

**ETIENE SILVA COUTINHO**

**DIVERSIDADE E OCORRÊNCIA DE FUNGOS MICORRÍZICOS  
ARBUSCULARES EM CAMPOS RUPESTRES**

Belo Horizonte

2016

**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Instituto de Ciências Biológicas**

**Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre**

**DIVERSIDADE E OCORRÊNCIA DE FUNGOS MICORRÍZICOS  
ARBUSCULARES EM CAMPOS RUPESTRES**

Etiene Silva Coutinho

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de Doutora em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre.

Orientador: Prof. Dr. G. Wilson Fernandes

Belo Horizonte

2016

**Universidade Federal de Minas Gerais**  
**Instituto de Ciências Biológicas**  
**Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre**

**DIVERSIDADE E OCORRÊNCIA DE FUNGOS MICORRÍZICOS  
ARBUSCULARES EM CAMPOS RUPESTRES**

Etienne Silva Coutinho

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de Doutora em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre.

Orientador: Prof. Dr. G. Wilson Fernandes

**Aprovada em 29 de julho de 2016.**

**Prof. Dr. Alberto Lopez Teixeira (UFMG)**

**Prof. Dr. Ary Corrêa Junior (UFMG)**

**Profa. Dra. Flávia Peres Nunes (UNA)**

**Prof. Dr. Luiz Henrique Rosa (UFMG)**

**Prof. Dr. Newton P. Ulhôa Barbosa (UFMG)**

**(Representante do Orientador)**

Belo Horizonte

2016

## TESE DE DOUTORADO

# DIVERSIDADE E OCORRÊNCIA DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EM CAMPOS RUPESTRES

Etiene Silva Coutinho

Apoio Institucional:



reserva vellozia

Apoio Financeiro:



“Na procura de conhecimentos, o primeiro passo é o silêncio, o segundo ouvir, o terceiro lembrar, o quarto praticar e o quinto ensinar aos outros”

Frases judaicas

## **Agradecimentos**

À Deus, por me iluminar nesse caminho.

Aos meus pais, Deusdeth e Naty, pelo apoio constante e incentivo às minhas realizações.

Ao meu irmão Wesley, Ana, Manu e Joaquim pelo apoio e carinho.

Ao Gilson, pelo companheirismo, compreensão e pelos momentos felizes.

Ao Professor Geraldo Wilson Fernandes pela orientação e incentivo.

Ao professor Ricardo Berbara pelas sugestões.

À banca examinadora.

Aos colegas do LEEB (UFMG) e LEPV (Unimontes) pela ajuda na realização das coletas.

A Thaíse, Irene, Leandra, Giovana, Geanne, Yumi e Marina pela convivência, amizade e apoio na realização do trabalho.

À FAPEMIG pela concessão da bolsa de estudos.

Ao CNPq, CAPES, Rede ComCerrado, pelo suporte financeiro nas diversas etapas do trabalho.

À Reserva Vellozia e ao ICMBIO pelo apoio e suporte durante a realização das coletas.

Ao Instituto Estadual de Florestas – IEF e Gerência de Projetos e Pesquisas-GPROP por permitir acesso às áreas de estudo e apoio durante a realização das coletas.

Ao Programa de Pós Graduação em Ecologia Conservação e Manejo da Vida Silvestre/UFMG, por todo o auxílio prestado.

À todos que contribuíram para a finalização da mais essa etapa.

**Muito obrigada!!!**

SUMÁRIO.....	pág.
Lista de Figuras.....	8
Lista de Tabelas.....	10
Introdução.....	12
Referências Bibliográficas.....	14
CAPÍTULO I: Riqueza e abundância de micorrizas em áreas degradadas de campos rupestres.....	20
Resumo.....	21
Abstract.....	22
Introdução.....	23
Material e Métodos.....	25
Resultados.....	27
Discussão .....	30
Conclusão.....	33
Referências Bibliográficas.....	35
CAPÍTULO II: Ocorrência de micorrizas em mudas de espécies do campo rupestre utilizadas em recuperação de áreas degradadas.....	52
Resumo.....	53
Abstract.....	54
Introdução.....	55
Material e Métodos.....	56
Resultados.....	58
Discussão .....	60
Conclusão.....	64
Referências Bibliográficas.....	65
CAPÍTULO III: Fatores relacionados com a diversidade de fungos micorrízicos arbusculares em campos rupestres.....	80
Resumo.....	81
Abstract.....	82
Introdução.....	83

Material e Métodos.....	84
Resultados.....	86
Discussão .....	89
Conclusão.....	91
Referências Bibliográficas.....	92
CAPÍTULO IV: Valoração do serviço ecossistêmico de estocagem de fungos micorrízicos arbusculares em campos rupestres.....	103
Resumo.....	104
Abstract.....	105
Introdução.....	106
Material e Métodos.....	108
Resultados.....	112
Discussão .....	113
Conclusão.....	116
Referências Bibliográficas.....	117
Considerações Finais.....	129

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

1. Aspecto geral das áreas de campos rupestres. a) ecossistema de referência de campo rupestre, b) área degradada de campo rupestre, c, b) áreas degradadas de campos rupestres próximas a estrada asfaltada MG-010, e, f) estradas construídas e abandonadas nas áreas de campos rupestres na Serra do Cipó, Minas Gerais..... 47
2. a) densidade de glomerosporos em 50g de solo nas áreas degradadas e nativas b) riqueza de fungos micorrízicos arbusculares em áreas degradadas e nativas de campos rupestres na Serra do Cipó/Minas Gerais..... 48
3. Projeção dos escores da composição de espécies no escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS) para ecossistemas de referência e áreas degradadas nas estações seca e chuvosa nos campos rupestres da Serra do Cipó, Minas Gerais. (x - estação seca na área degradada, \* - estação chuvosa na área degradada, + - estação seca no ecossistema de referência, o - estação chuvosa no ecossistema de referência)..... 49
4. Dendrograma de similaridade de fungos micorrízicos arbusculares entre as estações das áreas nativas e degradadas de campos rupestres da Serra do Cipó, Minas Gerais. D-Seca (estação seca na área degradada), D-Chuvosa (estação chuvosa na área degradada), R-Seca (estação seca no ecossistema de referência), R-Chuvosa (estação chuvosa no ecossistema de referência)..... 50
5. Diagrama de ordenação (CCA) das espécies de fungos micorrízicos arbusculares em relação à variável potássio (K) do solo de áreas do ecossistema de referência e degradadas de campos rupestres na Serra do Cipó, Minas Gerais..... 51

### CAPÍTULO II

1. a) densidade média de glomerosporos em 50g de solo das nove espécies vegetais de campos rupestres utilizadas na restauração de áreas degradadas; b) riqueza de fungos micorrízicos arbusculares das nove espécies vegetais de campos rupestres utilizadas na restauração de áreas degradadas..... 76
2. Projeção dos escores da composição de espécies no escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS) das nove espécies vegetais de campos

- rupestres: *Baccharis platypoda* (BP), *Collaea cipoensis* (CC), *Dalbergia miscolobium* (DM), *Dasyphyllum reticulatum* (DR), *Eremanthus erythropappus* (EE), *Guazuma ulmifolia* (GU), *Handroanthus ochraceus* (HO), *Mimosa* sp. (MS), *Tibouchina heteromalla* (TH), utilizadas em restauração de áreas degradadas..... 77
3. Dendrograma de similaridade de fungos micorrízicos arbusculares entre as espécies vegetais de campos rupestres utilizadas na restauração de áreas degradadas..... 78
4. Diagrama de ordenação (CCA) das espécies de fungos micorrízicos arbusculares em relação às variáveis Altura e Diâmetro à altura do solo (DAS) das espécies vegetais de campos rupestres utilizadas na restauração de áreas degradadas..... 79

### CAPÍTULO III

1. Diagrama de ordenação (ACC) das espécies de FMA do complexo rupestre da Serra do Cipó, Minas Gerais, ao longo do gradiente altitudinal em relação às variáveis do solo (V= saturação de base; AF= areia fina) e altitude..... 100
2. Diagrama de ordenação (ACC) das espécies de FMA em relação a duas espécies vegetais *Neea theifera* (Neea Thif) e *Byrsonima intermédia* (Byrsinte) ao longo do gradiente altitudinal do complexo rupestre da Serra do Cipó, Minas Gerais..... 101
3. Dendrograma de similaridade de fungos micorrízicos arbusculares entre os habitats de afloramento rochoso (AR), campo rupestre (CR) e cerrado (CE) no complexo rupestre da Serra do Cipó, Minas Gerais, empregando o índice de similaridade Raup-Crick..... 102

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO I

1. Comparação dos valores médios das propriedades do solo de 78 amostras de solo entre áreas degradadas e ecossistema de referência de campos rupestres da Serra do Cipó, Minas Gerais. Areia fina (AF), Areia grossa (AG), Argila (Arg), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Fósforo (P), Magnésio (Mg), Manganês (Mg), Matéria orgânica (MO), Nitrogênio (N), Potássio (K), Silte (Silt), Zinco (Zn). Propriedades do solo na mesma coluna com a mesma letra não foram significativos..... 43
2. Lista de espécies de fungos micorrízicos em áreas ecossistema de referência (ER) e degradadas (AD) de campos ruspestres, Serra do ipó, Minas Gerais, nas estações chuvosa (C) e seca (S)..... 44

### CAPÍTULO II

1. Comparação das médias de densidade de glomerosporos e riqueza de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) avaliadas em rizosfera, e das médias de altura e diâmetro à altura do solo (DAS) das espécies vegetais utilizadas na restauração de campos rupestres. Valores em uma mesma coluna, seguidos por letras minúsculas idênticas não foram significativos ( $P < 0,05$ )..... 71
2. Espécies de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) ocorrendo em nove espécies vegetais: *Baccharis platypoda* (BP), *Collaea cipoensis* (CC), *Dalbergia miscolobium* (DM), *Dasyphyllum reticulatum* (DR), *Eremanthus erythropappus* (EE), *Guazuma ulmifolia* (GU), *Handroanthus ochraceus* (HO), *Mimosa* sp. (MS), *Tibouchina heteromalla* (TH), utilizadas em restauração de campos rupestres..... 72

### CAPÍTULO III

1. Correlação das propriedades do solo ao longo do gradiente de altitude do complexo rupestre da Serra do Cipó, Minas Gerais. pH em água (pH), teores de potássio (K), fósforo (P-Mehlich), fósforo remanescente (P-rem), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), hidrogênio + alumínio (H+Al), soma de bases (SB), saturação por bases (V), capacidade de troca catiônica efetiva (t),

- saturação por alumínio (m), capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (T), matéria orgânica (MO), e proporções de areia grossa (2 a 0,2 mm), areia fina (0,2 a 0,05 mm), silte (0,05 a 0,02mm) e argila (< 0,02mm)..... 97
2. Espécies de fungos micorrízicos arbusculares em habitats de afloramento rochoso (AR), campo rupestre (CR) e cerrado (CE) do complexo rupestre na Serra do Cipó, Minas Gerais. (\* espécies indicadoras)..... 98

#### CAPÍTULO IV

1. Tamanho da área (Km<sup>2</sup>) de campos rupestres em cada faixa altitudinal ao longo do gradiente altitudinal na porção sul da Cadeia do Espinhaço, Minas Gerais..... 123
2. Custos anuais de cada fase relativos à estocagem da coleção de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) em solos de campos rupestres. Valor parcial indica a soma dos custos de cada fase..... 124
3. Valor relativo ao custo de estocagem da coleção de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) em campos rupestres por altitude e ao longo do gradiente altitudinal da porção sul da Cadeia do Espinhaço. O custo total indica o valor de cada faixa altitudinal da porção sul da Cadeia do Espinhaço..... 125
4. Valor comercial (\$) de inóculos de FMA comparado com FMA nativos de campos rupestres..... 126

## INTRODUÇÃO

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA), pertencentes ao filo Glomeromycota, formam um grupo diverso, tanto em termos de número de espécies como em função. Estes fungos são biotróficos obrigatórios e formam simbiose mutualística com espécies da maioria das famílias de plantas (Trappe, 1987; Gianinazzi & Gianinazzi-Pearson, 1994). Nessa simbiose, a planta fornece ao fungo energia para crescimento e reprodução e o fungo provê a planta e o solo com amplos serviços (Smith and Read, 1997; Gupta et al., 2000; Souza et al., 2007), incluindo a captação de nutrientes, principalmente o fósforo, permitindo que as plantas tenham melhor adaptação ao ecossistema.

Estes micro-organismos do solo se destacam pelos múltiplos serviços ambientais que desempenham, por exemplo, estruturação do solo; nutrição das plantas; ciclo de nutrientes; controle de patógenos (Lisboa et al., 2014); produção agroflorestal; recuperação de áreas degradadas e restauração ambiental (Mehrota, 2005). A redução da população de FMA irá resultar em um efeito negativo na prestação de serviços (Gianinazzi et al., 2010). Dessa forma, a quantificação desse grupo importante dá indicação de como os processos estão ocorrendo (Daily, 1997; Melloni et al., 2003; Correia et al., 2004; Dominati et al., 2010) e pode contribuir para a produtividade e sustentabilidade dos ecossistemas (Gianinazzi et al., 2010).

A ocorrência de FMA no Brasil foi reportada em ecossistemas nativos (Bononi & Trofem, 1983; Carrenho et al., 2001; Aidar et al., 2004; Gomide et al., 2014; Silva et al., 2014a; Coutinho et al., 2015). O mesmo se verifica em relação à ocorrência de FMA em plantios (Trufem and Bononi, 1985; Colozzi Filho and Cardoso, 2000; Siqueira et al. 2002; Costa et al., 2005; Bartiz et al., 2008; Lima et al., 2013; Konrad et al., 2014), em áreas revegetadas (Carrenho et al., 2001; Caproni et al., 2003; Cardozo Junior et al., 2005; Moreira et al., 2007; Souza et al., 2011); e em áreas degradadas (Caproni et al., 2005; Siqueira et al., 2007; Carneiro et al., 2012; Mergulhão et al., 2012; Pereira et al., 2014; Silva et al., 2014b). Souza et al. (2010) afirmam que há uma desproporção quanto aos ecossistemas estudados, sendo que os ecossistemas agrícolas são mais estudados, seguidos por estudos em cafeeiro, dunas e áreas degradadas.

A maioria dos estudos sobre FMA visa avaliar o efeito e a melhoria causada pela associação micorrízica no desenvolvimento da planta, buscando a sua utilização

prática para a produção de mudas, ou seja, explorando o aspecto biotecnológico dos FMA, principalmente na área agrícola, para produção de alimentos em massa. Com isso, estudos sobre a ocorrência e diversidade de FMA nos diferentes ecossistemas naturais são necessários. Estes estudos estão aumentando, uma vez que estes fungos exercem inúmeros benefícios, tanto direta, quanto indiretamente relacionados com a planta hospedeira (Sturmer & Siqueira, 2013). Além da importância de se conhecer a diversidade destes fungos nos mais variados ecossistemas, há uma busca por fatores bióticos e abióticos que estejam relacionados com a ocorrência e a diversidade de FMA (Carrenho et al., 2010).

Podemos destacar como fatores mais avaliados quanto a sua influência na ocorrência e diversidade de FMA, as variáveis edáficas, tais como os atributos químicos e físicos, como também, aspectos ambientais, como a diversidade de plantas, gradiente altitudinal e sazonalidade (Berbara et al., 2006; Lugo et al., 2008; Coutinho et al., 2015). No entanto, Stürmer & Siqueira (2008) afirmam que há dificuldade em indicar a relação entre as variáveis ambientais e a diversidade e ocorrência dos FMA nos ecossistemas. No entanto, os estudos realizados em ecossistemas sob condições estressantes do solo, revelam que os fatores que influenciam a diversidade e ocorrência dos FMA variam, mas é clara a relação entre o mosaico de habitats e suas características intrínsecas, tais como atributos edáficos, e de vegetação e a ocorrência e a diversidade de FMA (Carvalho et al. 2012, Coutinho et al. 2015).

Há poucos estudos em ecossistemas naturais, principalmente em solos com pouca disponibilidade de nutrientes como os campos rupestres. Em ecossistemas cujas condições ambientais são extremas, a ocorrência da associação simbiótica entre plantas e FMA representa uma importante estratégia para sobrevivência da vegetação nativa (Smith & Read, 1997). Na Serra do Cipó foi encontrada uma das maiores diversidade já registrada de FMA em ecossistemas naturais, 61 espécies, confirmando a hipótese de que os campos rupestres constituem uma das maiores fontes de diversidade de FMA. A diversidade de FMA nos campos rupestres da Serra do Cipó chega a 27% das espécies descritas no mundo e 50% no Brasil. Além disto, os campos rupestres também apresentam muitas espécies endêmicas como *Ambispora brasiliensis*, *Glomus pellucidum*, *Glomus* aff. *verruculosum* e *Pacispora dominikii*. Pelo menos 10 espécies encontradas pertencentes aos gêneros *Acaulospora*, *Glomus* e *Scutellospora*, são novas (Carvalho et al., 2012, Coutinho et al., 2015).

Sabe-se, ainda que, ao longo do gradiente altitudinal em campos rupestres, a diversidade de fungos micorrízicos arbusculares é maior em altitudes intermediárias (Coutinho et al., 2015), onde há maior heterogeneidade dos habitats. E em diferentes habitats de campos rupestres, a diversidade de FMA é maior no campo pedregoso (Carvalho et al., 2012). Assim, a diversidade de FMA em campos rupestres está relacionada com a heterogeneidade existente entre os habitats e com as características do solo, que variam em poucos metros e ao longo do gradiente altitudinal. No entanto, a diversidade de FMA em campos rupestres se restringe a poucos estudos (Pagano & Scotti, 2009; Carvalho et al., 2012; Coutinho et al., 2015), mesmo assim, apesar de poucos, estes estudos revelam a grande importância deste ecossistema como centro de diversidade de FMA, sendo considerado como hotspots deste importante simbionte radicular (Carvalho et al., 2012; Coutinho et al., 2015; Oki et al. 2016).

Este estudo revela a importância da diversidade de espécies de FMA dos campos rupestres em relação a outros ecossistemas do Brasil, chamando a atenção para a necessidade de que novas áreas dessa fitofisionomia sejam levadas em consideração nos estudos de taxonomia e diversidade, importantes para a compreensão dos padrões de diversidade de FMA. Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar a sua distribuição e ocorrência de FMA em ecossistemas de referência, em ambientes alterados, em rizosfera de espécies vegetais e ao longo do gradiente altitudinal, assim como determinar o valor monetário da estocagem de FMA em solos de campos rupestres.

## **Referências Bibliográficas**

- Aidar, M.P.M., Carrenho, R., Joly, C.A., 2004. Aspects of arbuscular mycorrhizal fungi in an Atlantic Forest chronosequence. *Biota Neotropica* 4:1–15.
- Bartz, M.L.C., Carrenho, R., Gomes-da-Costa, S.M., Colozzi Filho, A., Tormena, C.A., 2008. Comparação entre as técnicas de amostragem direta em campo e cultura armadilha para mensuração da diversidade de espécies de fungos micorrízicos arbusculares. *Hoehnea* 35, 159–164.
- Berbara, R.L.L., De Sousa, F.A., Fonseca, H.M.A., 2006. Fungos micorrízicos arbusculares: muito além da nutrição., In: Fernandes MS (Ed.). *Nutrição mineral de plantas*. SBCS, p. 53-88.

- Bononi, V.L.R., Trufem, S.F.B., 1983. Endomicorrizas vesículo-arbusculares do cerrado da Reserva Biológica de Moji-Guaçú, SP, Brasil. *Rickia* 10: 55-84.
- Caproni, A. L., Franco, A. A., Berbara, R. L. L., Granha, J. R. D. O., Marinho, N.F., 2005. Fungos micorrízicos arbusculares em estéril revegetado com *Acacia mangium*, após mineração de bauxita. *Rev. Arv.* 29: 373-381.
- Caproni, A.L., Franco, A.A., Berbara, R.L.L., Trufem, S.B., Granha, J.R.D.O., Monteiro, A.B., 2003. Ocorrência de fungos micorrízicos arbusculares em áreas revegetadas após mineração de bauxita em Porto Trombetas, Pará. *Pesq Agropec Bras* 38: 1409-1418.
- Cardozo Júnior, F.M., Carneiro, R.F.V., Goto, B.T., Bezerra, A.A.C., Araújo, A.S.F., Nunes, L.A.P.L., 2012. Arbuscular mycorrhizal fungi in degraded lands in Northeast Brazil. *Afr. J. Microbiol. Res.* 6, 7198-7205.
- Carneiro, R.F.V., Cardozo Júnior, F.M., Pereira, L.F., Araújo, A.S.F., Silva, G.A., 2012. Fungos micorrízicos arbusculares como indicadores da recuperação de áreas degradadas no Nordeste do Brasil. *Rev. Cienc. Agron.* 43, 648–657.
- Carrenho, R., Gomes-da-Costa, S.M., Balota, E.L., Colozzi-Filho, A., 2010. Fungos micorrízicos arbusculares em agrossistemas brasileiros. In: Siqueira, J.O., Souza, F. A., Cardoso, E.J.B.N., Tsai, S.M. (Ed.). *Micorrizas: 30 anos de pesquisa no Brasil*. Lavras: UFLA, pp. 215-249.
- Carrenho, R., Trufem, S.F.B., Bononi, V.R.L., 2001. Fungos micorrízicos arbusculares em rizosferas de três espécies de fitobiontes instaladas em área de mata ciliar revegetada. *Acta Bot Bras* 15: 115-124.
- Carvalho, F., Souza, F.A., Carrenho, R., Moreira, F.M.S., Jesus, E.C., Fernandes, G.W., 2012. The mosaic of habitats in the high-altitude Brazilian rupestrian fields is a hotspot for arbuscular mycorrhizal fungi. *Appl Soil Ecol* 52:9-19.
- Colozzi Filho, A., Cardoso, E.J.B.N., 2000. Detecção de fungos micorrízicos arbusculares em raízes de cafeeiro e de crotalária cultivada na entrelinha. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35: 2033-2042
- Correia, C.R.M.A., Reatto, A., Martins, E.S., Silva, E.M., Caldas, L.S., Fagg, J.F., 2004. *Micorriza Arbuscular: Um bioindicador da fertilidade dos solos e da distribuição de árvores no Bioma Cerrado*. Planaltina, Embrapa Cerrados, 169p.

