47*, 821.
- Chen, B.; Shen, H.; Li, Z.; Feng, G.; Christie, P.; *Plant Soil* **2004**, *261*, 219.
- Rillig, M. C.; Wright, S. F.; Eviner, V. T.; *Plant Soil* **2002**, *233*, 325.
- Miller, R. M.; Kling, M.; *Plant Soil* **2000**, *226*, 295.
- Jakobsen, I.; Abbott, L. K.; Robson, A. D.; *New Phytologist* **1992**, *120*, 371.
- Gaur, A.; Adholeya, A.; *Curr. Sci.* **2004**, *4*, 528.
- Gadd, G. M.; *New Phytologist* **1993**, *124*, 25.
- Smith, S. E.; Read, D. J.; *Mycorrhizal Symbiosis*, 2nd ed., Academic Press: London, 1997.
- Ross, S. M.; *Toxic Metals in Soil-plant Systems*, Wiley: Chichester, 1994.
- Gardea-Torresdey, J. L.; Cano-Aguilera, I.; Webb, R.; Gutierrez-Corona, F.; *Environ. Toxicol. Chem.* **1997**, *16*, 435.
- González Chavez, M. C.; Carrilo Gonzalez, R.; Wright, S. F.; Nichols, K. A.; *Environ. Pollut.* **2004**, *130*, 317.