- Costa, C.M.C., Cavalcante, U.M.T., Goto, B.T., Santos, V.F., Maia, L.C., 2005. Fungos micorrízicos arbusculares e adubação fosfatada em mudas de mangabeira. *Pesq. Agropec. Bras.*, 40: 225-232.
- Coutinho, E.S., Fernandes, G.W., Berbara, R.L.L., Maia, H.M., Goto, B.T., 2015. Variation of arbuscular mycorrhizal fungal communities along an altitudinal gradient in rupestrian grasslands in Brazil. *Mycorrhiza*. 25: 627-638.
- Daily, G.C., 1997. Nature's services. Societal dependence on natural ecosystems. Island Press, Washington, DC. 392 pp.
- Dominati, E., Patterson, M., Mackay, A., 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics* 69: 1858-1868.
- Feldmann, F., Miranda, J.C.C., Sousa, A.G.C., 1993. Mycorrhizal situation of native trees in the Brazilian tropical ecosystems Varzea Igapó, Terra Firme an Cerrados. In: Symposium "Tropische Nutzpflanzen", Hamburg. Biologie, ökologie, ökonomie: abstracts. Hamburg: Institut for Angewandte Botanik, Universität Hamburg, p 91.
- Giovannetti, M., Gianinazzi-Pearson, V., 1994. Biodiversity in arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycol Res* 98: 705-715.
- Gianinazzi, S., Gollote, A., Binet, M.N., Van Tuinen, T., Redecker, D., Wipf, D., 2010. Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza*, 20: 519-530.
- Gomide, P.H.O., Silva, M.L.N., Soares, C.R.F.S., Cardoso, E.L., Carvalho, F., Leal, P.L., Marques, R.M., Stürmer, S.L., 2014. Fungos micorrízicos arbusculares em fitofisionomias do Pantanal da Nhecolândia, Mato Grosso do Sul. *Rev Bras Ciênc Solo* 38: 1114-1127.
- Gupta, V., Satyanarayana, T., Garg, S., 2000. General aspects of mycorrhiza. In: Mukerji, K.G., Chamola, B.P., Singh, J. (eds) *Mycorrhizal Biology*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, pp 27-44.
- Konrad, M.L.F., Furlani, P.R., Cassiolato, A.M.R., Silveira, A.P.D., 2014. Resposta do cafeeiro à inoculação de fungos micorrízicos arbusculares, em latossolo vermelho de Cerrado. *Biosc J* 30: 933-941.
- Lima, L.S., Soares, A.C.F., Souza, C.S., 2013. Ocorrência e atividade de fungos micorrízicos arbusculares em plantios de eucalipto (*Eucalyptus* sp.) no litoral norte da Bahia, Brasil. *Rev Arv* 37: 245-255.

- Lisboa, F.J.G., Chaer, G., Fernandes, M.F., Berbara, R.L.L., Madari, B., 2014. The match between microbial community structure and soil properties is modulated by land use types and sample origin within an integrated agroecosystem. *Soil Biol Biochem* 78: 97-118.
- Lugo, M.A., Ferrero, M., Menoyo, E., Estévez, M.C., Siñeriz, F., Anton, A., 2008. Arbuscular mycorrhizal fungi and rhizospheric bacteria diversity along an altitudinal gradient in south American Puna Grassland. *Microb Ecol* 55: 705–713
- Mehrota, V.S., 2005. *Mycorrhizas: role and applications*. New Delhi. Allied Publishers.
- Melloni, R., Siqueira, J.O., Moreira, F.M.S., 2003. Fungos micorrízicos arbusculares em solos de área de mineração de bauxita em reabilitação. *Pesq. Agropec. Bras.* 38: 267-276.
- Miranda, J.C.C., 2008. *Cerrado: Micorriza arbuscular: ocorrência e manejo*. Embrapa Cerrados, Planaltina, 169p.
- Miranda, J.C.C., Vilela, L., Miranda, L.N., 2005. Dinâmica e contribuição da micorriza arbuscular em sistemas de produção com rotação de culturas. *Pesq. Agropec. Bras.* 40:1005-1014.
- Moreira, M., Baretta, D., Tsai, S.M., Gomes-da-Costa, S.M., Cardoso, E.J.B.N., 2007. Biodiversity and distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in *Araucaria angustifolia* Forest. *Sci Agric* 64:393-399.
- Pagano, M.C., Scotti, M.R., 2009. A survey of the arbuscular mycorrhiza occurrence in *Paepalanthus bromelioides* and *Bulbostylis* sp. in rupestrian fields, Brazil. *Micol Apl Int* 21:1-10.
- Pereira, C.M.R., Silva, D.K.A., Ferreira, A.C.A., Goto, B.T, Maia, L.C., 2014. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in Atlantic forest areas under different land uses. *Agric Ecosyst Environ* 185: 245-252.
- Schenck, N.C.L., Siqueira, J.O., Oliveira, E., 1989. Changes in the incidence of va mycorrhizal fungi with changes in ecosystems. *Dev Soil Scienc* 18:125–129.
- Silva, C.F., Araújo, J.L.S., Silva, E.M.R., Pereira, M.G., Schiavo, J.A., Freitas, M.S.M., Saggin-Junior, O.J., Martins, M.M., 2014. Comunidade de fungos micorrízicos arbusculares: diversidade, composição e glomalina em área revegetada com sesbânia. *Rev Bras C Solo*, 38(2), 423-431.

- Silva, I.R., Mello, C.M.A., Ferreira Neto, R.A., Silva, D.K.A., Melo, A.L., Oehl, F., Maia, L.C., 2014a. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi along an environmental gradient in the Brazilian semiarid. *Appl Soil Ecol*, 84: 66–175.
- Siqueira, J.O., Colozzi-Filho, A., Oliveira, E., Fernandes, A.B., Florence, M.L., 1987. Micorrizas vesicular-arbusculares em mudas de cafeeiro produzidas no sul do estado de Minas Gerais. *Pesq Agropecu Bras*, 22:31-38.
- Siqueira, J.O., Soares, C.R.F.S., Santos, J.G.D., Schneider, J., Carneiro, M.A.C., 2007. Micorrizas e a degradação do solo: caracterização, efeitos e ação recuperadora. *Tóp. Ci. Solo*. 5: 219-306.
- Siqueira, J.O., Lambais, M.R., Stürmer, S.L., 2002. Fungos micorrízicos arbusculares: Características, associação simbiótica e aplicação na agricultura. *Biotec Ci Desenv*, 25:12-21.
- Smith, S.E., Read, J.D., 1997. *Mycorrhizal symbiosis*. 2.ed. New York: Academic Press. 605 pp.
- Souza, F.A., Silva, I.C.L., Berbara, R.L.L., 2007. Fungos micorrízicos arbusculares: muito mais diversos do que se imaginava., In: Moreira, F.M.S., Siqueira, J.O., Brussard, L. (Eds). *Biodiversidade do Solo em Ecossistemas Brasileiros*. UFLA, Lavras, pp 483-536.
- Souza, F.A., Stürmer, S.L., Carrenho, R., Trufem, S.F.B., 2010. Classificação e taxonomia de fungos micorrízicos arbusculares e sua diversidade e ocorrência no Brasil. In: Siqueira, J.O., Souza, F.A., Cardoso, E.J.B.N., Tsai, S.M. (Eds.), *Micorrizas: 30 anos de Pesquisas no Brasil*. UFLA, Lavras, pp. 15–73.
- Souza, R.G., Silva, D.K.A., Mello, C.M.A., Goto, B.T., Silva, F.S.B., Sampaio, E.V.S.B., Maia, L.C., 2011. Arbuscular mycorrhizal fungi in revegetated mined dunes. *Land Degrad Dev* 24: 147-155.
- Stürmer, S.L., Siqueira, J.O., 2008. Diversidade de fungos micorrízicos arbusculares em ecossistemas brasileiros In: Moreira, F.M.S., Siqueira, J.O., Brussard, L. (eds) *Biodiversidade do solo em ecossistemas brasileiros*. pp 537-584.
- Stürmer, S. L., Siqueira, J.O., 2013. Fungos micorrízicos. In: Moreira, F.M.S. (Ed.). *O ecossistema solo*. Lavras: UFLA, pp. 291-310.
- Trappe, J.M., 1987. Phylogenetic and ecologic aspects of mycotrophy in the angiosperms from an evolutionary standpoint. In: Safir, G.F. (ed.), *Ecophysiology of VA mycorrhizal plants*. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 5-25.

Trufem, S.F.B., Otomo, H.S., Malatinszki, S.M.M., 1989. Fungos micorrízicos vesículo-arbusculares em rizosferas de plantas em dunas do Parque Estadual da Ilha do Cardoso, São Paulo, Brasil. *Acta Bot Bras* 3:141-152.

## CAPITULO I

### **Riqueza e abundância de micorrizas em áreas degradadas de campos rupestres**

Etiene Silva Coutinho<sup>1</sup>, Denise L. C. Mescolotti<sup>2</sup>, Joice Andrade Bonfim<sup>3</sup>, Ricardo Luís Louro Berbara<sup>4</sup>, G. Wilson Fernandes<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre, Departamento de Biologia Geral, C. Postal 486, 30161-970 Belo Horizonte, MG, Brasil

<sup>2,3</sup> Universidade de São Paulo/Departamento de Ciência do Solo, Laboratório de Microbiologia do Solo, 13418-900 Piracicaba, SP, Brasil

<sup>4</sup> Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, IA/Departamento de Solos, Laboratório de Biologia de Solos, 23890-000 Seropédica, RJ, Brasil

<sup>5</sup> Department of Biology, Organization Stanford University, Address Stanford, CA, 94395, USA

<sup>5</sup> Autor para correspondência: gw.fernandes@gmail.com

*Formatado segundo as normas da Applied Soil Ecology*

## **Resumo**

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) são importantes para recuperação de áreas degradadas, assim como na manutenção da biodiversidade de plantas através do conhecimento da diversidade destes micro-organismos em áreas degradadas e nativas, sendo essencial para os planos de manejo do ecossistema e indicadores da qualidade do mesmo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a diversidade de FMA em áreas de ecossistema de referência e degradadas em campos rupestres nas estações seca e chuvosa, e relacioná-la com as propriedades do solo. Amostras de solo foram coletadas em 13 parcelas de três áreas do ecossistema de referência e degradadas de campos rupestres. Foram calculadas a densidade, a riqueza e a composição de FMA, assim como as propriedades do solo em cada amostra. Dos macro e micronutrientes do solo, somente potássio (K) e magnésio (Mg) variaram significativamente entre as áreas ( $p < 0,05$ ). Nos ecossistemas de referência, a densidade e a riqueza de FMA foi significativamente maior que nas áreas degradadas. Houve diferença significativa da densidade e riqueza de FMA entre as áreas do ecossistema de referência e degradadas ( $p < 0,05$ ). Foram encontradas 44 espécies de FMA. Mais espécies de FMA foram registradas nas áreas do ecossistema de referência em comparação com a área impactada. No entanto, não houve diferença da densidade e da riqueza de FMA entre as estações seca e chuvosa ( $p > 0,05$ ). Houve diferença na composição de espécies entre as áreas ( $p < 0,05$ ). Houve efeito das propriedades do solo sobre a variação na composição de espécies de FMA pela análise de correspondência canônica. Muitas das espécies encontradas poderão ser usadas em programas de recuperação de áreas degradadas uma vez que já estão adaptadas as condições estressantes do ambiente.

**Palavras-chave:** campos rupestres, ecossistema de referência, degradação, Glomeromycetes

## **Abstract**

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) are important for the restoration of degraded areas and maintenance biodiversity of plant through the of knowledge of diversity these microorganisms in degraded and native areas, it is essential for plans and quality indicators in ecosystem. The present study evaluate the diversity of AMF in reference ecosystem and degraded areas on mountain, in dry and rainy seasons, and relate it to the soil properties. Soil samples were collected in 13 plots of three areas of the reference ecosystem and degraded rupestrian grassland. We calculated the density, richness and composition of AMF, as well as soil properties in each sample. The macro and micronutrients of soil, only potassium (K) and magnesium (Mg) varied significantly between areas ( $p < 0.05$ ). In reference ecosystems, the density and richness of AMF was significantly higher than in degraded areas. There were significant differences in the density and richness of FMA among the reference ecosystem and degraded areas ( $p < 0.05$ ). Found 44 AMF species. More AMF species were reported in the areas of the reference ecosystem compared to the degraded area. However, there was no difference of density and richness of AMF between the dry and rainy seasons ( $p > 0.05$ ). There were differences in species composition between the areas ( $p < 0.05$ ). There was an effect of soil properties on the variation in the composition of AMF species by canonical correspondence analysis. Many of the species found can be used in degraded areas recovery programs since they are already adapted to stressful environmental conditions.

**Keywords:** rupestrian grasslands, reference ecosystem, degradation, Glomeromycetes

## 1. Introdução

Os estudos que avaliam a biodiversidade e o funcionamento de ecossistemas estão centrados em apenas um subset dos organismos. Em geral, integrantes importantes dos ecossistemas, como por exemplo, os fungos micorrizicos arbusculares (FMA), são raramente estudados, mesmo apresentando grande relevância no funcionamento ecossistêmico (Daily and Farley 2004). A avaliação dos micro-organismos pode indicar com qualidade e precisão o status de saúde dos solos, uma característica fundamental para o funcionamento ecossistêmico. Parâmetros microbiológicos e bioquímicos do solo são indicadores confiáveis da funcionalidade e evolução dos ecossistemas degradados (Dominati et al., 2010; Melloni et al., 2001) e tem grande influencia na distribuição dos fungos micorrizicos (Börstler et al., 2006; Hawkes et al., 2007).

Entre os diversos grupos de micro-organismos do solo, os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) formam associações mutualísticas com 80% das plantas terrestres (Trappe, 1987). Os FMA são os únicos que ligam diretamente o solo com as raízes e quando as plantas crescem sob condições de estresse mostram grande dependência micorrízica. A diversidade e a composição de FMA são bastante afetadas pela disponibilidade de nutrientes e uso do solo (Börstler et al., 2006; Hawkes et al., 2007; McGonigle and Miller, 1999; Moreira and Siqueira, 2002; Pringle and Bever, 2002; Silveira, 2000). A degradação ocasiona mudanças nas condições do solo e na cobertura vegetal, e por sua vez, altera a riqueza e a estrutura da comunidade de FMA, favorecendo a dominância de algumas poucas espécies (Bundrett et al., 1996; Börstler et al., 2006; Klauberg-Filho et al., 2002). Em áreas degradadas pode-se encontrar mais esporos que em áreas nativas devido ao aumento na produção de glomerosporos daquelas espécies mais resistentes (Pfleger et al., 1994; Visser, 1985).

Por outro lado, a maioria dos planos de restauração de áreas degradadas deveriam utilizar micorrizas (Janos, 1996; Pouyu-Rojas et al., 2006; Schreiner et al., 2007; Smith and Read, 2008). Tal incremento reduz os efeitos negativos do estresse causado tanto pela falta de nutrientes como pela degradação (e.g., Allen, 1984; Folli-Pereira et al., 2012; Klauberg-Filho et al., 2005; Moreira and Siqueira, 2006; ; Siqueira et al., 2007, 2008; Souza and Silva, 1996; Sylvia and Williams, 1992; van der Heijden et al., 1998; Vargas and Hungria, 1997). Plantas micorrizadas apresentam maior crescimento com aumento na absorção de nutrientes quando comparadas com plantas não inoculadas (e.g., Tavares, 2007). Por outro lado, Santos et al. (2008) afirmaram que

em solo de baixa fertilidade degradado pela mineração de bauxita, os FMA precedentes das áreas mineradas foram eficientes no crescimento das plantas.

Uma das alternativas da aplicação de micorrizas no solo para restauração de áreas degradadas é o aumento das populações de FMA nativos com utilização de inóculos desses fungos oriundos do ecossistema de referência (Carneiro et al., 2008; Wubet et al., 2003). O conhecimento de FMA dos ecossistemas de referência possibilitaria assim a identificação das espécies com potencial para a inoculação de mudas nas áreas em restauração, quando feita corretamente com espécies nativas do local (Camara et al., 2016; Coutinho et al., 2015; Reichert et al., 2006).

Os campos rupestres representam um ecossistema de grande importância no cenário mundial devido a sua alta biodiversidade e endemismo vegetal (Fernandes et al., 2016) mas que vem sofrendo um grande e crescente impacto antrópico (Barbosa et al., 2010; Fernandes et al., 2014, 2016a; Hilário et al., 2011). Talvez o impacto mais profundo neste ecossistema seja aquele provocado pelas atividades minerárias (Fernandes et al., 2016b). Os campos rupestres possuem naturalmente baixa fertilidade nos solos e sua dinâmica é geralmente lenta e com baixa capacidade de se restaurar espontaneamente (Fernandes et al. 2016b; Le Stradic et al., 2014; Mota et al., 2016; Negreiros et al. 2011). Assim, o conhecimento das populações de FMA em solos de campos rupestres é de grande relevância para agregar novas estratégias de manejo e conservação das espécies restritas a este ecossistema.

Foi nosso objetivo caracterizar, a comunidade de fungos micorrízicos arbusculares em áreas de ecossistemas de referência de campos rupestres e comparar com áreas degradadas, nas estações seca e chuvosa, a fim de verificar o efeito da degradação na comunidade de FMA. Grandes variações na estrutura e composição dos fungos micorrízicos arbusculares são observadas entre as estações seca e chuvosa (e.g., Bonfim et al., 2010; Giovannetti, 1985; Trufem and Bononi, 1985). Geralmente, há maior riqueza de FMA e os esporos são mais abundantes na estação seca em relação à estação chuvosa (Caproni et al., 2003; Guadarrama and Alvarez-Sánchez, 1999). Neste trabalho testamos as seguintes hipóteses: i) a riqueza de FMA em áreas ecossistema de referência é maior que nas áreas degradadas e a densidade de FMA em áreas ecossistema de referência é menor que nas áreas degradadas; ii) a riqueza e a densidade de FMA são maiores na estação seca em comparação com a estação chuvosa, tanto em áreas ecossistema de referência quanto em áreas degradadas; iii) a composição e a

dominância de FMA diferem entre as áreas de ecossistemas de referência e áreas degradadas nas estações seca e chuvosa; iv) as propriedades do solo, principalmente o fósforo, são maiores nas áreas de ecossistemas de referência e áreas degradadas; a diferença das propriedades do solo entre as áreas de ecossistemas de referência e áreas degradadas influenciam na comunidade de FMA.

## 2. Materiais e Métodos

As áreas de coleta estão localizadas nos campos rupestres quartzíticos da Serra do Cipó, Minas Gerais, localizada na porção sul da Cadeia do Espinhaço, na latitude 19°28'S e longitude 43°58'W. O clima da região é do tipo Cwb (clima mesotérmico com verões brandos e estação chuvosa no verão) na classificação de Köppen, com temperaturas médias entre 17,4° e 19,8° C. A precipitação anual da região gira em torno de 1500 mm, com inverno seco de três a quatro meses, e período úmido de sete a oito meses (veja Fernandes et al., 2016c).

Os campos rupestres possuem a cobertura da superfície do solo por pequenos fragmentos de rochas quartzíticas com o predomínio de espécies herbáceas (Giullietti et al., 1987). As áreas degradadas estudadas possuem o solo exposto pois tiveram esta cobertura superior do solo removida durante o processo de construção da estrada MG-010, retirando parte do solo e da vegetação (Fig.1). Foi observada a ocorrência de gramíneas, principalmente do gênero *Urochloa* (Poaceae), cobrindo parte do solo, em decorrência da sua invasão após obras de asfaltamento da MG-010 em áreas de campos rupestres. Foram selecionadas três áreas degradadas, distantes geograficamente em pelo menos um quilômetro, localizadas paralelamente à estrada enquanto três áreas do ecossistema de referência estão localizadas ao lado das áreas degradadas (Fig. 1). As áreas do ecossistema de referência foram selecionadas por apresentarem similaridade ambiental com outras áreas nativas de campos rupestres já estudadas (Giulietti & Pirani, 1987; Carvalho et al. 2012) e pela proximidade espacial com as áreas degradadas.

Para análise dos parâmetros físico-químicos do solo, densidade, riqueza e composição de esporos de FMA, foram coletadas cinco amostras simples de solo na profundidade de 0 a 20 cm em 13 parcelas (10m x10m) de três áreas degradadas e de três áreas no ecossistema de referência. As amostras simples de solo foram

homogeneizadas, obtendo uma amostra composta por parcela (total = 78 amostras). As amostras foram colocadas em sacos plásticos identificados e levadas ao laboratório. As coletas de solo foram realizadas nas estações chuvosa e seca nos mesmos locais.

Para as análises químicas e físicas do solo, as amostras de solos foram secas em temperatura ambiente e peneiradas a 2,0 mm para as análises dos macro (nitrogênio - N, fósforo - P, potássio - K, cálcio - Ca e magnésio - Mg) e micronutrientes (ferro - Fe, zinco - Zn, cobre - Cu e manganês - Mn). O N foi determinado por digestão com mistura ácida, difusão e titulação do  $\text{NH}_3$  com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,01N; o P foi extraído com solução de HCl 0,05 mol  $\text{L}^{-1}$  e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,025 mol  $\text{L}^{-1}$  (Mehlich<sup>-1</sup>) e determinado por colorimetria na presença de ácido ascórbico; o K foi extraído com HCl 0,05 mol $\text{L}^{-1}$ , na proporção 1:10, e dosado por fotometria de chama; o Ca e o Mg foram extraídos com KCl 1 mol $\text{L}^{-1}$ , na proporção 1:20, e dosados por absorção atômica. Os teores de Fe, Zn, Cu e Mn foram extraídos com solução HCl 0,05 mol  $\text{L}^{-1}$  e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,025 mol  $\text{L}^{-1}$  (Mehlich<sup>-1</sup>) (Embrapa 1997). As análises químicas e físicas do solo foram realizadas no laboratório de Análise de Solos da EMBRAPA (CNPMS).

Para o estudo da riqueza, densidade e composição de FMA, as amostras de solo foram acondicionadas e analisadas no Laboratório de Ecologia Evolutiva e Biodiversidade na Universidade Federal de Minas Gerais. A avaliação da riqueza, densidade e composição de FMA foi realizada em amostras de 50 g de solo, onde os esporos foram extraídos por peneiramento úmido (Gerdemann and Nicolson, 1963) (para mais detalhes veja Anexo 1). Os esporos foram contados e separados de acordo com a morfologia semelhante com auxílio de um microscópio estereoscópico (x40), sendo em seguida colocados em lâminas com álcool polivinil em lactoglicerol (PVLG) e com PVLG + reagente de Melzer (1:1 v:v). A identificação das espécies foi realizada segundo descrição morfológica presente em Schenck and Pérez (1988) e na página da International Culture Collection of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (INVAM <http://invam.caf.wvu.edu>) e Leibniz-Rechenzentrum (LRZ).

Para a caracterização de espécies, esporos dos fungos foram obtidos de culturas armadilhas. Para isso, amostras de solo (200g) coletadas nas áreas degradadas e nos ecossistemas de referência foram usadas em culturas armadilhas em casa-de-vegetação. Foi utilizada *Urochloa decumbens* Stapf (*Poaceae*) como planta hospedeira para a multiplicação dos FMA, pois apresenta crescimento perene, rusticidade e facilidade de manutenção das plantas (Jakelaitis et al., 2005; Smith and Read, 2008).

Para verificar se as propriedades do solo são maiores nos ecossistemas de referência que em áreas degradadas, para testar a hipótese de que a riqueza é maior nas áreas de ecossistema de referência em relação à área degradada e densidade de FMA é menor nas áreas de ecossistema de referência em relação à área degradada, e de que a riqueza e a densidade de FMA são maiores na estação seca em relação à estação chuvosa, foram realizados testes ANOVA (Análise de variância), através de um modelo linear generalizado (GLM) (Crawley, 2002).

Para testar se a composição de espécies de FMA varia entre as áreas e entre as estações, foram utilizadas análises multivariadas, cujas variáveis explicativas foram as áreas e as estações. Para verificar possíveis similaridades na composição de espécies de FMA entre as áreas e entre as estações foi aplicado o teste ANOSIM (Análise de similaridade). Os valores obtidos foram colocados na matriz de similaridade, para posterior aplicação de Análise de Cluster, com agrupamento em pares, utilizando o índice de Sørensen.

O efeito das propriedades do solo sobre a variação na composição de espécies de FMA foi acessado por análise de correspondência canônica (CCA). A significância foi acessada pelo teste de permutação de "Monte Carlo", utilizando-se o Programa PC-Ord for Windows versão 5.0 (McCune and Mefford, 1997). A matriz resposta foi a matriz de espécies de FMA e a matriz explicativa foi formada por descritores químicos e físicos do solo. Dentro deste conjunto de variáveis foram ainda eliminadas todas aquelas que apresentaram baixa correlação com os eixos da ordenação ( $< 0,05$ ).

### **3. Resultados**

A degradação das áreas de campos rupestres proporcionou a redução dos macronutrientes e aumento dos micronutrientes no solo. No entanto, dos cinco macronutrientes do solo analisados, somente potássio (K) e magnésio (Mg) variaram significativamente entre as áreas do ecossistema de referência e degradadas (glm,  $p=0,002$ ;  $p=0,0001$ , respectivamente). As áreas do ecossistema de referência apresentaram três vezes maior concentração média do teor de K ( $0,90 \text{ g.kg}^{-1}$ ) e dez vezes maior concentração média de Mg ( $0,30 \text{ g/kg}$ ) que as áreas degradadas (Tabela 1). Os micronutrientes não variaram entre as áreas ( $p>0,05$ ) (Tabela 1).

Nos ecossistemas de referência, a densidade de glomerosporos foi significativamente maior (42.958 glomerosporos), registrando mais que o dobro de glomerosporos encontrados nas áreas degradadas (19.528 glomerosporos) (número médio de densidade de glomerosporos  $550,74 \pm 31,54$  e  $250,36 \pm 19,39$  no ecossistema de referência e em área degradada, respectivamente ( $F=65,82$ ,  $df=1$ ,  $p<0,0001$ , Fig. 2a)), portanto não corroborando a hipótese de que a densidade de FMA em áreas ecossistema de referência é menor do que nas áreas degradadas. Nos ecossistemas de referência e nas áreas degradadas a densidade de glomerosporos não diferiu entre as estações seca e chuvosa (número médio de densidade de glomerosporos  $408,96 \pm 33,27$  e  $392,14 \pm 29,11$  na estação chuvosa e seca, respectivamente,  $F=0,20$ ,  $df=1$ ,  $p=0,6522$ ). Nos ecossistemas de referência foram encontrados 21.904 glomerosporos na estação chuvosa e 21.054 glomerosporos na estação seca. Nas áreas degradadas foram encontrados 9.995 glomerosporos na estação chuvosa e 9.533 glomerosporos na estação seca. Não houve interação entre as áreas e as estações ( $F=0,01$ ,  $df=1$ ,  $p=0,8939$ ).

Foram encontradas 44 espécies de FMA no total, distribuídas em 11 gêneros e 10 famílias (Tabela 2). A riqueza de FMA diferiu entre as áreas do ecossistema de referência e degradadas (número médio de espécies  $5,76 \pm 0,29$  e  $3,39 \pm 0,22$  no ecossistema de referência e em área degradada, respectivamente,  $F=43,61$ ,  $df=1$ ,  $p<0,0001$ , Fig. 2b)). Mais espécies de FMA foram registradas nas áreas do ecossistema de referência em comparação com a área impactada, 35 espécies de FMA foram encontradas na área do ecossistema de referência enquanto que nas áreas degradadas foram registradas 28 espécies de FMA, portanto corroborando com a hipótese de que a riqueza de FMA é maior no ecossistema de referência. A riqueza de FMA nos ecossistemas de referência e nas áreas degradadas não diferiu entre as estações seca e chuvosa (número médio de espécies  $5,01 \pm 0,29$  e  $4,15 \pm 0,28$  nas estações chuvosa e seca, respectivamente,  $F=0,36$ ,  $df=1$ ,  $p=0,0582$ ). Nos ecossistemas de referência, 33 espécies de FMA foram registradas na estação chuvosa, enquanto 27 espécies foram registradas na estação seca, sem diferença significativa ( $F=0,28$ ,  $df=1$ ,  $p=0,058$ ). Nas áreas degradadas, foram registradas 27 espécies de FMA na estação chuvosa, enquanto 28 espécies foram registradas na estação seca, porém não houve diferença significativa. Não houve interação entre as áreas e as estações ( $F=0,35$   $df=1$ ,  $p=0,5457$ ).

Entre as espécies de FMA encontradas, 10 são comuns às áreas do ecossistema de referência e degradadas, e ocorreram nas duas estações. *Glomus macrocarpum* foi a espécie mais abundante (6.740 glomerosporos), apresentando maior dominância tanto entre as áreas como entre as estações (Tabela 2). Nas áreas degradadas foram encontradas nove espécies exclusivas, enquanto que as áreas do ecossistema de referência apresentaram 18 espécies exclusivas, sendo que seis espécies ocorreram somente na estação chuvosa: *Diversispora* aff *postulata*, *Glomus* aff *fasciculatum*, *Glomus* aff *heterosporum*, *Glomus* sp.5, *Glomus* sp.6 e *Pacispora robigina*. O gênero *Glomus* apresentou a maior diversidade de espécies (15 espécies), e o maior número de glomerosporos.

Na ordenação da composição de espécies entre as áreas, o NMDS mostrou uma resolução com alto grau, indicando um nível de similaridade entre as estações das mesmas áreas. Em outras palavras, a composição de espécies de FMA diferiu significativamente entre as áreas do ecossistema de referência e degradadas ( $p < 0,05$ ). Apesar dessa diferença, os dados de frequência das espécies nas amostras (matriz geral de presença-ausência), indicou similaridade na composição de espécies entre as estações das mesmas áreas (Fig. 3). Quanto à similaridade, observou-se a formação de agrupamento das áreas/estações em dois níveis (Fig. 4). No primeiro nível encontram-se as estações seca e chuvosa das áreas nativas, apresentando semelhança de 23%. No segundo nível, encontram-se as estações seca e chuvosa das áreas degradadas, com nível de semelhança de 11%.

As propriedades do solo tiveram efeito sobre a variação na composição de espécies de FMA pela análise de correspondência canônica (CCA) através do teste de permutação de "Monte Carlo" que foi significativo ( $p < 0,05$ ), corroborando a hipótese de que as propriedades do solo influenciam na comunidade de FMA. A composição de espécies de FMA foi correlacionada com o teor de potássio (K) em campos rupestres. As espécies como *Acaulospora scrobiculata* (Acauscro), *Dentiscutata heterogama* (Denthete), *Gigaspora* sp.1 (Gigasp.1) e *Glomus diaphanus* (Glomdiap) apresentaram correlação positiva com o teor de K, enquanto que as espécies *Acaulospora lacuonosa* (Acaulacu), *Acaulospora leaves* (Acauleav), *Gigaspora* sp.2 (Gigasp.2) e *Intraostopora intraornata* (Racointr) apresentaram correlação negativa (Fig. 5).

#### 4. Discussão

Os solos de campos rupestres apresentam solos ácidos, deficientes em macronutrientes e com alta saturação por alumínio devido às origens geológicas e geomorfológicas (Dossin et al., 1990). A baixa disponibilidade de recursos nutricionais e estresses hídricos causados por condições climáticas têm sido frequentemente reportadas nas regiões montanhosas quartzíticas na Serra do Cipó (Carvalho et al., 2012; Fernandes et al., 2011). Neste trabalho ficou evidenciado que a degradação das áreas de campos rupestres alterou ainda mais a disponibilidade de nutrientes com a redução dos macronutrientes e aumento dos micronutrientes no solo. Dessa forma, no processo de restauração ambiental de campos rupestres deve considerar também o reestabelecimento das propriedades do solo, principalmente potássio (K) e magnésio (Mg) que variaram significativamente entre os ecossistemas de referência e degradados.

A hipótese de que o estresse ambiental pode levar os fungos micorrízicos arbusculares à maior esporulação ocasionando maior número de glomerosporos em áreas degradadas do que em áreas nativas tem sido bastante aceita (e.g., Miller and Jastrow, 1992). Por exemplo, Smith and Read (1997) relatam que os FMA em situações de estresse tendem a aumentar o número de glomerosporos no solo, sendo uma resposta comum aos FMA (Pawlowska et al., 2000). No entanto, no presente trabalho, um maior número de glomerosporos foi encontrado na área do ecossistema de referência em comparação com o ambiente degradado. A construção de estradas nas áreas degradadas pode ter contribuído para o menor número de glomerosporos de FMA, devido principalmente pela remoção do solo e da vegetação (Wu et al., 2002), além disso, as espécies vegetais podem ter suas raízes também removidas, causando a redução da densidade de FMA, tornando necessária a introdução desses fungos (Jasper et al., 1992), ou mesmo plantas inoculadas.

A maior ocorrência de glomerosporos em áreas do ecossistema de referência também pode estar relacionada à maior quantidade de nutrientes como K e Mg. Geralmente, a pouca disponibilidade desses nutrientes reflete em maior colonização de FMA em espécies vegetais e menor densidade de glomerosporos de FMA nos solos (Abbot and Robson, 1991). Apesar da maior disponibilidade desses nutrientes em áreas do ecossistema de referência, o teor é considerado baixo em relação a outros ambientes, necessitando de maior densidade de glomerosporos para absorção. Muitos trabalhos

mostraram que as espécies vegetais se beneficiam da simbiose com FMA em situações de baixa fertilidade (Berbara et al., 2006; Caldeira et al., 1999; Colozzi-Filho et al., 1994; Lopes et al., 1983; Miranda, 2008; Vargas and Hungria, 1997).

Os campos rupestres constituem em alta biodiversidade e endemismo de plantas e ao mesmo tempo em uma das maiores diversidade de FMA (Carvalho et al., 2012; Coutinho et al., 2015; Oki et al., 2016). Apesar da menor riqueza de FMA encontrada neste trabalho em relação aos outros trabalhos já realizados nesse ecossistema em diferentes habitats e ao longo do gradiente de altitude, este ecossistema é fonte de diversidade de FMA (Coutinho et al., 2015; Oki et al., 2016) . Carvalho et al. (2012) relatou pela primeira vez a riqueza de espécies de FMA (49 espécies) presentes em ecossistemas de campos rupestres em cinco diferentes habitats da Serra do Cipó; enquanto que Coutinho et al. (2015) relataram 51 espécies de FMA ao longo do gradiente altitudinal.

Na estação seca geralmente há maior densidade de glomerosporos e número de espécies de FMA que a chuvosa (Caproni et al., 2003). No entanto, não foi verificada esta diferença para campos rupestres, ou seja, o número de glomerosporos e a riqueza de FMA não foram afetados pelo período de coleta. Pode ser que diferença da disponibilidade hídrica e da temperatura entre as estações no ano da coleta não foi suficiente para provocar mudanças na comunidade de FMA.

A importância dos FMA em áreas de baixa fertilidade é notória, uma vez que eles aumentam a área de absorção do sistema radicular das plantas, absorvendo mais nutrientes através de suas hifas (Berbara et al., 2006; Caldeira et al., 1999; Colozzi-Filho et al., 1994; Lopes et al., 1983; Miranda, 2008; Vargas and Hungria, 1997). No entanto, apesar da rodovia ter sido construída há anos, não foi possível que a comunidade de FMA se restaurasse naturalmente e, provavelmente isso se aplica a comunidade vegetal também, confirmando que os campos rupestres possuem baixa resiliência (Fernandes et al., 2014; Negreiros et al. 2011;). Com isso, é necessária a restauração ambiental com aplicação de mudas inoculadas com FMA oriundos de ecossistemas de referência, já que a composição entre as áreas do ecossistema de referência e degradadas são diferentes, com ocorrência de espécies exclusivas no ecossistema de referência como *Diversispora aff postulata*, *Glomus aff fasciculatum*, *Glomus aff heterosporum*, *Glomus sp.5*, *Glomus sp.6* e *Pacispora robigina*. Estas espécies de FMA, exclusivas dos ecossistemas de referências, são observadas sob

espécies vegetais utilizadas na recuperação de áreas degradadas de campos rupestres (dados não publicados).

*Glomus macrocarpum* foi a espécie mais abundante e dominante entre as áreas de ecossistemas de referência e degradadas e estações seca e chuvosa, sugerindo que esta espécie está bem adaptada às alterações do solo e climáticas. Geralmente, a grande abundância e a dominância de *G. macrocarpum* ocorrem devido ao desenvolvimento de estruturas produtoras de esporos chamadas esporocarpos (Nicolson and Gerdemann, 1968). A maior abundância e a dominância desta espécie de FMA, principalmente em áreas degradadas, também podem estar associadas à presença de gramíneas (Caproni et al., 2003). A degradação em campos rupestres pelas atividades humanas, tais como a mineração e a construção de estradas, tem sido a principal causa de invasão por espécies vegetais não nativas, principalmente do gênero *Urochloa* (Fernandes et al., 2014; Le Stradic et al., 2014). Este gênero possui crescimento perene, rusticidade, raízes fasciculadas (Jakelaitis et al., 2005; Smith and Read, 2008) e efeito alelopático sobre o crescimento de outras espécies vegetais, cobrindo rapidamente o solo (Souza et al., 2006). Devido às características destas gramíneas, estas plantas rapidamente são colonizadas e influenciam a reprodução de FMA, fazendo com que estas espécies vegetais fiquem mais competitivas em relação às espécies nativas e ao mesmo tempo influenciam na comunidade de FMA já que estimulam a dominância de espécies de FMA mais generalistas e resistentes às alterações do solo, como o caso de *Glomus macrocarpum*.

Cardozo Junior et al. (2012), avaliando FMA em áreas degradadas no Nordeste do Brasil e comparando com áreas de vegetação nativa e áreas sob a restauração, encontraram diferenças das propriedades do solo, assim como alteração da riqueza e composição de espécies de FMA com a degradação. Mergulhão et al. (2010), avaliando a diversidade de FMA em áreas impactadas pela mineração, encontraram diferenças na composição de espécies, sendo que atividade de mineração reduziu a diversidade de FMA, além disso, comparando a diversidade de FMA entre as estações, foi encontrada menor similaridade entre as espécies de FMA no período chuvoso entre as áreas nativas e degradadas.

A análise de agrupamento mostrou que o grau de similaridade das espécies de FMA parece ser estruturado em função da degradação e da estação, evidenciada pela formação de grupos, já que as estações são mais similares dentro da mesma área quanto

à composição de espécies de FMA e mais dissimilares nas diferentes áreas. Assim, o padrão de agrupamento apresentado sugere que a distribuição das espécies entre as áreas e as estações pode estar associada à variação edáfica condicionada pela degradação, uma vez que a degradação ambiental altera as propriedades do solo, afetando os serviços ecossistêmicos, desenvolvidos principalmente por FMA (Lima et al., 2007; Siqueira et al., 2007).

A diferença do tipo de solo devido à degradação ambiental nas áreas pode ter influenciado no estabelecimento de diferentes espécies de FMA. As propriedades físicas do solo tem efeito sobre a variação na composição de espécies de FMA, corroborando com outros trabalhos que relatam que as propriedades do solo tem efeito sobre os FMA (Caproni et al., 2005; Ferreira et al., 2012). O pH do solo e o teor de Al são os principais fatores edáficos correlacionados com a composição das comunidades de FMA (Correia et al., 2004; Sieverding, 1991). No entanto, em campos rupestres foi verificada que a maioria das espécies de FMA apresentam correlação com teores de areia fina, capacidade troca catiônica, matéria orgânica, pH e saturação de bases (Coutinho et al., 2015). Neste trabalho encontramos maior correlação de potássio com a composição de FMA. A colonização micorrízica aumenta a absorção de potássio (Trindade et al. 2000), sendo um elemento essencial para as plantas, pois este elemento maximiza a absorção de água (Barea, 1992; Tirta, 2006). No entanto, o aumento de níveis de stress de água reduz a concentração de potássio absorvida pelas plantas (Heidari and Karami, 2014). Assim, a menor disponibilidade de potássio em áreas degradadas encontradas neste trabalho pode afetar a absorção deste nutriente e água pelas plantas. É possível inferir também que a disponibilidade deste nutriente afeta a composição de FMA, uma vez que as espécies de FMA que tiveram correlação positiva com o teor de potássio são exclusivas do ecossistema de referência.

## **5. Conclusão**

Estudos com FMA em ecossistemas de referência são de grande importância devido ao conhecimento da aplicação destes fungos em diversas situações em que os solos são degradados e seu potencial de aplicação na recuperação de áreas degradadas. Neste trabalho a densidade e a riqueza de FMA em áreas ecossistema de referência são maiores que nas áreas degradadas, no entanto, não sofreram grande influência entre as

estações seca e chuvosa. A composição difere entre as áreas de ecossistemas de referência e áreas degradadas nas estações seca e chuvosa, com dominância de uma única espécie de FMA. A degradação proporcionou alteração das propriedades do solo e estas influenciam na comunidade de FMA. Muitas das espécies encontradas em ecossistemas de referência poderão ser usadas em programas de restauração de áreas degradadas uma vez que já estão adaptadas as condições estressantes do ambiente de campo rupestre.

### **Agradecimentos**

Agradecemos a dois revisores anônimos pela leitura e críticas a este manuscrito e ao apoio no campo dos estagiários do Laboratório Evolutiva de Ecologia e Biodiversidade/UFMG e do Laboratório de Ecologia e Propagação Vegetal/Unimontes. Ao Instituto Estadual de Florestas – IEF e Gerência de Projetos e Pesquisas-GPROP. Agradecemos ainda ao suporte financeiro do Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), à Fapemig pela bolsa concedida a ES Coutinho e à PPG – ECMVS/UFMG.

## 6. Referências bibliográficas

- Abbott, L.K., Robson, A.D., 1991. Factors influencing the occurrence of vesicular-arbuscular mycorrhizas. *Agric. Ecosyst. Environ.* 35,121–150.
- Allen, M.F., MacMahon, J.A., Anderson, D.C., 1984. Re-establishment of Endogonaceae on Mount St. Helens: survival of residues. *Mycologia* 76, 1031–1038.
- Barbosa, N.P.U., Fernandes, G.W., Carneiro, M.A.A., Júnior, L.A.C., 2010. Distribution of non-native invasive species and soil properties in proximity to paved roads and unpaved roads in a quartzitic mountainous grassland of southeastern Brazil (rupestrian fields). *Biol. Inv.* 12, 3745-3755.
- Barea, J.M., 1992. VAM as modifier of soil fertility. *Adv. Soil Sci.* 15, 1–40.
- Berbara, R.L.L., Sousa, F.A., Fonseca, H.M.A.C., 2006. Fungos micorrízicos arbusculares: muito além da nutrição. In: Fernandes, M.S. (Ed.). *Nutrição mineral de plantas*. Viçosa: SBCS. pp. 53-88.
- Bonfim, J.A., Matsumoto, S.N., LIMA, J.M., César, F.R.C.F., Santos, M. A. F., 2010. Fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e aspectos fisiológicos em cafeeiros cultivados em sistema agroflorestal e a pleno sol. *Bragantia*. 69, 1.
- Börstler, B., Renker, C., Kahmen, A., Buscot, F., 2006. Species composition of arbuscular mycorrhizal fungi in two mountain meadows with differing management types and levels of plant biodiversity. *Biol Fertil Soils*, 42: 286–298.
- Brundrett, M.C., Ashwath, N., Jasper, D.A., 1996. Mycorrhizas in the Kakadu region of tropical Austrália. II. Propagules of mycorrhizal fungi in disturbed habitats. *Plant Soil*, Dordrecht, 184, 173-184.
- Caldeira MVW, Silva EMR, Franco AA, Zanon MLB (1999). Efeito de FMAs no desenvolvimento de duas leguminosas arbóreas. *Cienc Flor* 9:63-70.
- Camara, R., Pereira, M.G., Silva, C.F., Paula, R.R., Silva, E.M.R., 2016. Fungos Micorrízicos Arbusculares em Dois Fragmentos Florestais de Restinga Periodicamente Inundável em Marambaia, RJ. *Flora Amb.* DOI: 10.1590/2179-8087.072214.
- Caproni, A. L., Franco, A. A., Berbara, R. L. L., Granha, J. R. D. O., Marinho, N.F., 2005. Fungos micorrízicos arbusculares em estéril revegetado com *Acacia mangium*, após mineração de bauxita. *Rer. Arv.* 29: 373-381.

- Caproni, A.L., Franco, A.A., Berbara, R.L.L., Trufem, S.B., Granha, J.R.D.O., Monteiro, A.B., 2003. Ocorrência de fungos micorrízicos arbusculares em áreas revegetadas após mineração de bauxita em Porto Trombetas, Pará. *Pesq. Agrop. Bras.* 38:1409–1418.
- Cardozo Júnior, F.M., Carneiro, R.F.V., Goto, B.T., Bezerra, A.A.C., Araújo, A.S.F., Nunes, L.A.P.L., 2012. Arbuscular mycorrhizal fungi in degraded lands in Northeast Brazil. *Afr. J. Microbiol. Res.* 6, 7198-7205.
- Carneiro, R.F.V., Martins, M.A., Freitas, M.S.M., Detmann, E., Vásquez, H.M., 2008. Bagaço de cana-de-açúcar como substrato para multiplicação de fungos micorrízicos arbusculares e sua influência sobre o estíloso. *Ver. Caatinga* 21, 189-196.
- Carvalho, F., Souza, F.A., Carrenho, R., Moreira, F.M.S., Jesus, E.C., Fernandes, G.W., 2012. The mosaic of habitats in the high-altitude Brazilian rupestrian fields is a hotspot for arbuscular mycorrhizal fungi. *Appl Soil Ecol*, 52, 9-19.
- Colozzi-Filho, A., Balota, E.L., 1994. Micorrizas arbusculares. In: Hungria, M., Araújo, R.S (Eds). *Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola*. Brasília: Embrapa, 1994.p. 383-418.
- Correia, C.R.M.A., Reatto, A., Martins, E.S., Silva, E.M., Caldas, L.S., Fagg, J.F., 2004. Micorriza Arbuscular: um bioindicador da fertilidade dos solos e da distribuição de árvores no Bioma Cerrado. Planaltina, Embrapa, 169p.
- Coutinho, E.S., Fernandes, G.W., Berbara, R.L.L., Maia, H.M., Goto, B.T., 2015. Variation of arbuscular mycorrhizal fungal communities along an altitudinal gradient in rupestrian grasslands in Brazil. *Mycorrhiza*. 25, 627-638.
- Daly, H.E., Farley, J., 2004. *Ecological Economics: principles and applications*. Island Press, Washington, DC.
- Dominati, E., Patterson, M., Mackay, A., 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecol. Econ.* 69, 1858-1868.
- Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1997) *Manual de métodos e análises de solo*, 2nd edn. Embrapa, Rio de Janeiro.
- Fernandes, G.W., 2016. The megadiverse rupestrian grassland. In: Fernandes G.W. (Rd) *Ecology and conservation of mountaintop grasslands in Brazil*. Springer, New York, pp 3–14.

- Fernandes, G.W. 2016a. The shady future of the rupestrian grassland: major threats to conservation and challenges in the anthropocene. In: Fernandes G.W. (Ed.). Ecology and Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil. Springer, New York, pp 545–561.
- Fernandes, G.W., Toma T.S.P., Angrisano, P.A., Overbeck, G., 2016b. Challenges in the restoration of quartzitic and ironstone rupestrian grassland. In: Fernandes G.W. (Ed.). Ecology and Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil. Springer, New York, pp 449-474.
- Fernandes, G.W., 2016c. Cerrado to rupestrian grasslands: patterns of species distribution and the forces shaping them along an altitudinal gradient. In: Fernandes GW. (Ed.). Ecology and Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil. Springer, New York, pp pp 345-377.
- Fernandes, G.W., Barbosa, N.P.U., Negreiros, D., Paglia, A.P., 2014. Challenges for the conservation of vanishing megadiverse rupestrian grasslands. Nat. Conserv., 12:162–165.
- Ferreira, D.A., Carneiro, M.A.C., Saggin Junior, O.J., 2012. Fungos Micorrízicos Arbusculares em um latossolo vermelho sob manejos e usos no cerrado. Rev. Bras. Ci. Solo, 36:51-61.
- Folli-Pereira, M.S., Meira-Haddad, L.S., Bazzolli, D.S., Kasuya, M.C.M., 2012. Micorriza arbuscular e a tolerância das plantas ao estresse. Rev. Bras. Ci. Solo. 36, 1663-1679.
- Gerdemann, J.W., Nicolson, T.H., 1963. Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil by wet-sieving and decanting. Trans. Br. Mycol. Soc., 46:235-244.
- Giovannetti, M. Seasonal variations of vesicular-arbuscular mycorrhizas and Endogonaceous spores in a maritime sand dune. Trans. Br. Mycol. Soc, 84:679-684,1985.
- Giulietti, A.M., Menezes, N.L., Pirani, J.R., Meguro, M., Wanderley, M.G.L.,1987. Flora da Serra do Cipó, Minas Gerais: caracterização e lista de espécies. Bol. Bot. 9, 1-151.
- Guadarrama, P., Álvarez-Sánchez, F.J., 1999. Abundance of arbuscular mycorrhizal fungi spores in different environments in a tropical rain forest. Mycorrhiza, 8:267–270.

- Hawkes, C.V., Deangelis, K.M., Firestone, M.K., 2007. Root Interactions with soil microbial communities and process In: Cardon, Z.G., Whitbeck, J.L. (Eds.). *The Rhizosphere: an ecological perspective*. Elsevier/Academic Press. 232p.
- Heidari, M., Karami, V., 2014. Effects of different mycorrhiza species on grain yield, nutrient uptake and oil content of sunflower under water stress. *J. S. Soc. Agric. Sci.* 13, 9-13.
- Hilário, R.R., Castro, S.A.B., Ker, F.T.O., Fernandes, G.W. 2011. Unexpected effects of pigeon-peas (*Cajanus cajan*) in the restoration of rupestrian fields. *Planta Daninha*, 29, 717-723.
- Janos, D.P. , 1996. Mycorrhizas, succession and rehabilitation of deforested lands in the humid tropics. In: Frankland, J.C., Gadd, G.M. (Eds.). *Fungi and environmental change*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 1-18.
- Jakelaitis, A., Silva, A.F., Silva, A.A., Ferreira, L.R., Freitas, F.C.L., Vivian, R., 2005. Influência de herbicidas e de sistemas de semeadura de *Brachiaria brizantha* consorciada com milho. *Planta Daninha*. 23, 59-68.
- Jasper, D.A., 1994. Management of mycorrhizas in revegetation. In: Robson, A.D, Abbott, L.K., Malajczuk, N. (Eds.). *Management of mycorrhizas in Agriculture, Horticulture and Forestry*, pp. 211-220. Kluwer Academic Publisher, Netherlands.
- Klauber-Filho, O., Siqueira, J.O., Moreira, F.M.S., 2002. Fungos micorrízicos arbusculares em solos de área poluída com metais pesados. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 6:125-134.
- Klauber-Filho, O., Siqueira, J.O., Moreira, F.M.S., Soares, C.R.F.S., Silva, S., 2005. Ecologia, função e potencial de aplicação de FMAs em condições de excesso de metais pesados. In: Vidal-Torrado, P., Alleoni, L.R.F., Cooper, M., Silva, A.P., Cardoso, E.J., (Eds). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG, Soc. Bras. Ci. Solo. 4,85-144.
- Le Stradic, S., Buisson E., Negreiros, D., Campagne, P., Fernandes, G.W., 2014. The role of native woody species in the restoration of campos rupestres in quarries. *Appl. Veg. Sci.* 17, 109-120.
- Lima, R.L.F.A., Salcedo, I.H., Fraga, V.S., 2007. Propágulos de fungos micorrízicos arbusculares em solos deficientes em fósforo sob diferentes usos, da região semi-árida do nordeste do Brasil. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 31, 257-268.

- Lopes, E.S., Siqueira, J.O., Zambolim, L., 1983. Caracterização das micorrizas vesicular-arbusculares (MVA) e seus efeitos no crescimento das plantas. *Rev. Bras. Ci. Solo.* 7, 1-19.
- McCune, B., Mefford, M.J., 1997. PC-ORD: Multivariate analysis of ecological data—version 3.0. Oregon: MJM Software Design, Gleneden Beach 43p.
- Melloni, R., Siqueira, J.O., Moreira, F.M.S., 2003. Fungos micorrízicos arbusculares em solos de área de mineração de bauxita em reabilitação. *Pesq. Agropec. Bras.*, 38, 267-276.
- Mergulhão, A.C.E.S., Burity, H.A., Goto, B.T., Maia, L.C., 2010. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in a gypsum mining impacted semiarid área. *Acta Bot. Bras.* 24,1052-1061.
- Miller, R.M., Jastrow, J.D., 2000. Mycorrhizal fungi influence soil structure. In: Kapulnik, Y., Douds, D.D. (eds). *Arbuscular mycorrhizas: physiology and function*. Dordrecht. Kluwer, p 3–18.
- Miranda, J.C.C., 2008. *Cerrado: Micorriza arbuscular: ocorrência e manejo*. Embrapa Cerrados, Planaltina, 169p.
- Moreira, F.M.S., Siqueira, J.O., 2006. *Microbiologia e Bioquímica do Solo*. 2nd ed. 729p. Lavras: UFLA.
- Mota, N.M., Rezende, V.L., Mota, G.S., Fernandes, G.W., Nunes, Y.R.F., 2016. Forces driving the regeneration component of a rupestrian grassland complex along an altitudinal gradient. *Braz. J. Bot.* DOI: 10.1007/s40415-016-0287-6
- Negreiros, D., Fernandes, G.W., Berbara, R.L.L., Rodarte, L.H.O., Barbosa, N.P.U., 2011. Caracterização físico-química de solos quartzíticos degradados e áreas adjacentes de campo rupestre na Serra do Cipó, MG, Brasil. *Neotrop. Biol. Conserv.* 6, 156-161.
- Nicolson, T.H., Gerdemann, G.W., 1968. Mycorrhizal Endogonal Species. *Mycologia.* 60, 313-325.
- Oki, Y., Goto, B.T., Jobim, K., Rosa, L.H., Ferreira, M.C., Coutinho, E.S., Xavier, J. H.A., Carvalho, F., Moreira, F.M.S., Souza, F.A., Berbara, R.L. Fernandes, G.W., 2016. Arbuscular Mycorrhiza and Endophytic Fungi in Ruspestrian Grasslands. In: G.W. Fernandes (ed). *Ecology and Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil*. Springer, pp 157-179.

- Pawlowska, T.E., Chaney, R.L., Chin, M., Charvat. I., 2000. Effects of metal phytoextraction practices on the indigenous community of arbuscular mycorrhizal fungi at a metal contaminated landfill. *Appl. Environ. Microbiol.* 6, 2526-2530.
- Pfleger, F.L., Stewart, E.L., Noyd, R.K., 1994. Role of VAM fungi in mine land revegetation. In: Pfleger, F.L., Lingerman, R.G. (Ed.). *Micorrhizae and plant health*. St. Paul: APS Press, 1994. p. 47-82.
- Puoyu-Rojas, E., Siqueira, J.O., Santos, J.G.D., 2006. Compatibilidade simbiótica de fungos micorrízicos arbusculares com mudas de espécies arbóreas tropicais. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 30, 413-424.
- Pringle, A., Bever, J.D., 2002. Divergent phenologies may facilitate the coexistence of arbuscular mycorrhizal fungi in a north carolina grassland. *Am. J. Bot.* 89, 1439–1446.
- Santos, J.G.D., Siqueira, J.O. Moreira, F.M.S., 2008. Eficiência de fungos micorrízicos arbusculares isolados de solos de áreas de mineração de bauxita no crescimento inicial de espécies nativas. *Rev. Bras. Ci. Solo*. 32, 141-150.
- Schreiner, R. P., 2007. Effects of native and nonnative arbuscular mycorrhizal fungi on growth and nutrient uptake of 'Pinot noir' (*Vitis vinifera* L.) in two soils with contrasting levels of phosphorus. *Appl. Soil Ecol.* 36, 205-215.
- Sieverding, E., 1991. Vesicular-arbuscular mycorrhiza management in tropical agrosystems. Eschborn, Fed. Rep. of Germany: Friedland Bremer, 371p
- Silva, G.A., Trufem, S.F.B., Saggin Júnior, O.J., Maia, L.C., 2005. Arbuscular mycorrhizal fungi in a semiarid copper mining area in Brazil. *Mycorrhiza*. 15, 47-53.
- Silveira, A.P.D., 2000. Avaliação de fungos micorrízicos arbusculares e sua importância ambiental. In: Freghetto, R.T.S., Valarini, P.J. (Ed.). *Indicadores biológicos e bioquímicos da qualidade do solo*. Jaguariúna: EMBRAPA, p. 61-75.
- Siqueira, J.O., Soares, C.R.F.S., Silva, C.A., 2008. Matéria orgânica em solos de áreas degradadas. In: Santos, G.A., Silva, L.S., Canellas, L.P., Camargo, F.A.O. (Eds.). *Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo - Ecossistemas Tropicais e Sub-tropicais*. 2ª ed. Porto Alegre, Metrópole Editora Ltda, pp.495-524.
- Siqueira, J.O., Soares, C.R.F.S., Santos, J.G.D., Schneider, J., Carneiro, M.A.C., 2007. Micorrizas e a degradação do solo: caracterização, efeitos e ação recuperadora. *Tóp. Ci. Solo*. 5: 219-306.

- Souza, F.A., Silva, E.M.R., 1996. Micorrizas arbusculares na revegetação de áreas degradadas. In: Siqueira, J.O. (Ed.). Avanços em fundamentos e aplicação de micorrizas. Lavras:Universidade Federal de Lavras/DCS e DCF, p p.255-290.
- Souza, F.A., Silva, I.C.L., Berbara, R.L.L., 2007. Fungos micorrízicos arbusculares: muito mais diversos do que se imaginava. In: Moreira, F.M.S., Siqueira, J.O., Brussard, L. (Eds). Biodiversidade do Solo em Ecossistemas Brasileiros. UFPA, Lavras, pp 483-536.
- Sylvia, D.M., Williams, S.E., 1992. Vesicular arbuscular mycorrhizae and environmental stress. In: Bethlenfalvay, G.J., Linderman, R.G. (Eds). Mycorrhizae in sustainable agriculture. Madison, American society of Agronomy. pp.101-124.
- Tavares, R.C., 2007. Efeito da inoculação com fungo micorrízico arbuscular e da adubação orgânica no desenvolvimento de mudas de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth.), sob estresse salino. Dissertação de Mestrado. Fortaleza, Universidade Federal do Ceará, 2007. 67p.
- Trappe, J.M., 1987. Phylogenetic and ecologic aspects of mycotrophy in the angiosperms from an evolutionary standpoint. In: Safir, G. F. (ed.), Ecophysiology of VA mycorrhizal plants. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 5-25.
- van der Heijden, M.G.A., Klironomos, J.N., Ursic, M., Moutoglis, P., Streitwolf, E.R., Boller, T., Wiemken, A., Sanders, I.R., 1998. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*. 396, 69-72.
- Vargas, M.A.T., Hungria, M., 1997. Biologia dos solos dos cerrados. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 400p.
- Visser, S., 1985. Role of the soil invertebrates in determining the composition of soil microbial communities. In: Fitter, R. (Ed). Ecological interactions in soil: Plants, microbes and animals. Stockholm: British Ecological Society, pp. 287-317.
- Tirta, I.G., 2006. The effect of potassium and mycorrhiza on growth of vanilla (*Vanilla planifolia* Andrew). *Biodiversitas*. 7, 171-174.
- Trufem, S.F.B., Bononi, V.L.R., 1985. Micorrizas vesículo-arbusculares de culturas introduzidas em área de cerrado. *Rickia*. 12, 165 -187.
- Wu, T.H., Hao, W.Y., Lin, X.G., Shi, Y.Q., 2002. Screening of arbuscular mycorrhizal fungi for the revegetation of eroded red soils in subtropical China. *Plant Soil*. 239, 225–235.

Wubet, T., Weib, M., Kottke, I., Teketay, D., Oberwinkler, F., 2003. Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in *Prunus africana*, an endangered medicinal tree species in dry Afromontane forests of Ethiopia. *New Phytol.* 161, 517–528.

**Tabela 1.** Comparação dos valores médios das propriedades do solo de 78 amostras de solo entre áreas degradadas e ecossistema de referência de campos rupestres da Serra do Cipó, Minas Gerais. Areia fina (AF), Areia grossa (AG), Argila (Arg), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Fósforo (P), Magnésio (Mg), Manganês (Mg), Matéria orgânica (MO), Nitrogênio (N), Potássio (K), Silte (Silt), Zinco (Zn). Propriedades do solo na mesma coluna com a mesma letra não foram significativos.

<b>Área</b>	<b>AF</b> (%)	<b>AG</b> (%)	<b>Arg</b> (%)	<b>Cu</b> (mg.Kg <sup>-1</sup> )	<b>Fe</b> (mg.Kg <sup>-1</sup> )	<b>K</b> (g.Kg <sup>-1</sup> )	<b>Mg</b> (g/Kg)	<b>Mn</b> (mg.Kg <sup>-1</sup> )	<b>MO</b> (%)	<b>N</b> (g.Kg <sup>-1</sup> )	<b>P</b> (g.Kg <sup>-1</sup> )	<b>Silt</b> (%)	<b>Zn</b> (mg.Kg <sup>-1</sup> )
<b>Degradada</b>	71,15 <sup>a</sup>	12,09 <sup>a</sup>	8,05 <sup>a</sup>	0,66 <sup>a</sup>	2909,12 <sup>a</sup>	0,25 <sup>a</sup>	0,03 <sup>a</sup>	15,80 <sup>a</sup>	5,16 <sup>a</sup>	1,43 <sup>a</sup>	0,55 <sup>a</sup>	9,69 <sup>a</sup>	0,86 <sup>a</sup>
<b>Referência</b>	70,58 <sup>a</sup>	14,87 <sup>a</sup>	5,28 <sup>a</sup>	0,00 <sup>a</sup>	849,58 <sup>a</sup>	0,90 <sup>b</sup>	0,30 <sup>b</sup>	2,87 <sup>a</sup>	4,64 <sup>a</sup>	1,47 <sup>a</sup>	0,68 <sup>a</sup>	8,25 <sup>a</sup>	0,00 <sup>a</sup>

**Tabela 2.** Lista de espécies de fungos micorrízicos em áreas ecossistema de referência (ER) e degradadas (AD) de campos rústicos, Serra do Cipó, Minas Gerais, nas estações chuvosa (C) e seca (S).

Família	ER		AD	
	C	S	C	S
<b>Acaulosporaceae</b>				
<i>Acaulospora appendicula</i>		X	X	X
<i>Acaulospora delicata</i>	X	X		X
<i>Acaulospora foveata</i>	X		X	X
<i>Acaulospora koskei</i>		X	X	
<i>Acaulospora lacunosa</i>			X	X
<i>Acaulospora leavis</i>			X	X
<i>Acaulospora mellea</i>	X	X	X	
<i>Acaulospora rehmi</i>	X	X	X	X
<i>Acaulospora scrobiculata</i>	X	X		X
<i>Acaulospora</i> sp.1	X	X	X	X
<i>Acaulospora</i> sp.2			X	X
<i>Acaulospora</i> sp.3	X	X	X	
<b>Ambisporaceae</b>				
<i>Ambispora</i> sp.1	X		X	X
<i>Ambispora</i> sp.2	X	X		
<b>Dentiscutataceae</b>				
<i>Dentiscutata biornata</i>	X	X	X	X
<i>Dentiscutata heterogama</i>	X	X		
<b>Diversisporaceae</b>				
<i>Diversispora aff. postulata</i>	X	X	X	X
<b>Entrophosporaceae</b>				
<i>Claroideogloium claroideum</i>				
<i>Claroideogloium</i> sp.	X			
<b>Glomeraceae</b>				
<i>Funneliformis geosporum</i>	X	X	X	X

<i>Funneliformis</i> sp.	X	X		X
<i>Glomus</i> aff. <i>fasciculatus</i>	X			
<i>Glomus</i> aff. <i>heterosporum</i>	X			
<i>Glomus clarus</i>	X	X	X	X
<i>Glomus diaphanus</i>	X	X		
<i>Glomus etunicatum</i>	X	X	X	X
<i>Glomus glomerulatum</i>	X	X	X	X
<i>Glomus macrocarpum</i>	X	X	X	X
<i>Glomus microcarpum</i>	X	X	X	X
<i>Glomus tortuosum</i>	X		X	X
<i>Glomus</i> sp.1	X	X		X
<i>Glomus</i> sp.2		X	X	
<i>Glomus</i> sp.3			X	X
<i>Glomus</i> sp.4	X	X		
<i>Glomus</i> sp.5	X		X	
<i>Glomus</i> sp.6	X		X	
<b>Gigasporaceae</b>				
<i>Gigaspora margarita</i>			X	X
<i>Gigaspora</i> sp.1	X	X		X
<i>Gigaspora</i> sp.2			X	X
<b>Intraornatosporaceae</b>				
<i>Intraornatospora intraornata</i>			X	X
<b>Pacisporaceae</b>				
<i>Pacispora robigina</i>	X			
<b>Racocetraceae</b>				
<i>Racocetra fulgida</i>			X	X
<b>Scutellosporaceae</b>				
<i>Scutellospora dispurpurencens</i>	X	X		
<i>Scutellospora</i> sp.	X	X		X
Total	33	27	27	28

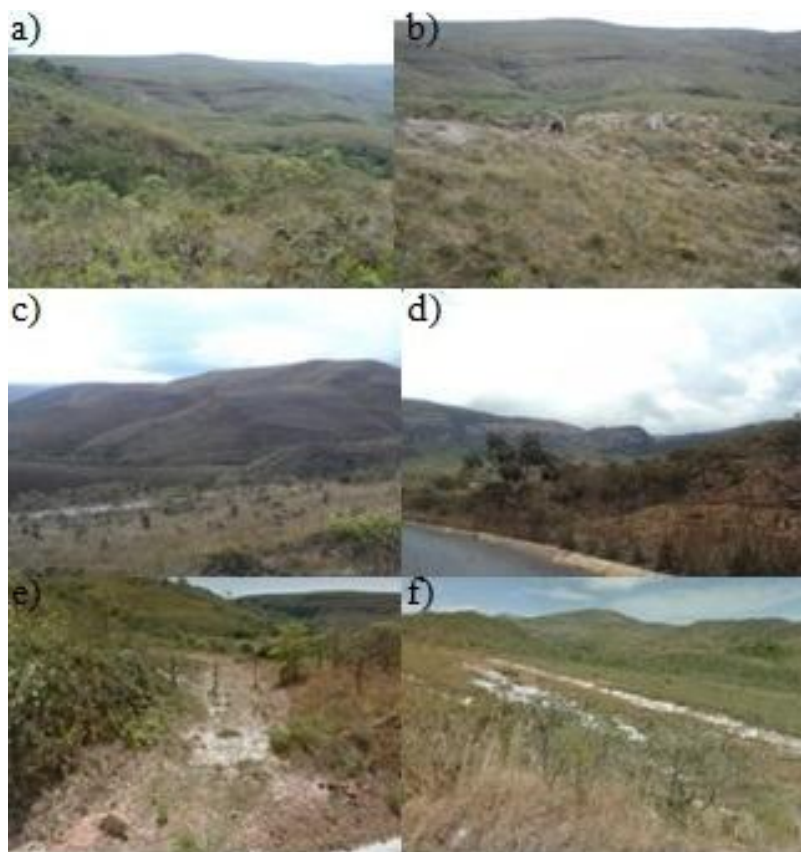
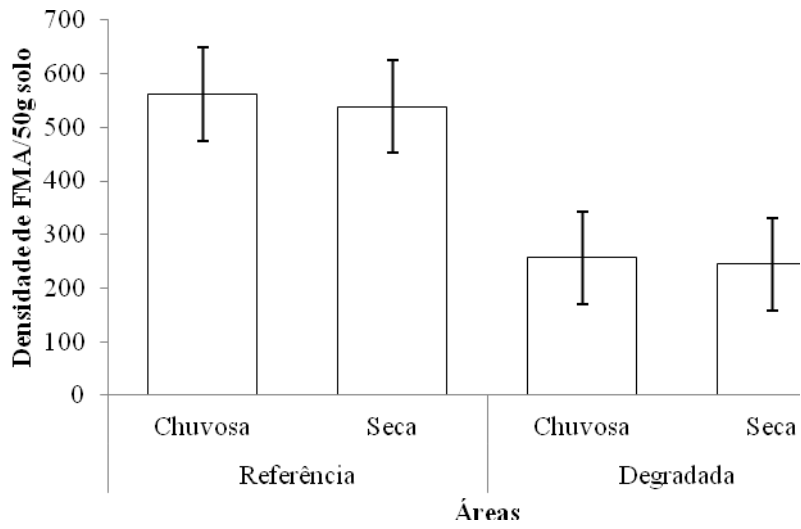


Figura 1. Aspecto geral das áreas de campos rupestres. a) ecossistema de referência de campo rupestre, b) área degradada de campo rupestre, c, d) áreas degradadas de campos rupestres próximas a estrada asfaltada MG-010, e, f) estradas construídas e abandonadas nas áreas de campos rupestres na Serra do Cipó, Minas Gerais.

a)



b)

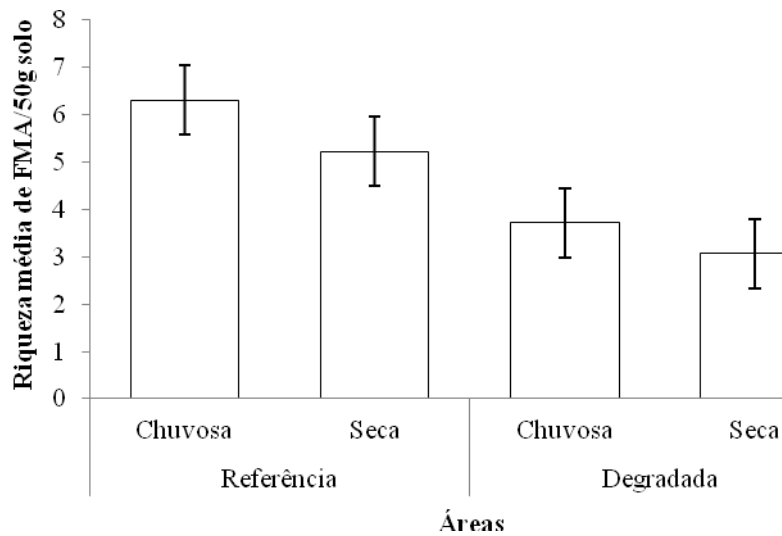


Figura 2. a) densidade de glomerosporos em 50g de solo nas áreas degradadas e nativas b) riqueza de fungos micorrízicos arbusculares em áreas degradadas e nativas de campos rupestres na Serra do Cipó/MG.

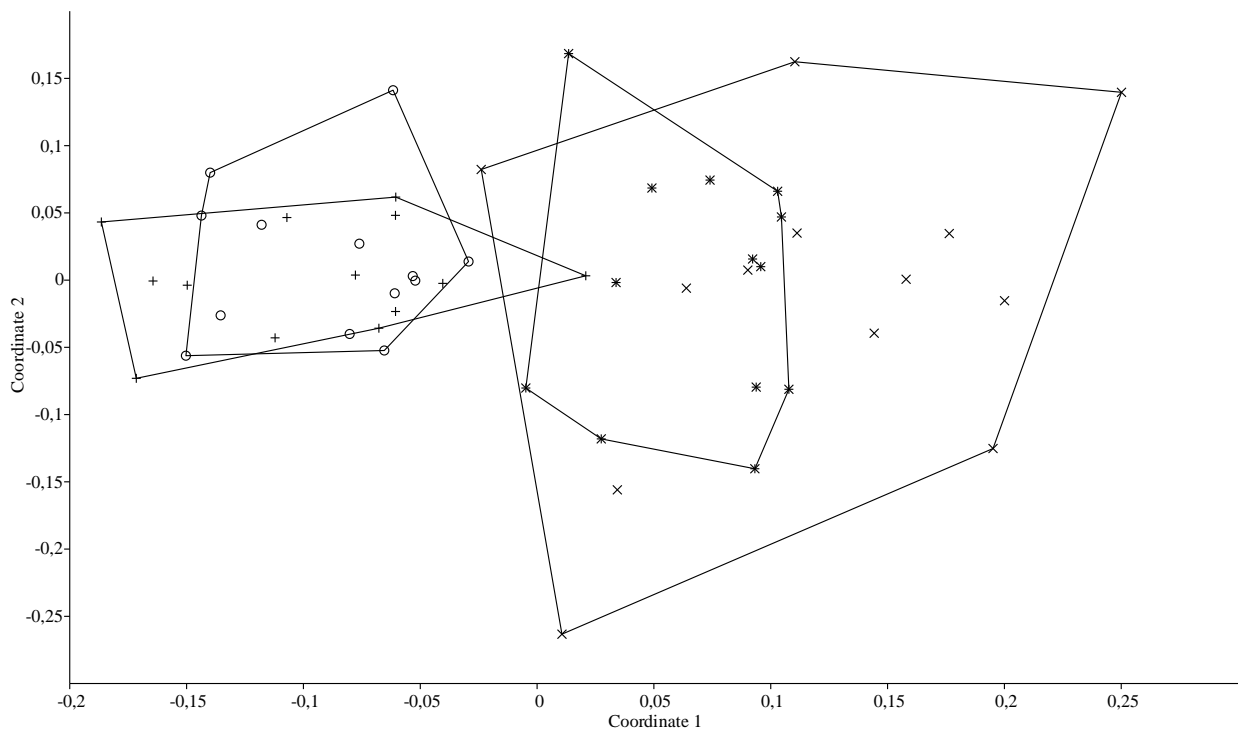


Figura 3. Projeção dos escores da composição de espécies no escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS) para ecossistemas de referência e áreas degradadas nas estações seca e chuvosa nos campos rupestres da Serra do Cipó, Minas Gerais. (x - estação seca na área degradada, \* - estação chuvosa na área degradada, + - estação seca no ecossistema de referência, o - estação chuvosa no ecossistema de referência).

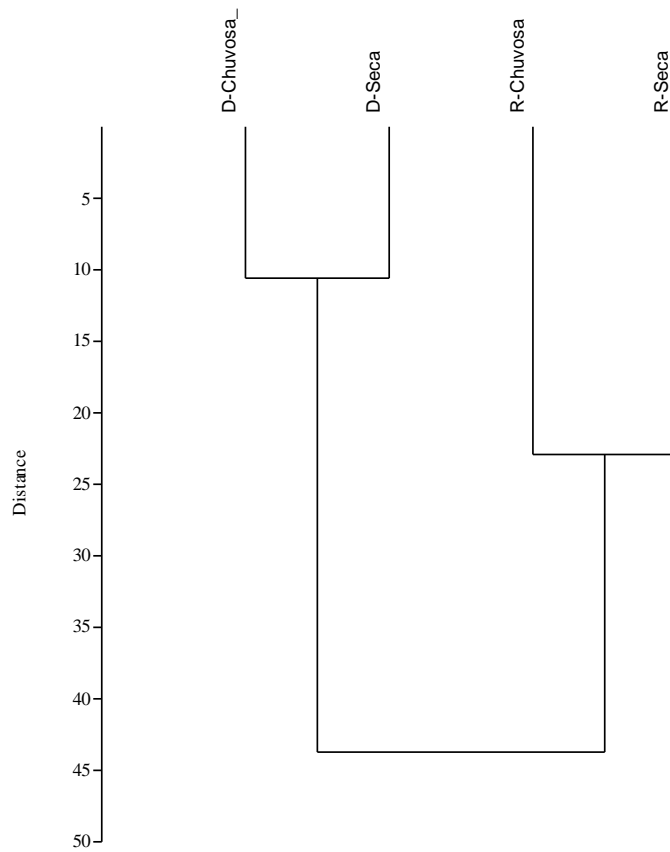


Figura 4. Dendrograma de similaridade de fungos micorrízicos arbusculares entre as estações das áreas nativas e degradadas de campos rupestres da Serra do Cipó, Minas Gerais. D-Seca (estação seca na área degradada), D-Chuvosa (estação chuvosa na área degradada), R-Seca (estação seca no ecossistema de referência), R-Chuvosa (estação chuvosa no ecossistema de referência).

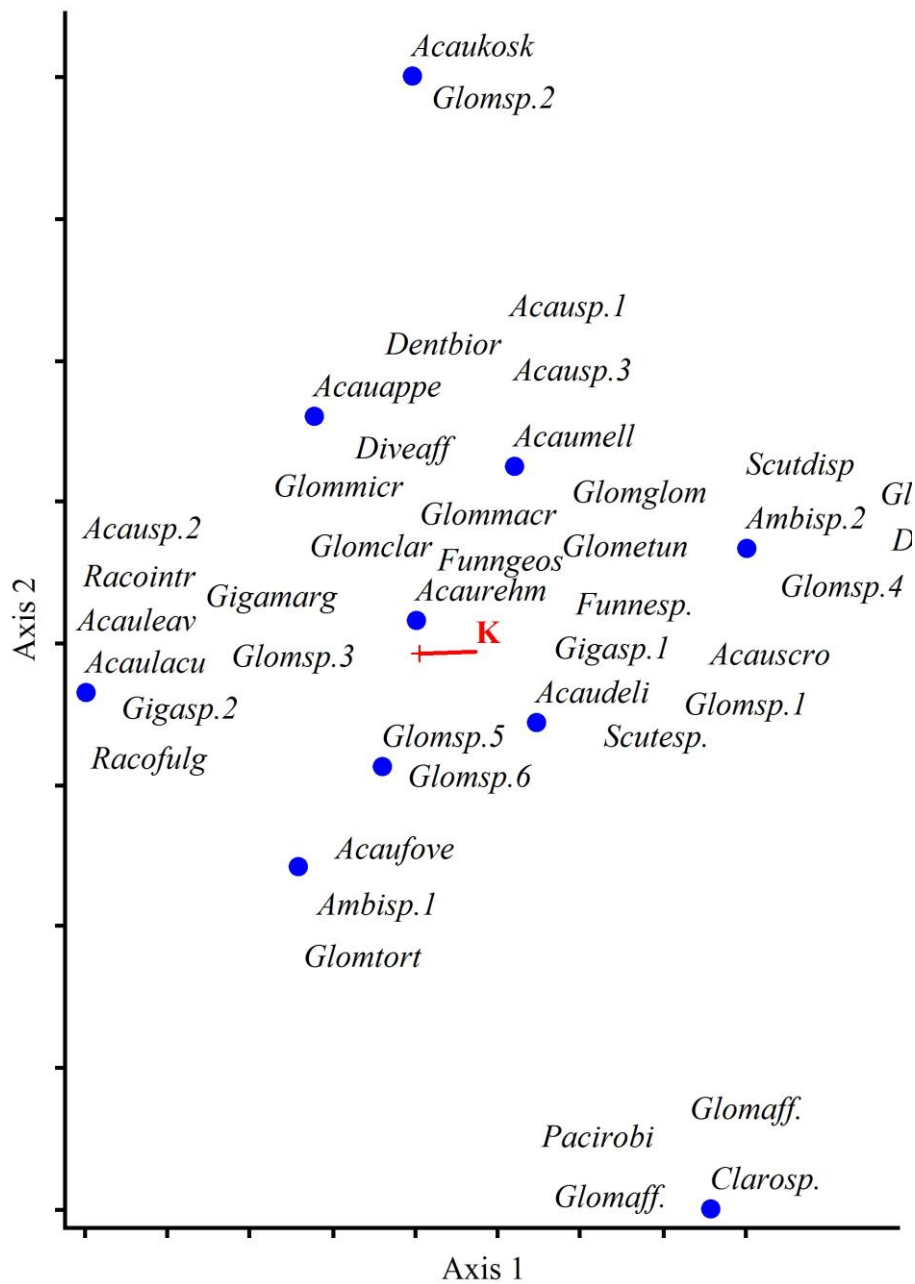


Figura 5. Diagrama de ordenação (CCA) das espécies de fungos micorrízicos arbusculares em relação à variável potássio (K) do solo de áreas do ecossistema de referência e degradadas de campos rupestres na Serra do Cipó, Minas Gerais.

## CAPÍTULO II

### **OCORRÊNCIA DE MICORRIZAS EM MUDAS DE ESPÉCIES DO CAMPO RUPESTRE UTILIZADAS EM RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS**

ETIENE SILVA COUTINHO<sup>1</sup>, G. WILSON FERNANDES<sup>2</sup>

#### **MICORRIZAS EM MUDAS DE CAMPO RUPESTRE**

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre,  
Departamento de Biologia Geral, C. Postal 486, 30161-970 Belo Horizonte, MG, Brasil

<sup>2</sup> Department of Biology, Organization Stanford University, Address Stanford, CA, 94395,  
USA

<sup>2</sup> Autor para correspondência: [gw.fernandes@gmail.com](mailto:gw.fernandes@gmail.com)

*Formatado segundo as normas da Applications in Plant Sciences*

**Resumo:** Fungos micorrízicos arbusculares (FMA) podem otimizar o crescimento de mudas vegetais e a obtenção de nutrientes em condições ambientais adversas. Por outro lado, a capacidade de se associar a estes fungos varia de planta para planta, com efeitos recíprocos tanto na comunidade vegetal como na dos FMA no solo. O presente estudo teve como objetivo avaliar a comunidade de FMA em solos na rizosfera de diferentes espécies nativas produzidas em viveiro para restauração de campos rupestres. Nove espécies de plantas nativas de campo rupestre foram selecionadas com base na sua importância em estudos de restauração ambiental. Foram avaliadas a riqueza, a densidade e a composição de FMA na rizosfera de cada indivíduo vegetal, assim como a altura e o diâmetro acima do solo (DAS). A riqueza, a densidade e a composição de FMA na rizosfera variaram entre as espécies vegetais, corroborando a ideia de que embora os fungos micorrízicos possam ser generalistas, há grande variação entre as espécies de plantas associadas. A riqueza e a densidade de FMA não tiveram correlação com a altura e DAS das plantas. A altura e o DAS das plantas, por outro lado, influenciaram na composição da comunidade de FMA. O conhecimento da diversidade de FMA na rizosfera de cada espécie vegetal em solos de campos rupestres pode ser aplicado para acelerar o processo de recuperação de áreas degradadas, uma vez que podem garantir o sucesso de estabelecimento das mudas em solos com baixo teor nutricional.

**Palavras chave:** mutualismo fungo-planta, campo rupestre, Cerrado, restauração ambiental, fungos micorrízicos arbusculares

**Abstract:** Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) can be optimized to seedlings of obtaining nutrients in adverse environmental conditions. However, the ability to associate these fungi varies from plant to plant, with reciprocal effects on both plant and community of AMF in the soil. This study aimed to evaluate the community of AMF in soils in the rhizosphere of different native plant nursery for restoration rupestrian grassland. Nine species rupestrian grassland native species were selected based on their importance in environmental restoration studies. We evaluated the richness, density and composition of AMF in the rhizosphere of each individual plant, as well as the height and diameter at ground-level of the plants (DGL). The richness, density and composition of AMF in the rhizosphere varied among species, corroborating the idea that although mycorrhizal fungi can be general, there is great variation among species associated plants. The richness and density of AMF were not correlated with the height and DGL of the plants. The height and DGL, however, influence the AMF community composition. Understand of the diversity of AMF in the rhizosphere of each plant species in rupestrian grassland soils can be applied to accelerate the recovery of degraded areas, as it can ensure the successful establishment of seedlings in soils with low nutritional value.

**Keywords:** mutualistic plant-fungus, rupestrian grasslands, Cerrado, environmental restoration, arbuscular mycorrhizal fungi

## INTRODUÇÃO

As plantas, quando associadas aos fungos micorrízicos arbusculares (FMA), permitem sua pronta utilização na restauração de áreas degradadas. Plantas com micorrizas apresentam maiores chances de adaptação às condições edáficas adversas, pois a inoculação de FMA nas raízes amplia a captação de recursos pela planta, principalmente em áreas com poucos nutrientes disponíveis (e.g., Carneiro et al., 1998; Colodete et al.; 2014). Já os FMA se beneficiam da associação, obtendo carboidratos da planta hospedeira (Raven et al., 1996; Berbara et al., 2006). Assim, as mudas associadas com FMA podem otimizar sua obtenção de nutrientes, principalmente fósforo (Smith and Read, 1997).

As espécies vegetais tem um grau de dependência micorrízica para sua sobrevivência (Souza et al., 2000), uma característica intrínseca às plantas, principalmente em ambientes com pouca disponibilidade nutricional. As plantas tem preferência por certas espécies de FMA e influenciam a multiplicação destes micro-organismos, refletindo diferenças na diversidade de FMA (Bever, 2002; Barea et al., 2011). Ao mesmo tempo, diferentes espécies de FMA podem se associar com maior número de espécies de plantas, o que proporciona esporulações diferenciadas, dependendo da espécie de planta colonizada e, dessa forma, contribuem para o aumento da riqueza da comunidade de FMA (Brundrett, 1991; Carrenho et al., 2001). Além disso, o efeito dos FMA no crescimento e na estrutura das plantas é muito diverso (Johnson et al., 1997). A inoculação com fungos micorrízicos arbusculares, favorece o desenvolvimento da planta, aumentando o seu vigor e facilitando o seu estabelecimento no ambiente em relação às plantas não inoculadas (Carneiro et al., 2004; Russomano et al., 2008; Konrad et al., 2014; Goetten et al., 2016).

Embora complexo, vários êxitos tem sido obtidos na recuperação de áreas degradadas do campo rupestre através do plantio de espécies nativas cultivadas em viveiros e transplantadas para o campo (e.g., ; Le Stradic et al., 2014; Gomes et al., 2015; Fernandes et al., 2016b). Os campos rupestres apresentam baixa disponibilidade de nutrientes, principalmente o fósforo (Negreiros et al., 2011) e, mesmo sendo um ambiente estressado, as plantas de campos rupestres possuem reserva de carboidratos nas raízes (Joaquim et al., 2014) que podem influenciar na colonização dos FMA.

Os campos rupestres da Serra do Cipó representam uma fisionomia de grande importância por conter alta diversidade e espécies endêmicas (Giulietti and Pirani, 1988; Fernandes, 2016a). No entanto, os campos rupestres têm sido bastante impactados por vários

tipos de distúrbios antrópicos, dentre eles as queimadas, a mineração, a retirada de plantas ornamentais de interesse econômico, a construção de estradas, as invasões biológicas (Fernandes et al., 2014, 2016b). Para piorar a situação, a recuperação natural dos campos rupestres é difícil e lenta, pois é um ambiente extremamente frágil e de baixa capacidade regenerativa (Negreiros et al., 2011).

O presente estudo teve como objetivo avaliar a composição, riqueza e densidade de glomerosporos de fungos micorrízicos arbusculares em solos sob diferentes espécies nativas produzidas em viveiro utilizadas em restauração de campos rupestres para contribuir com o desenvolvimento de tecnologia e know-how na restauração ambiental. Especificamente, descrevemos como as espécies de FMA variam entre as espécies vegetais e correlacionamos a diversidade de FMA registrada com a altura e o diâmetro à altura do solo das espécies vegetais. Nossas hipóteses foram que a riqueza, a densidade de glomerosporos e a composição de FMA variam entre as espécies vegetais. Por outro lado, postulamos também a existência de associações preferenciais entre as espécies de FMA e da planta. Há correlação entre a riqueza, densidade de glomerosporos e composição de FMA com a altura e o diâmetro à altura do solo (DAS) das espécies vegetais, uma vez que a nossa hipótese é de que a altura e o DAS variam entre as espécies vegetais e, sendo que espécies de maior porte apresentam maior número de espécies e densidade de FMA.

## MATERIAIS E MÉTODOS

As mudas das espécies de plantas estudadas foram obtidas no viveiro da Reserva Natural Particular Vellozia, com latitude 19°16' -45.7"S e longitude de 43°35'27.8"W, Serra do Cipó, Minas Gerais, Brasil. O clima desta região é tropical de altitude com estação bem definidos de seca, que se estende de maio a agosto, e uma estação chuvosa, de setembro a abril, com temperatura média anual e precipitação de 21,2°C e 1622 mm, respectivamente (Madeira and Fernandes, 1999; Fernandes, 2016c).

Para identificar os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) associados às espécies vegetais estudadas, foram selecionadas 10 indivíduos (mudas) de nove espécies vegetais no viveiro. As espécies foram selecionadas com base em seu sucesso na revegetação do campo rupestre (veja Gomes et al., 2015; Fernandes et al., 2016b): *Baccharis platypoda* DC. (Asteraceae), *Collaea cipoensis* Fortunato (Fabaceae), *Dalbergia miscolobium* Benth (Fabaceae), *Dasyphyllum reticulatum* (DC.) Cabrera (Asteraceae), *Eremanthus erythropappus*

(DC.) MacLeish (Asteraceae), *Guazuma ulmifolia* Lam. (Sterculiaceae), *Handroanthus ochraceus* (Chan) (Bignoniaceae), *Mimosa* sp. (Fabaceae) e *Tibouchina heteromalla* (D. Don) Cogn. (Melastomataceae). Todas as mudas foram produzidas a partir de sementes coletadas aleatoriamente de pelo menos 10 indivíduos adultos em área de campos rupestres, próximo ao viveiro. As sementes foram secas à temperatura ambiente, plantadas em sacos de mudas e regadas diariamente. O substrato utilizado foi o solo de campos rupestres (veja Negreiros et al., 2011). As mudas foram avaliadas após 90 dias de plantio.

Para o estudo da riqueza, densidade e composição de FMA, as amostras de solo rizosférico das mudas foram acondicionadas e analisadas no Laboratório de Ecologia Evolutiva e Biodiversidade na Universidade Federal de Minas Gerais. A avaliação da riqueza, densidade e composição de FMA foi realizada em amostras de 50g de solo de cada indivíduo (muda) por espécie vegetal, onde os glomerosporos foram extraídos por peneiramento úmido (Gerdemann and Nicolson, 1963) em peneiras de 0,500 e 0,037 mm (para mais detalhes veja Anexo 1). Amostras de solo foram centrifugadas primeiramente em água a 3000 rpm por 3 minutos e em seguida em sacarose a 2000 rpm, durante 2 minutos. Os glomerosporos foram contados e separados pela morfologia semelhante com auxílio de um microscópio estereoscópico (x40), sendo em seguida colocados em lâminas com álcool polivinil em lactoglicerol (PVLG) e com PVLG + reagente de Melzer (1:1 v:v). A identificação das espécies de fungos foi realizada segundo descrição morfológica (veja Schenck and Pérez 1988) e na página da International Culture Collection of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (INVAM <http://invam.caf.wvu.edu>) e Leibniz-Rechenzentrum (LRZ).

Para avaliar se há diferença na altura e no diâmetro à altura do solo (DAS) entre as espécies vegetais, foram analisados a altura e o DAS de cada planta. Para a altura das plantas, a mensuração foi feita desde o solo até o ápice da haste principal utilizando uma régua milimetrada (cm). Para mensuração do DAS foi utilizado um paquímetro digital (mm).

Para verificar se há diferença na riqueza e na densidade de glomerosporos de FMA entre as mudas das nove espécies vegetais, foi utilizado o número de espécies e de glomerosporos de FMA nos 50g de solo. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) das características avaliadas, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro através de um modelo linear generalizado (GLM) no programa R (R Development Core Team, 2010).

Para verificar se existe correlação entre altura e DAS da planta com a riqueza e a densidade de glomerosporos de FMA, foi realizado teste através de um modelo linear generalizado (GLM) no programa R (R Development Core Team 2010). Para testar se a composição de espécies de FMA varia entre as espécies vegetais foram utilizadas análises multivariadas. A variável resposta foi a riqueza e a densidade de FMA e as variáveis explicativas foram a altura e o DAS das plantas.

Para verificar possíveis similaridades na composição de espécies de FMA entre as espécies vegetais, foi aplicado o teste ANOSIM (Análise de similaridade). Os valores obtidos foram colocados na matriz de similaridade, para posterior aplicação de Análise de Cluster, com agrupamento em pares, utilizando o índice de Sørensen. Para avaliar a altura e DAS das plantas sobre a variação na composição de espécies de FMA foi acessado por análise de correspondência canônica (CCA). A significância foi acessada pelo teste de permutação de "Monte Carlo", utilizando-se o Programa PC-Ord for Windows versão 5.0 (McCune and Mefford, 1997). A matriz resposta foi a matriz de espécies de FMA e a matriz explicativa foi formada pela altura e DAS das plantas.

## RESULTADOS

A altura das plantas e o diâmetro à altura do solo (DAS) foram distintos entre as espécies vegetais ( $F = 0,2558$ ,  $df = 89$ ,  $P < 0,0001$ ;  $F = 165,9496$ ,  $df = 89$ ,  $P < 0,0001$ , respectivamente), apesar de terem a mesma idade (90 dias) (Tabela 1). A altura das plantas e o DAS mostraram-se correlacionados positivamente ( $r = 0,53$ ,  $df = 88$ ,  $P < 0,0001$ ). Os valores médios da altura das plantas e o DAS foram maiores na espécie *Tibouchina heteromalla* (39,83cm e 1,05cm, respectivamente) e menores na espécie *Dalbergia miscolobium* (23,11cm e 0,62cm, respectivamente) (Tabela 1).

Foram registrados 4958 glomerosporos no total, com média de 55,08 glomerosporos/50g. Houve diferença significativa na densidade de glomerosporos entre as mudas ( $F = 0,0023$ ,  $df = 89$ ,  $P < 0,0001$ ; Fig. 1a), suportando a hipótese que a densidade de FMA varia entre as espécies vegetais. A maior média de glomerosporos que foi encontrada na espécie *Eremanthus erythropappus* (95,3 glomerosporos/50g) enquanto a menor média de glomerosporos foi encontrada na espécie *Dalbergia miscolobium* (24,2 glomerosporos/50g) (Tabela 1). A densidade de glomerosporos não apresentou correlação com a altura ( $r = 0,02$ ,  $df = 88$ ,  $P = 0,8204$ ) e com DAS das espécies vegetais ( $r = 0,04$ ,  $df = 88$ ,  $P = 0,6745$ ).

Ao todo foram registradas 53 espécies de FMA nos solos da rizosfera das plantas (Tabela 2). Houve diferença significativa na riqueza de FMA ( $F = 1,2227$ ,  $df = 89$ ,  $P < 0,0001$ , Fig.1b) entre as espécies vegetais, corroborando com a hipótese de que o número de espécies varia entre as plantas. A maior média de espécies de FMA foi encontrada na espécie *Mimosa* sp. (5,7 espécies de FMA/50g) enquanto a menor média de espécies de FMA foi encontrada na espécie *Guazuma ulmifolia* (1,3 espécies de FMA/50g) (Tabela 1). A riqueza de FMA não apresentou correlação com altura ( $r = -0,12$ ,  $df = 88$ ,  $P = 0,2537$ ) e nem com o DAS ( $r = -0,08$ ,  $df = 88$ ,  $P = 0,4471$ ) das espécies vegetais.

Entre as todas as espécies de FMA encontradas, somente a espécie *Glomus macrocarpum* foi comum entre as mudas das espécies vegetais estudadas. Apesar de *Glomus macrocarpum* também ser a espécie de FMA mais abundante (440 glomerosporos) nas espécies vegetais *Guazuma ulmifolia* (14 glomerosporos), *Handroanthus ochraceus* (39 glomerosporos), *Baccharis platypoda* (41 glomerosporos), *Dalbergia miscolobium* (52 glomerosporos), *Tibouchina heteromalla* (65 glomerosporos) e *Eremanthus erythropappus* (101 glomerosporos), já nas espécies *Collaea cipoensis*, *Dasyphyllum reticulatum* e *Mimosa* sp. as espécies de FMA mais abundantes foram *Acaulospora morrowiae* (19 glomerosporos), *Glomus diaphanum* (20 glomerosporos) e *Glomus microcarpum* (188 glomerosporos), respectivamente.

Nas mudas das espécies vegetais estudadas foram encontradas 23 espécies de FMA exclusivas distribuídas em oito espécies vegetais, sendo que quatro espécies de FMA ocorreram em *Collaea cipoensis* e *Mimosa* sp., três espécies de FMA ocorreram em *Baccharis platypoda*, *Dalbergia miscolobium*, *Dasyphyllum reticulatum* e *Tibouchina heteromalla*, duas espécies de FMA ocorreram em *Eremanthus erythropappus* e *Handroanthus ochraceus*.

Houve diferença na composição de espécies de FMA entre as mudas das espécies vegetais ( $P < 0,05$ ). Apesar dessa diferença, houve uma similaridade na composição de espécies entre algumas espécies vegetais (Fig. 2). Observou-se a formação de agrupamento das espécies vegetais em dois níveis (Fig. 3). No primeiro nível encontram-se as espécies *Baccharis platypoda*, *Collaea cipoensis* e *Dasyphyllum reticulatum*, apresentando semelhança de 93,4%. No segundo nível, encontram-se as espécies *Dalbergia miscolobium*, *Eremanthus erythropappus*, *Guazuma ulmifolia*, *Handroanthus ochraceus*, *Mimosa* sp. e *Tibouchina heteromalla*. De uma forma geral, todas as espécies vegetais apresentaram

ligações inferiores a 86,1%, o que permite dizer que a diferença entre elas é de, no mínimo, 13,9% na composição de espécies de FMA. A análise mostrou que as espécies *Dalbergia miscolobium* e *Tibouchina heteromalla* são mais similares quanto à composição de FMA, ao nível de 94,4%, ao passo que a espécie *Mimosa* sp. é a mais dissimilar.

A composição de espécies de FMA foi significativamente correlacionada com a altura e DAS das plantas ( $p < 0,05$ ). Os autovalores (*eigenvalues*) dos dois primeiros Eixos do diagrama da CCA foram 0,204 (eixo1) e 0,172 (eixo 2) (Fig. 4). As correlações internas entre as variáveis das plantas e os dois primeiros eixos de ordenação mostraram que a variável altura das plantas correlacionou positivamente ao eixo 1 (0,553) e negativamente ao eixo 2 (-0,043), enquanto que o DAS das plantas correlacionou negativamente ao eixo 1 (-0,284) e positivamente ao eixo 2 (0,439). As espécies de FMA *Glomus tortuosum*, *Acaulospora* sp., *Intraortospora intraornata* e *Glomus spinuliferum* apresentaram alta correlação com o aumento do DAS enquanto as espécies *Glomus trufemii*, *Acaulospora mellea*, *Claroideoglomus* sp. e *Acaulospora delicata* apresentaram correlação negativa com o aumento do DAS. Já as espécies de FMA *Glomus macrocarpum*, *Glomus microcarpum*, *Orbispora* sp., *Gigaspora* sp. apresentaram alta correlação com o aumento do altura da planta e as espécies *Glomus glomerulatum*, *Glomus* sp.1, *Funneliformis mosseae* e *Ambispora* sp. apresentaram correlação negativa com o aumento da altura das mudas das nove espécies de plantas (Fig. 4).

## DISCUSSÃO

A altura e o diâmetro à altura do solo (DAS) das plantas diferiram significativamente entre as espécies vegetais, apesar de terem a mesma idade (90 dias), indicando comportamento diferente ao crescimento. Gomes et al. (2015) avaliaram o crescimento de oito espécies nativas de campo rupestre em áreas degradadas, das quais quatro são as mesma estudadas neste trabalho: *Collaea cipoensis*, *Dalbergia miscolobium*, *Handroanthus ochraceus* e *Tibouchina heteromalla*. De acordo com Gomes et al. (2015), estas espécies apresentaram capacidade de se estabelecerem em campos rupestres e que mudas de menor tamanho inicial, avaliadas com 180 dias de idade, apresentaram um maior crescimento ao longo do período de restauração de campos rupestres, avaliadas com 18 meses de idade. O interessante é que em 180 dias, *Dalbergia miscolobium*, *Handroanthus ochraceus* e *Tibouchina heteromalla* estudadas por Gomes et al. (2015), apresentaram menor altura que

a altura avaliada em neste trabalho em 90 dias. Isto se deve provavelmente ao substrato utilizado, uma vez que Gomes et al. (2015) utilizaram substrato composto por terra de subsolo, turfeira e um composto orgânico, já neste trabalho utilizamos solo de campos rupestres.

A diferença de glomerosporos de FMA entre as espécies vegetais se deve a variação de esporulação dos FMA que pode variar com a planta (Brundrett, 1991; Douds Júnior, 1994). De acordo com Gomide et al. (2009), as espécies vegetais podem afetar a multiplicação dos FMA. No entanto, neste trabalho foi observada baixa densidade de glomerosporos em relação a outras espécies vegetais. Carrenho et al. (2001) encontraram uma média de 134,66 glomerosporos/50g de solo por espécie. É possível que a diferença da densidade de glomerosporos esteja relacionada com a idade e as características da planta, solo e a fitofisionomia, uma vez que Carrenho et al. (2001) avaliaram a densidade de glomerosporos em espécies em estágio inicial, intermediário e climax de mata ciliar, enquanto que neste trabalho as mudas estavam com três meses de idade em solo de campos rupestres.

Apesar da riqueza de FMA no solo dos campos rupestres geralmente é alta, estudos sobre FMA em campos rupestres são poucos (Carvalho et al., 2012; Coutinho et al., 2015; Oki et al., 2016), principalmente em solo na rizosfera de espécies vegetais de campos rupestres (Borba and Amorim, 2007; Pagano and Scotti, 2009). Borba and Amorim (2007), avaliaram pela primeira a ocorrência de FMA em solo na rizosfera de espécies vegetais de campos rupestres, porém limitaram-se a duas espécies de plantas: *Syngonanthus curralensis* e *Syngonanthus mucugensis*, encontrando apenas três e seis espécies de FMA, respectivamente. Pagano and Scotti (2009), também avaliaram a ocorrência e diversidade de FMA em solo na rizosfera de espécies vegetais em campos rupestres ferruginosos: *Paepalanthus bromelioides* e *Bulbostylis* sp., encontrando apenas três espécies de FMA em cada: *Acaulospora* sp., *Glomus* sp. e *Scutellospora biornata*. No entanto, neste trabalho foi encontrada de cinco até 20 espécies de FMA por espécie vegetal.

As espécies vegetais apresentaram espécies exclusivas de FMA. As espécies exclusivas de FMA em *Baccharis platypoda* (*Acaulospora* sp. 2), em *Handroanthus ochracea* (*Glomus spinuliferum* e *Intraortospora intraornata*), e em *Tibouchina heteromalla* (*Paraglomus brasilianum*) ainda não tinham sido reportadas em áreas de campos rupestres, porém já foram encontradas em outras formações vegetais como Floresta Semidecidual (Santos and Carrenho, 2011; Silva et al., 2014) e Cerrado (Spain and Miranda, 1996). As

espécies de exclusivas de FMA *Acaulospora morrowiae* e *A. rugosa* (*B. platypoda*); *A. mellea* e *Funneliformis mosseae* (*Collaea cipoensis*); *A. denticulata* (*Dalbergia miscolobium*); *A. fulveata* e *Glomus diaphanum* (*Dasyphyllum reticulatum*); *Claroideoglomus claroideum* (*Eremanthus erythropappus*), *A. delicata* (*Mimosa* sp.); e *A. birreticulata* (*T. heteromalla*), já foram registradas em solos de campos rupestres, na Serra do Cipó (Carvalho et al., 2012, Coutinho et al., 2015). Já as espécies *Acaulospora* sp.2, *Claroideoglomus* sp., *Dentiscutata* sp., *Diversispora* sp., *Glomus* sp.1, *Glomus* sp.2, *Glomus* sp.3, *Glomus* sp.4, *Glomus* sp.5, provavelmente são espécies novas. Além de algumas espécies de FMA exclusivas não terem sido ainda registradas em campos rupestres, ocorreram ainda novos registros de espécies para este ecossistema: *Acaulospora* aff. *herreriae*, *Glomus tortuosum*, *Glomus truffemii* e *Racocetra tropicana*. A espécie *Acaulospora herreriae* já foi relatada na Caatinga (Furrazola et al., 2013); *Glomus tortuosum* foi relatada na Caatinga (Souza et al., 2011), no Cerrado (Angelini et al., 2012) e em Floresta Estacional Semidecidual (Santos et al., 2013); *Glomus truffemii* foi encontrada em Mata Atlântica (Pereira et al., 2014); *Racocetra tropicana* foi relatada na Caatinga (Souza et al., 2011). Sendo assim, este estudo aumenta o número de espécies em campos rupestres.

Espécies vegetais que possuem um sistema radicular profundo e com grande quantidade de raízes finas possibilitam que sejam rapidamente colonizadas por FMA (Borba and Amorim, 2007). Ao mesmo tempo, influenciam a reprodução de FMA e a comunidade desses micro-organismos, já que estimulam a dominância de espécies de FMA mais generalistas como o caso de *Glomus macrocarpum* (Borba and Amorim, 2007). Assim, espécies vegetais com estas características suportam maior número de espécies e densidade de FMA como o caso da *Mimosa* sp. que apresentou maior riqueza de FMA. Souza et al. (2016), encontraram 18 espécies de FMA em *Mimosa tenuiflora*, que ocorre na Caatinga. Tavares et al. (2012) verificaram que a espécie *Mimosa caesalpiniaefolia* Benth. sob estresse salino e sob baixa disponibilidade de nutrientes são altamente dependentes das micorrizas arbusculares (Burity et al., 2000). Nesta mesma espécie vegetal, Mendes et al. (2013), verificaram que mudas inoculadas com FMA apresentaram maior altura, DAS e taxa de N e P, e 100% de sobrevivência no campo.

Embora o efeito dos FMA no crescimento e na estrutura das plantas seja muito diverso (Johnson et al., 1997) e varie entre as espécies vegetais (Francis and Read, 1994), neste trabalho não encontramos correlação da densidade de glomerosporos e riqueza de FMA

com a altura e DAS das plantas. A importância do número de espécies e da densidade de glomerosporos pode estar relacionada, não com o tamanho da planta, mas com a absorção de nutrientes para garantir a sobrevivência das plantas em ambientes estressados (Berbara et al., 2006). O maior número de espécies e densidade de FMA em uma espécie vegetal pode levar ao melhor funcionamento da planta (Bever, 2002). Apesar dos FMA serem considerados generalistas, os efeitos da simbiose podem ser diferenciados conforme a interação de FMA, solo e planta (Dodd et al., 1990; Bagyaraj, 1991; Costa et al., 2001; Vandenkoornhuysen et al., 2002; Scheublin et al., 2004; Pouyú-Rojas et al., 2006).

A composição de espécies de FMA entre as plantas sofre pequenas variações entre as plantas, dessa forma, a composição de FMA está relacionada à espécie vegetal. Carrenho et al. (2001) avaliando amostras de solo rizosférico de *Croton urucurana*, *Inga striata* e *Genipa americana* em mata ciliar também observaram que sob cada planta foi estabelecida uma composição diferente de FMA. Silva et al. (2008) também observaram diferença na composição de FMA entre as espécies vegetais e, apesar de não haver especificidade entre FMA e planta, há indicativos de preferências pelas plantas (Carrenho et al., 2001; Martínez-García and Pugnaire, 2011). Isto é possível devido às características morfológicas e fisiológicas das plantas, assim como a compatibilidade genética entre fungo e planta (Smith, 1995) e variações das condições ambientais, como a disponibilidade de nutrientes e de água (van der Heijden et al., 1998; Mehrota, 2005).

Embora a riqueza e a densidade de FMA não esteja correlacionada com a altura e DAS das plantas, a composição de FMA mostrou-se correlacionada com estas variáveis. No entanto, a análise de agrupamento mostrou que o grau de similaridade das espécies de FMA entre as espécies vegetais parece ser estruturado em função de variáveis não avaliadas, evidenciada pela formação de grupos, já que as espécies vegetais mais similares quanto à composição de espécies de FMA não apresentam similaridade quanto à altura e DAS. A composição de FMA entre as espécies *Dalbergia miscolobium* e *Tibouchina heteromalla* são mais similares, possivelmente por serem espécies vegetais amplamente distribuídas no Cerrado (Lorenzi, 1992; Martins et al., 2009). A configuração encontrada também pode estar relacionada à presença de algumas espécies de FMA com maior representatividade nas plantas, como as espécies de FMA mais generalistas, *G. macrocarpum*, *G. microcarpum* e *G. glomerulatum*.

## **CONCLUSÃO**

O conhecimento sobre a diversidade de FMA na rizosfera de cada espécie vegetal em solos de campos rupestres pode ser aplicado para acelerar o processo de recuperação de áreas degradadas. Como cada espécie vegetal possui riqueza, densidade e composição de FMA diferenciada, a inoculação de FMA em espécies vegetais utilizadas em recuperação de áreas degradadas deve ser diferenciada, considerando principalmente as espécies de FMA exclusivas, uma vez que podem garantir o sucesso de estabelecimento das mudas em solos com baixo teor nutricional. Há indícios da existência de associações preferenciais entre as espécies de FMA e da planta. Não há correlação entre a riqueza, densidade de glomerosporos com a altura e o diâmetro à altura do solo (DAS) das espécies vegetais, mesmo estas variáveis diferindo entre as espécies vegetais, somente há correlação da composição de FMA. Além disso, é recomendável delinear novos experimentos e testar o papel dos FMA na performance das plantas no campo e sucesso da restauração, uma vez que há poucas informações sobre a relação FMA, solo e planta em campos rupestres.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a dois revisores anônimos pela leitura e críticas a este manuscrito e ao apoio no campo dos estagiários do Laboratório Evolutiva de Ecologia e Biodiversidade/UFMG. Agradecemos ainda ao suporte financeiro do Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq: 40655/2008-5, 55 8250/2009-2, 30 3352/2010-8, 56 1883/2010-6), Natural Reserve Vellozia, à Fapemig pela bolsa concedida a ES Coutinho e à PPG – ECMVS/UFMG.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGELINI, G. A. R., LOSS, A., PEREIRA, M. G., TORRES, J. L. R., AND SAGGIN JÚNIOR, O. J. 2012. Colonização micorrízica, densidade de esporos e diversidade de fungos micorrízicos arbusculares em solo de Cerrado sob plantio direto e convencional. *Ciências Agrárias* 33: 115-130.
- BAGYARAJ, D.J., Ecology of vesicular–arbuscular mycorrhizae. 1991. Handbook of applied micology: soil and plant. *In:* D. K. Arora, B. Rai, K. G. Mukerji and G. R. Knudsen [eds.]. New York. Marcel Dekker. vol.1. pp.4–34.
- BAREA, J. M. 2011. Investigaciones sobre micorrizas en España: pasado, presente y futuro. *In:* M. Megías, R. Rivilla, P. Mateos, M. León, M. J. Delgado, E. González, M. J. Soto, et al. [eds.]. Fundamentos aplicaciones agroambientales de las interacciones beneficiosas planta-microorganismo. Sefin. Inpress 14: 55-98.
- BERBARA, R. L. L., SOUSA, F. A., AND FONSECA, H. M. A. C. 2006. Fungos micorrízicos arbusculares: muito além da nutrição. *In:* M. S. Fernandes (ed.). Nutrição mineral de plantas, Viçosa, SBCS, pp. 53-88.
- BEVER, J. D. 2002. Negative feedback within a mutualism: host-specific growth of mycorrhizal fungi reduces plant benefit. *Proceedings of the Royal Society of London Series B- Biological Sciences* 269: 2595-2601.
- BORBA, M. F. , AND AMORIM, S. M. C. 2007. Fungos micorrízicos arbusculares em sempre-vivas: subsídio para cultivo e replantio em áreas degradadas. *Revista de Biologia e Ciências da Terra* 7: 20-27.
- BRUNDRETT, M. C. 1991. Mycorrhizas in natural ecosystems. *In:* A. MacFayden, M. Begon and A. H. Fitter [eds.]. Advances in Ecological Research. Academic Press, London. p. 171-133.
- BURITY, H. A., LYRA, M. C. C. P., SOUZA, E. S., MERGULHÃO, A. C. E. S., AND SILVA, M. L. R. B. 2000. Efetividade da inoculação com rizóbio e fungos micorrízicos arbusculares em mudas de sabiá submetidas a diferentes níveis de fósforo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 35: 801-807.
- CARNEIRO, M. A. C., SIQUEIRA, J. O., MOREIRA, F. M. S., CARVALHO, D., BOTELHO, S. A., AND JUNIOR, O. J. S. 1998. Micorriza arbusculares em espécies arbóreas e arbustivas nativas de ocorrência no Sudeste do Brasil. *CERNE* 4: 129-145.

- CARRENHO, R., TRUFEM, S. F. B., AND BONONI, V. L. R. 2001. Fungos micorrízicos arbusculares em rizosferas de três espécies de fitobiontes instaladas em áreas de mata ciliar revegetada. *Acta Botanica Brasilica* 15: 115-124.
- CARVALHO, F., SOUZA, F. A., CARRENHO, R., MOREIRA, F. M. S., JESUS, E. C., AND FERNANDES, G. W. 2012. The mosaic of habitats in the high-altitude Brazilian rupestrian fields is a hotspot for arbuscular mycorrhizal fungi. *Applied Soil Ecology* 52: 9-19.
- COLODETE C. M., DOBBSS L. B., AND RAMOS, A. C. 2014. Aplicação das Micorrizas arbusculares na recuperação de áreas impactadas. *Natureza on line* 12: 31-37.
- COSTA, C. M. C., MAIA, L. C., CAVALCANTE, U. M. T., AND NOGUEIRA, R. J. M. C. 2001. Influência de fungos micorrízicos arbusculares sobre o crescimento de dois genótipos de aceroleira (*Malpighia emarginata* D.C.). *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 36: 893-901.
- COUTINHO, E. S., FERNANDES, G. W., BERBARA, R. L. L., MAIA, H. M., AND GOTO, B. T. 2015. Variation of arbuscular mycorrhizal fungal communities along an altitudinal gradient in rupestrian grasslands in Brazil. *Mycorrhiza* 25: 627-638.
- DODD, J. C., ARIAS, I., KOOMEN, I., AND HAYMAN, D. S. 1990. The management of populations of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in acid-infertile soils of a savanna ecosystem. *Plant and Soil* 122:241-247.
- DOUDS JÚNIOR, D.D. 1994. Relationship between hyphal and arbuscular colonization and sporulation in mycorrhiza of *Paspalum notatum* Flugge. *New Phytologist* 126: 233-237.
- FERNANDES, G. W. 2016a. The megadiverse rupestrian grassland. In: G. W. Fernandes [ed]. Ecology and conservation of mountaintop grasslands in Brazil. Springer, New York, pp 3-14.
- FERNANDES, G. W., TOMA, T. S. P., ANGRISANO, P. A., AND OVERBECK, G. 2016b. Challenges in the restoration of quartzitic and ironstone rupestrian grassland. In: G. W. Fernandes [ed]. Ecology and Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil. Springer, New York, pp 449-474.
- FERNANDES, G. W. 2016c. Cerrado to rupestrian grasslands: patterns of species distribution and the forces shaping them along an altitudinal gradient. In: G. W. Fernandes [ed]. Ecology and Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil. Springer, New York, pp 345-377.

- FERNANDES, G. W., BARBOSA N. P. U., NEGREIROS, D., AND PAGLIA, A. P. 2014. Challenges for the conservation of vanishing megadiverse rupestrian grasslands. *Natureza & Conservação* 12:162–165.
- FRANCIS, R., AND READ, D. J. 1994. The contributions of mycorrhizal fungi to the determination of plant community structure. *Plant and Soil* 159:11-25.
- FURRAZOLA, E., GOTO, B. T., SILVA, G. A., TORRES-ARIAS, Y., MORAIS, T., LIMA, C. E. P., FERREIRA, A. C. A. et al. 2013. *Acaulospora herrerae*, a new pitted species in the Glomeromycetes from Cuba and Brazil. *Nova Hedwigia* 97: 401–413.
- GERDEMANN, J. W., AND NICOLSON, T. H. 1963. Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil by wet-sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society* 46: 235-244.
- GIULIETTI, A. M., MENEZES, N. L., PIRANI, J. R., MEGURO, M., AND WANDERLEY, M. G. L. 1987. Flora da Serra do Cipó, Minas Gerais: caracterização e lista de espécies. *Boletim de Botânica*. 9: 1-151.
- GIULIETTI, A. M., AND PIRANI, J. R. 1988. Patterns of geographic distribution of some plant species from the Espinhaco range, Minas Gerais and Bahia, Brazil. In: P. E. Vanzolini, and W. E. Heyer [eds]. Proceedings of a workshop on Neotropical Distribution Patterns. Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, p.39-69.
- GOETTEN, L. C., MORETTO, G., AND STÜRMER, S. L. 2016. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi inoculum produced on-farm and phosphorus on growth and nutrition of native woody plant species from Brazil. *Acta Botanica Brasilica* 30: 9-16.
- GOMES, V. M., NEGREIROS, D., CARVALHO, V., AND FERNANDES, G. W. 2015. Crescimento e desempenho de espécies nativas de campo rupestre em áreas degradadas quartzíticas. *Neotropical Biology and Conservation* 10:159-168.
- GOMIDE, P. H. O., SANTOS, J. G. D., SIQUEIRA, J. O., AND SOARES, C. R. F. 2009. Diversidade e função de fungos micorrízicos arbusculares em sucessão de espécies hospedeiras. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 44: 1483-1490.
- JOAQUIM, E. O., FIGUEIREDO-RIBEIRO, R. C. L., HAYASHI, A. H., AND CARVALHO M. A. M. 2014. Inulin contents and tissue distribution in underground storage organs of *Asteraceae* species from the Brazilian rocky fields. *Botany* 92: 827–836.
- JOHNSON, N. C., AND WEDIN, D. A. 1997. Soil carbon, nutrients, and mycorrhizae during conversion of dry tropical forest to grassland. *Ecological Applications* 7: 171-182.

- KONRAD, M. L. F., FURLANI, P. R., CASSIOLATO, A. M. R., AND SILVEIRA, A. P. D. 2014. Resposta do cafeeiro à inoculação de fungos micorrízicos arbusculares, em latossolo vermelho de Cerrado. *Bioscience Journal* 30: 933-941.
- LE STRADIC, S., BUISSON, E., NEGREIROS, D., CAMPAGNE, P., AND FERNANDES, G. W. 2014. The role of native woody species in the restoration of campos rupestres in quarries. *Applied Vegetation Science* 17: 109-120.
- LORENZI, H. 1992. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Nova Odessa, Plantarum, 352 p.
- MADEIRA, A. J., AND FERNANDES, W. G. 1999. Reproductive phenology of sympatric taxa of *Chamaecrista* (Leguminosae) in Serra do Cipó, Brasil. *Journal of Tropical Ecology* 15: 463-479.
- MARTINEZ-GARCIA, L. B., AND PUGNAIRE, F. I. 2011. Arbuscular mycorrhizal fungi host preference and site effects in two plant species in a semiarid environment. *Applied Soil Ecology* 48: 313-317.
- MARTINS, A. B., GOLDENBERG, R., AND SEMIR, J. 2009. Flora de Grão-Mogol, Minas Gerais: Melastomataceae. *Boletim de Botânica* 27: 73-96.
- McCUNE, B., MEFFORD, M. J. 1997. PC-ORD: Multivariate analysis of ecological data—version 3.0. Oregon: MJM Software Design, Gleneden Beach 43p
- MEHROTA, V. S. 2005. Mycorrhizas: role and applications. New Delhi. Allied Publishers.
- MENDES, M. M. C., CHAVES, L. F. C., PONTES NETO, T. P., SILVA, J. A. A., AND FIGUEIREDO, M. V. B. 2013. Crescimento e sobrevivência de mudas de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth.) inoculadas com micro-organismos simbiotes em condições de campo. *Ciência Florestal* 23: 309-320.
- MENEZES, N. Z., AND GIULIETTI, A. M. 2000. Campos rupestres. In: M. P. Mendonça, and L. V. Lins (eds.). Lista vermelha das espécies ameaçadas de extinção da flora de Minas Gerais. Minas Gerais, Belo Horizonte, Fundação Biodiversitas & Fundação Zoo-Botânica de Belo Horizonte, pp. 65-73.
- NEGREIROS, D., FERNANDES, G. W., BERBARA, R. L. L., RODARTE, L. H. O., AND BARBOSA, N. P. U. 2011. Caracterização físico-química de solos quartzíticos degradados e áreas adjacentes de campo rupestre na Serra do Cipó, MG, Brasil. *Neotropical Biology and Conservation* 6: 156-161.

- OKI, Y., GOTO, B. T., JOBIM, K., ROSA, L. H., FERREIRA, M. C., COUTINHO, E. S., XAVIER, J. H. A., et al., 2016. Arbuscular Mycorrhiza and Endophytic Fungi in Rupestrian Grasslands. *In: G. W. Fernandes (ed). Ecology and Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil. Springer, pp 157-179.*
- PAGANO, M., AND SCOTTI, M. R. M. 2009. A survey of the arbuscular mycorrhiza occurrence in *Paepalanthus bromelioides* and *Bulbostylis* sp. in rupestrian fields, Brazil. *Micologia Aplicada International* 21: 1-10.
- PEREIRA, C. M. R., SILVA, D. K. A., FERREIRA, A. C. A., GOTO, B. T, AND MAIA, L. C. 2014. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in Atlantic forest areas under different land uses. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 185: 245-252.
- POUYU-ROJAS, E., SIQUEIRA, J. O., AND SANTOS, J. G. D. 2006. Compatibilidade simbiótica de fungos micorrízicos arbusculares com mudas de espécies arbóreas tropicais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30: 413-424.
- RAVEN, P. H., EVERT, R. F., AND EICHHORN, S. E. 1996. *Biologia vegetal*. 5.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A., 728p.
- RUSSOMANNO, O. M. R., KRUPPA, P. C., AND MINHONI, M. T. A. 2008. Influência de fungos micorrízicos arbusculares no desenvolvimento de plantas de alecrim e manjeriço. *Arquivos do Instituto Biológico* 75: 37-43.
- SANTOS, F. E. F., AND CARRENHO, R. 2011. Diversidade de fungos micorrízicos arbusculares em remanescente florestal impactado (Parque Cinquentenário – Maringá, Paraná, Brasil). *Acta Botanica Brasilica* 25: 508–516.
- SCHEUBLIN, T. R., RIDGWAY, K. P., YOUNG, J. P. W., VAN DE HEIJDEN, M. G. A. 2004. Nonlegumes, legumes, and root nodules harbor different arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Applied and Environmental Microbiology* 70: 6240-6246.
- SILVA, I. R., MELLO, C. M. A., FERREIRA NETO, R. A., SILVA, D. K. A., MELO, A. L., OEHL, F., MAIA, L. C. 2014. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi along an environmental gradient in the Brazilian semiarid. *Applied Soil Ecology* 84: 166–175.
- SILVA, R. F., ANTONIOLLI, Z. I., ANDREAZZA, R., AND KAMINSKI, J. 2008. Comunidade de fungos micorrízicos arbusculares em solo cultivado com eucalipto, pinus e campo nativo em solo arenoso, São Francisco de Assis, RS. *Ciência Florestal* 18:353-361.

- SMITH, S. E., AND READ, D. J. 1997. *Mycorrhizal Symbiosis*, 2nd/Ed. Academic Press, London, UK.
- SMITH, S. E. 1995. Discoveries, discussions and directions in mycorrhizal research. Pp.3-24. *In: A. Varma, and B. Hock [eds.]. Mycorrhiza: structure, function, molecular biology and biotechnology.* Springer Verlag, Berlin
- SOUZA, F. A. 2000. Banco ativo de glomales da embrapa agrobiologia: catalogação e introdução de novos isolados desde 1995. Embrapa Agrobiologia, Seropédica.
- SOUZA, R. G., SILVA, D. K. A., MELLO, C. M. A., GOTO, B. T., SILVA, F. S. B., SAMPAIO, E. V. S. B., AND MAIA, L. C. 2011. Arbuscular mycorrhizal fungi in revegetated mined dunes. *Land Degradation & Development* 24: 147-155.
- SOUZA, T. A. F., RODRIGUEZ-ECHEVERRÍA, S., ANDRADE, L. A., AND FREITAS, H. 2016. Arbuscular mycorrhizal fungi in *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir from Brazilian semi-arid. *Brazilian Journal of Microbiology* 47: 359–366.
- SPAIN, J.L., AND MIRANDA, J. C. C. 1996. *Scutellospora cerradensis*: an ornamented species in the Gigasporaceae (Glomales) from the Cerrado region of Brazil. *Mycotaxon* 60:129-136.
- TAVARES, R. C., MENDES FILHO, P. F., LACERDA, C. F., AND SILVA, J. 2012. Colonização micorrízica e nodulação radicular em mudas de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth.) sob diferentes níveis de salinidade. *Revista Ciência Agronômica* 43: 409- 416.
- VAN DER HEIDJEN, M. G. A., KLIRONOMOS, J. N., URSIC, M., MOUTOGLIS, P., STREITWOLF-ENGEL, R., BOLLER, T., WIEMKMEN, A., AND SANDERS, I. R. 1998. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature* 396: 69-72.
- VANDENKOORNHUYSE, P., HUSBAND, R., DANIELL, T. J., WATSON, I. J., DUCK, J. M., FITTER, A. H., AND YOUNG, J. P. W. 2002. Arbuscular mycorrhizal community composition associated with two plant species in a grassland ecosystem. *Molecular Ecology* 11, 1555-1564.

Tabela 1. Comparação das médias de densidade de glomerosporos e riqueza de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) avaliadas em rizosfera, e das médias de altura e diâmetro à altura do solo (DAS) das espécies vegetais utilizadas na restauração de campos rupestres. Valores em uma mesma coluna, seguidos por letras minúsculas idênticas não foram significativos ( $P < 0,05$ ).

Espécies vegetais	Densidade	Riqueza	Altura	DAS
<i>Baccharis platypodium</i>	64,8a	3,12a	28,10a	0,78a
<i>Collaea cipoensis</i>	69,5a	4,6a	25,78b	0,65b
<i>Dalbergia miscolobium</i>	24,2ab	3,1a	23,11c	0,62bc
<i>Dasiphilum reticulatum</i>	57,5ac	1,5a	25,23d	0,98ad
<i>Eremanthus erythropappus</i>	95,3ac	4,8b	33,66e	0,90d
<i>Guazuma ulmifolia</i>	58,3abc	1,3b	25,50b	0,76ade
<i>Handroanthus ochraceus</i>	45,5abc	2,9ab	28,63f	0,97df
<i>Mimosa</i> sp	55,1abc	5,7bc	23,86g	0,69abce
<i>Tibouchina heteromalla</i>	25,6abd	3,6abcd	39,83h	1,05cg

Tabela 2. Espécies de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) ocorrendo em nove espécies vegetais: *Baccharis platypoda* (BP), *Collaea cipoensis* (CC), *Dalbergia miscolobium* (DM), *Dasyphyllum reticulatum* (DR), *Eremanthus erythropappus* (EE), *Guazuma ulmifolia* (GU), *Handroanthus ochraceus* (HO), *Mimosa* sp. (MS), *Tibouchina heteromalla* (TH), utilizadas em restauração de campos rupestres.

Família/Espécie	BP	CC	DM	DR	EE	GU	HO	MS	TH
<b>ACAULOSPORACEAE</b>									
<i>Acaulospora aff herrera</i>		X		X					
<i>Acaulospora aff rugosa</i>	X								
<i>Acaulospora birreticulata</i>									X
<i>Acaulospora delicata</i>								X	
<i>Acaulospora denticulata</i>			X						
<i>Acaulospora fulveata</i>				X					
<i>Acaulospora mellea</i>		X							
<i>Acaulospora morrowiae</i>	X	X		X					
<i>Acaulospora rehmi</i>			X		X			X	
<i>Acaulospora scrobiculata</i>			X		X		X		
<i>Acaulospora</i> sp.	X	X		X	X		X	X	
<i>Acaulospora</i> sp.1								X	X
<i>Acaulospora</i> sp. 2	X								
<b>AMBISPORACEAE</b>									
<i>Ambispora</i> sp.							X	X	
<b>DENTISCUTATAACEAE</b>									
<i>Dentiscutata</i> sp.								X	
<b>DIVERSISPORACEAE</b>									
<i>Diversispora</i> sp.				X					
<b>ENTROPHOSPORACEAE</b>									
<i>Clareidoglomus claroideum</i>					X				
<i>Claroideoglomus etunicatum</i>	X		X		X		X	X	X
<i>Claroideoglomus</i> sp.		X							
<b>GIGASPORACEAE</b>									
<i>Gigaspora aff gigantea</i>					X		X	X	

<i>Gigaspora decipiens</i>									X
<i>Gigaspora</i> sp.	X								X
GLOMERACEAE									
<i>Funneliformis geosporum</i>						X			X
<i>Funneliformis mosseae</i>				X					
<i>Funneliformis</i> sp.						X			X X
<i>Glomus</i> aff <i>invermaiium</i>				X					
<i>Glomus clarus</i>				X		X		X	X
<i>Glomus diaphanus</i>						X			
<i>Glomus glomerulatum</i>								X	X X
<i>Glomus macrocarpum</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X X
<i>Glomus microcarpum</i>				X		X	X	X	X X
<i>Glomus spinuliferum</i>								X	
<i>Glomus tortuosum</i>				X		X		X	X
<i>Glomus trufemii</i>	X	X		X					X
<i>Glomus</i> sp.	X			X					X
<i>Glomus</i> sp.1									X
<i>Glomus</i> sp.2				X					
<i>Glomus</i> sp.3				X					
<i>Glomus</i> sp.4									X
<i>Glomus</i> sp.5				X		X			
<i>Glomus</i> sp.6						X	X		
<i>Semiglomus</i> sp.	X					X			
<i>Septoglomus constrictum</i>	X								X
INTRAORNATOSPORACEAE									
<i>Intraortospora intraornata</i>	X	X		X		X			X
PACISPORACEAE									
<i>Pacispora</i> sp.								X	X X
PARAGLOMERACEAE									
<i>Paraglomus brasilianum</i>									X
<i>Paraglomus occultum</i>						X		X	

RACOCETRACEAE									
<i>Racocetra</i> sp.	X	X							
<i>Racocetra tropicana</i>	X	X						X	
SCUTELLOSPORACEAE									
<i>Orbispora pernambucana</i>		X		X					
<i>Orbispora</i> sp.						X			
<i>Scutellospora</i> sp.	X			X					
Riqueza	15	15	11	11	16	5	14	20	12

## Lista de Figuras

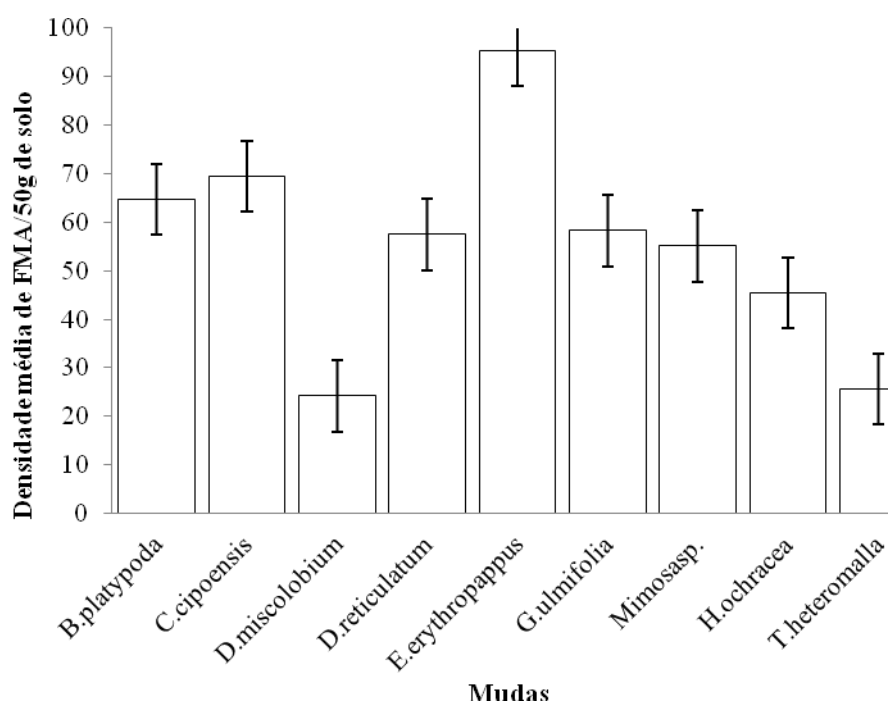
**Figura 1.** **a)** densidade média de glomerosporos em 50g de solo das nove espécies vegetais de campos rupestres utilizadas na restauração de áreas degradadas; **b)** riqueza de fungos micorrízicos arbusculares das nove espécies vegetais de campos rupestres utilizadas na restauração de áreas degradadas.

**Figura 2.** Projeção dos escores da composição de espécies no escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS) das nove espécies vegetais de campos rupestres: *Baccharis platypoda* (BP), *Collaea cipoensis* (CC), *Dalbergia miscolobium* (DM), *Dasyphyllum reticulatum* (DR), *Eremanthus erythropappus* (EE), *Guazuma ulmifolia* (GU), *Handroanthus ochraceus* (HO), *Mimosa* sp. (MS), *Tibouchina heteromalla* (TH), utilizadas em restauração de áreas degradadas.

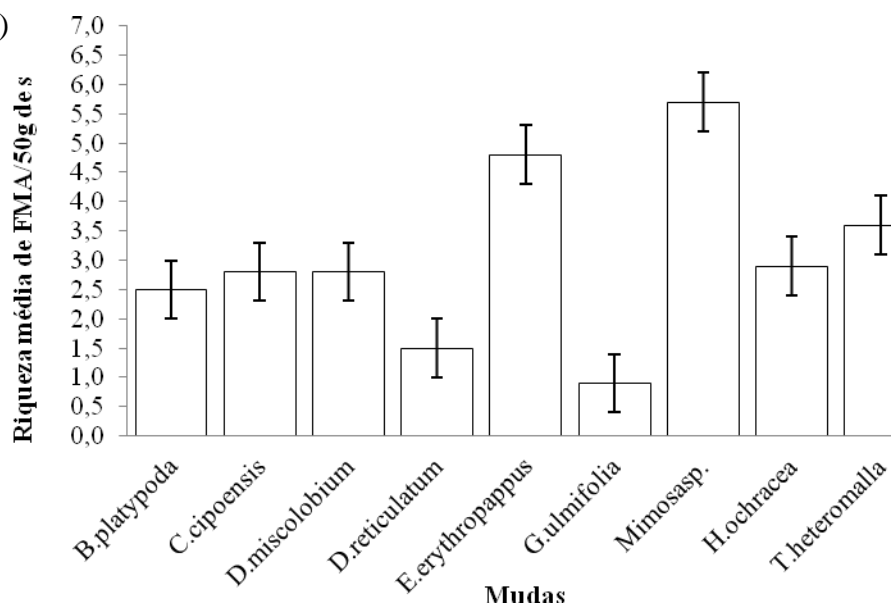
**Figura 3.** Dendrograma de similaridade de fungos micorrízicos arbusculares entre as espécies vegetais de campos rupestres utilizadas na restauração de áreas degradadas.

**Figura 4** Diagrama de ordenação (CCA) das espécies de fungos micorrízicos arbusculares em relação às variáveis Altura e Diâmetro à altura do solo (DAS) das espécies vegetais de campos rupestres utilizadas na restauração de áreas degradadas.

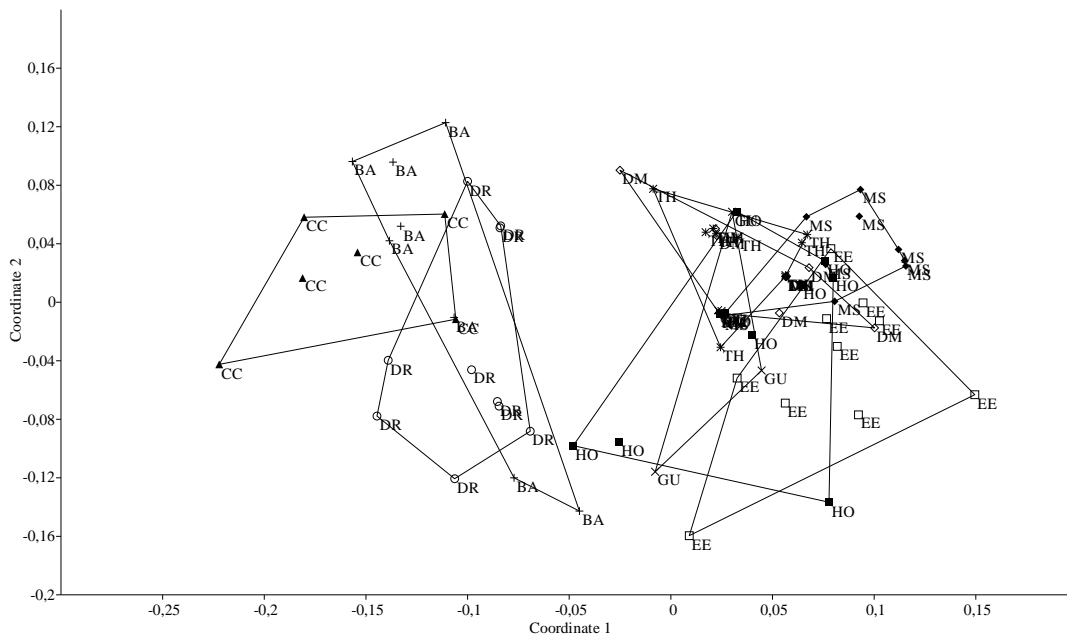
a)



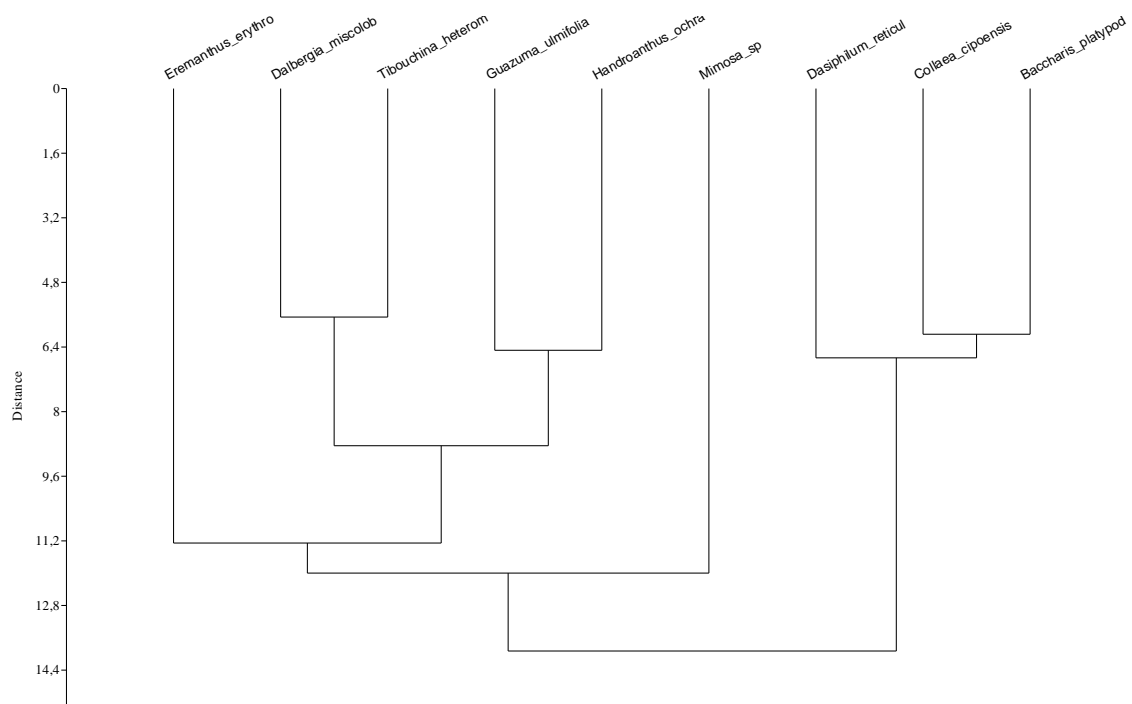
b)



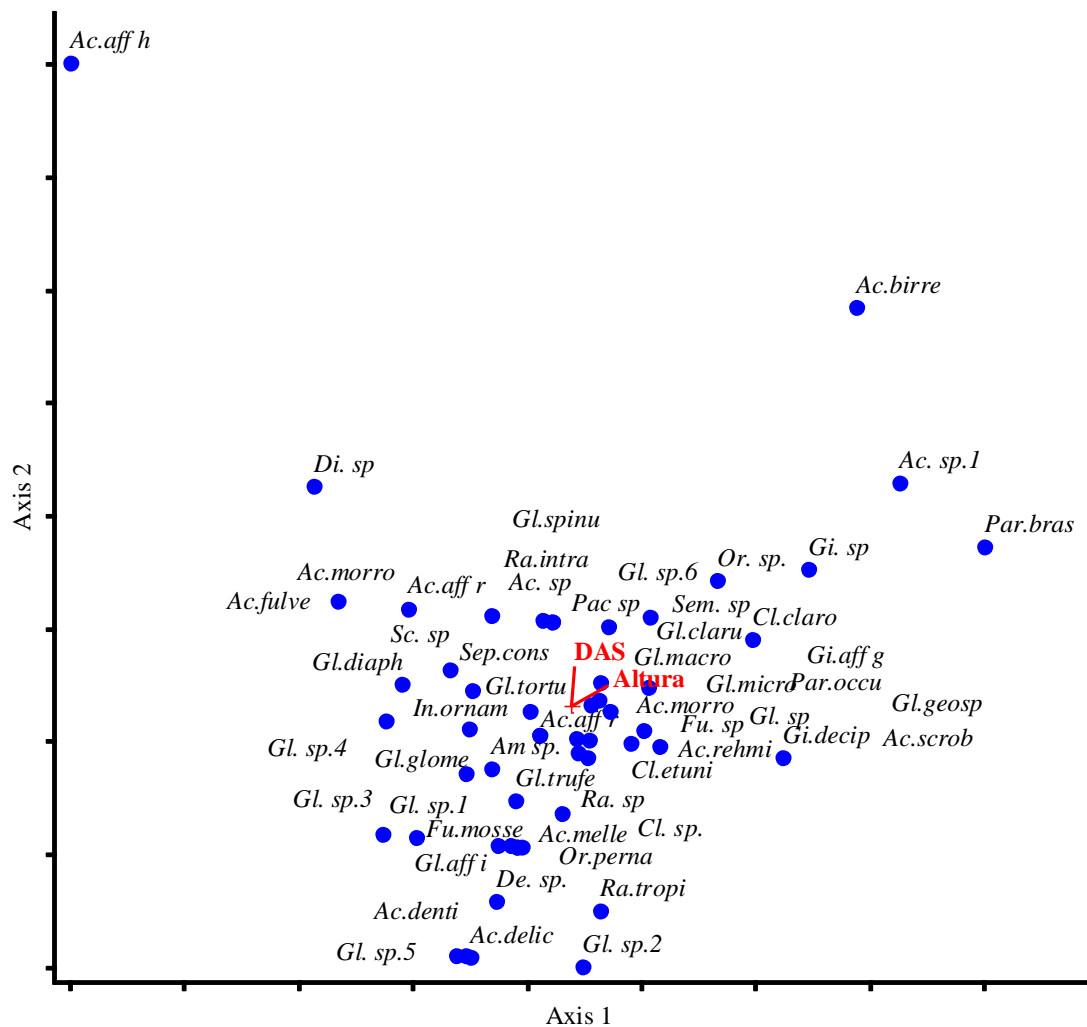
**Figura 1.** a) densidade média de glomerosporos em 50g de solo das nove espécies vegetais de campos rupestres utilizadas na restauração de áreas degradadas; b) riqueza de fungos micorrízicos arbusculares das nove espécies vegetais de campos rupestres utilizadas na restauração de áreas degradadas.



**Figura 2.** Projeção dos escores da composição de espécies no escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS) das nove espécies vegetais de campos rupestres: *Baccharis platypoda* (BP), *Collaea cipoensis* (CC), *Dalbergia miscolobium* (DM), *Dasyphyllum reticulatum* (DR), *Eremanthus erythropappus* (EE), *Guazuma ulmifolia* (GU), *Handroanthus ochraceus* (HO), *Mimosa* sp. (MS), *Tibouchina heteromalla* (TH), utilizadas em restauração de áreas degradadas.



**Figura 3.** Dendrograma de similaridade de fungos micorrízicos arbusculares entre as espécies vegetais de campos rupestres utilizadas na restauração de áreas degradadas.



**Figura 4** Diagrama de ordenação (CCA) das espécies de fungos micorrízicos arbusculares em relação às variáveis Altura e Diâmetro à altura do solo (DAS) das espécies vegetais de campos rupestres utilizadas na restauração de áreas degradadas.

## CAPITULO III

### **Fatores relacionados com a diversidade de fungos micorrízicos arbusculares em campos rupestres**

**Etiene Silva Coutinho<sup>1</sup>, Geraldo Wilson Fernandes<sup>2</sup>, Ricardo Luís Louro Berbara<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre, Departamento de Biologia Geral, C. Postal 486, 30161-970 Belo Horizonte, MG, Brasil

<sup>2</sup> Universidade Federal de Minas Gerais, ICB/Departamento de Biologia Geral, Laboratório Ecologia Evolutiva and Biodiversidade, C. Postal 486, 30161-970 Belo Horizonte, MG, Brasil

<sup>3</sup> Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, IA/Departamento de Solos, Laboratório de Biologia de Solos, 23890-000 Seropédica, RJ, Brasil

<sup>2</sup> Autor para correspondência: [gw.fernandes@gmail.com](mailto:gw.fernandes@gmail.com)

*Formatado segundo as normas da Fungal Ecology*

*Parte dos dados publicados na Mycorrhiza*

**Resumo** O estudo das relações entre a vegetação e os solos em campos rupestres pode auxiliar na compreensão da estrutura da comunidade de fungos micorrízicos arbusculares (FMA). Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar os fatores da ocorrência da comunidade de fungos micorrízicos arbusculares em campos rupestres ao longo do gradiente altitudinal onde ocorre heterogeneidade entre os habitats. Para isso, foi realizada a identificação do tipo de habitat em cada altitude, assim como propriedades físicas e químicas do solo, onde 51 espécies de FMA foram encontradas ao longo do gradiente altitudinal. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância ( $p < 0,05$ ). A densidade e a riqueza de FMA ao longo do gradiente de altitude foram correlacionadas com as propriedades do solo, altitude, tipo de habitat, riqueza e abundância de plantas através da análise de regressão linear. Foram avaliados os efeitos das propriedades do solo, da altitude, da riqueza, abundância e composição de plantas sobre a variação na composição de espécies de FMA. Além disso, foi realizada a análise de espécies indicadoras para os habitats. As condições edáficas e a altitude condicionaram a distribuição espacial da comunidade de FMA. A composição de espécies de FMA também foi influenciada por duas espécies vegetais, *Neea theifera* Oerst. e *Byrsonima intermedia* A. Juss., com a presença de espécies indicadoras em cada habitat.

**Palavras-chave** Campos rupestres, altitude, habitats, solo, espécies indicadoras

**Abstract** The study of the relationship between vegetation and soil in rupestrian grassland can support in understanding the structure of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) community. Thus, this study aimed to evaluate the factors of occurrence of mycorrhizal fungi community in rupestrian grassland along the altitudinal gradient where there is heterogeneity among habitats. For this, the habitat type identification at each altitude, as well as physical and chemical properties of soil, where 51 species of AMF were found along the altitudinal gradient. Data were submitted to analysis of variance (ANOVA) and the means were compared by Tukey test at 5% significance ( $p < 0.05$ ). The density and richness of AMF along the altitudinal gradient were correlated with soil properties, altitude, habitat type, richness and abundance of plants by linear regression analysis. The effects of soil properties, altitude, richness, abundance and plant composition on the variation in the composition of AMF species. In addition, the indicator species analysis was performed for habitats. The soil conditions and altitude conditioned the spatial distribution of the AMF community. The composition of AMF species was also influenced by two plant species *Neea theifera* Oerst. and *Byrsonima intermedia* A. Juss., with the presence of indicator species in each habitat.

**Keywords:** rupestrian grassland, altitude, habitat, soil, indicator species

## Introdução

A heterogeneidade ambiental encontrada nas montanhas influencia as variações na distribuição, diversidade e estrutura de comunidades de plantas e animais e, assim, nos serviços ambientais (e.g. Dick and Wright, 2005; Fernandes, 2016a; Fernandes and Price, 1988; Martinelle, 2007). Devido à ocorrência de variações claras das comunidades em uma área relativamente pequena, os gradientes altitudinais e montanhas representam laboratórios naturais para a realização de estudos ecológicos evolutivos (Malhi et al., 2010; Menke et al., 2014; Read et al., 2014). Um claro padrão de distribuição e riqueza de espécies ao longo de gradientes altitudinais é uma relação negativa entre diversidade e altitude (e.g., Begon et al., 1996; Fernandes and Price, 1988, 1991; Kumar et al. 2009; Pianka, 1966). Por outro lado, alguns organismos não seguem estes padrões, como por exemplo, os fungos micorrizicos. A riqueza de microorganismos geralmente é maior em altitudes intermediárias (Bryant et al., 2008; Fierer et al., 2011)

Coutinho et al. (2015) mostraram que a riqueza de fungos micorrizicos em um ambiente savânico montanhoso no sudeste do Brasil, apresentava uma maior diversidade de espécies em ambientes de altitude intermediária. Embora vários fatores possam estar correlacionados a alta diversidade e ocorrência dos FMA nos campos rupestres (Carvalho et al., 2012; Coutinho et al., 2015), o mosaico de habitats presente neste ecossistema e suas características intrínsecas, tais como atributos edáficos e da vegetação podem representar os filtros ambientais mais relevantes que direcionam o padrão encontrado.

A alta diversidade da vegetação é típica nos campos rupestres e é devida principalmente à heterogeneidade entre os locais e os tipos de habitats, mesmo que esses sejam muito próximos (Conceição et al., 2007; Conceição and Giulietti, 2002; Conceição and Pirani, 2007). Tal padrão foi também descrito para as micorrizas (Carvalho et al., 2012; Coutinho et al., 2015; Oki et al., 2016). Por outro lado, há em geral grande influência recíproca entre a vegetação, habitat e micorrizas (Souza et al., 2007). Estes microorganismos promovem melhor nutrição e crescimento da planta hospedeira, mostrando grande dependência micorrízica (Berbara et al., 2006; Caldeira et al., 1999; Miranda, 2008; Vargas and Hungria, 1997), principalmente em ambientes extremos.

Vários índices tem sido utilizados para analisar a associação e preferência entre espécies e habitats (De C'aceres and Legendre, 2009). Rolstad et al. (2002) afirmam que as espécies indicadoras possuem a capacidade de representar a realidade das condições

ambientais e biológicas de uma dada comunidade. Conhecer estas interações no campo rupestre é importantíssimo considerando a alta diversidade de espécies tanto de plantas quanto de micorrizas ali descritas (Fernandes, 2016b).

A composição de espécies de FMA nos campos rupestres está relacionada com as variáveis do solo: saturação por bases, capacidade de troca catiônica, matéria orgânica e areia fina (Coutinho et al., 2015). Embora a diversidade de FMA não tenha variado entre os tipos de habitats (Carvalho et al., 2012), a comunidade de FMA foi bastante heterogênea ao longo do gradiente altitudinal (Coutinho et al., 2015), correlacionada com as propriedades do solo (Carvalho et al., 2012; Coutinho et al., 2015; Oki et al., 2016).

O conhecimento sobre os fatores que influenciam a ocorrência e a diversidade de FMA em campos rupestres são essenciais para o desenvolvimento de biotecnologias e estratégias de manejo, principalmente voltada a programas de conservação ambiental, deste ecossistema considerado frágil e único (e.g., Fernandes, 2016b; Fernandes et al., 2014). Neste trabalho verificamos quais fatores estão relacionados com a riqueza, densidade e a composição de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) nos solos do campo rupestre ao longo do gradiente altitudinal na Serra do Cipó. Neste sentido, pretendeu-se responder as seguintes perguntas: i) como a riqueza, a densidade e a composição de FMA variam em relação a heterogeneidade ambiental, diga-se solo, habitat, altitude, riqueza, abundância e composição de espécies vegetais e como estas variáveis estão correlacionadas? ii) existem espécies de FMA indicadoras em função do habitat associado a altitude?

## **Materiais e métodos**

O estudo foi conduzido nos municípios de Santana do Riacho e Jaboticatubas, na Serra do Cipó, Minas Gerais, Brasil, entre as latitudes 19°10' e 19°20'S e longitude de 43°40' W. O clima da região é do tipo Cwb (clima mesotérmico com verões brandos e estação chuvosa no verão) na classificação de Köppen, com temperaturas médias entre 17,4° e 19,8° C. A precipitação anual da região gira em torno de 1500 mm, com inverno seco de três a quatro meses, e período úmido de sete a oito meses (veja Madeira and Fernandes, 1999). As áreas estudadas compreendem os afloramentos rochosos com altas proporções de rocha exposta e vegetação herbáceo-arbustiva; campo rupestre com a cobertura da superfície do solo por pequenos fragmentos de rochas quartzíticas e; cerrado com arbóreo-arbustiva que ocorre

em ambientes rupestres (Barbosa and Fernandes et al., 2016; Coutinho et al., 2015; Mota et al., 2016).

Os dados do solo e da densidade, riqueza e composição de fungos micorrízicos arbusculares foram obtidos no trabalho de Coutinho et al. (2015). Enquanto que os dados da vegetação foram obtidos no trabalho de Mota et al. (2016). Ambos trabalhos foram desenvolvidos na mesma área, em campos rupestres ao longo do gradiente altitudinal, entre as altitudes de 800 e 1500 m. As amostras de solos foram analisadas quanto parâmetros texturais (areia fina, areia grossa, silte e argila) e químicos (pH, fósforo - P, potássio - K, cálcio - Ca, magnésio -Mg, alumínio - Al, acidez potencial - H+Al, SB – soma de bases, T – capacidade de troca catiônica, t – capacidade de troca catiônica efetiva, V – saturação por bases, MO – matéria orgânica, Prem – fósforo remanescente, m – saturação de alumínio ). Foram encontradas 51 espécies de FMA e uma densidade de 58.621 esporos em campos rupestres ao longo do gradiente altitudinal, entre as altitudes de 800 e 1500 m (Coutinho et al., 2015). Foram amostradas 9.672 plantas, distribuídas em 278 espécies em campos rupestres ao longo do gradiente altitudinal, entre as altitudes de 800 e 1500 m. (Mota et al., 2016).

Para avaliar a diferença das propriedades químicas e físicas do solo, da densidade e riqueza de fungos micorrízicos arbusculares entre os habitats e altitudes os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância ( $p < 0,05$ ). Para verificar se a densidade e a riqueza de FMA ao longo do gradiente de altitude estavam correlacionadas com as propriedades do solo, altitude, tipo de habitat, riqueza e abundância de plantas foi realizada a análise de regressão linear. Foi utilizado o programa “R” para análise dos dados (R. Development Core Team, 2012).

Para avaliar o efeito das propriedades do solo, da altitude e da riqueza e abundância de plantas sobre a variação na composição de espécies de FMA utilizou-se acessado por análise de correspondência canônica (CCA). A significância do efeito foi acessada pelo teste de permutação de "Monte Carlo". A matriz resposta foi a matriz de espécies de FMA e a matriz explicativa foi formada por descritores químicos e físicos do solo, altitude, riqueza e abundância de plantas. Dentro deste conjunto de variáveis foram ainda eliminadas todas aquelas que apresentaram baixa correlação com os eixos da ordenação ( $< 0,05$ ). Em seguida, foi testado o efeito da composição de espécies vegetais sobre a variação na composição de espécies de FMA pela análise de correspondência canônica (CCA), utilizando as dez espécies vegetais mais abundantes e ainda foram eliminadas todas aquelas que

apresentaram baixa correlação com os eixos da ordenação ( $p < 0,05$ ). A matriz resposta foi a matriz de espécies de FMA e a matriz explicativa foi a matriz de espécies vegetais.

Para verificar possíveis similaridades na composição de espécies de FMA entre os habitats foi aplicado o teste ANOSIM (Analysis of Similarity). A ordenação foi feita utilizando-se dados de presença e ausência, empregando o índice de similaridade Raup-Crick. Os valores obtidos foram colocados na matriz de similaridade, para posterior aplicação de Análise de Cluster, com agrupamento em pares, utilizando o índice de Sørensen. As análises foram realizadas no software Past (Hammer et al., 2001).

Para identificação das espécies indicadoras de FMA nos habitats, foi realizada a análise de espécies indicadoras (Dufrene and Legendre, 1997), pelo Programa PC-Ord for Windows versão 5.0 (McCune and Mefford, 1997).

## **Resultados**

### **Propriedade dos solos nas altitudes e tipos de habitats**

As propriedades do solo, pH, potássio (K), alumínio (Al), acidez potencial (H+Al), saturação por bases (V), fósforo (Pme), cálcio (Ca), magnésio (Mg), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (T), matéria orgânica (MO), areia grossa (AR), areia fina (AF) e silte (Silt) variaram entre as altitudes ( $p < 0,05$ ). As propriedades do solo, potássio (K), alumínio (Al), acidez potencial (H+Al), saturação por bases (V), fósforo (Pme), cálcio (Ca), magnésio (Mg), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (T), areia grossa (AR), e areia fina (AF) variaram entre os habitats ( $p < 0,05$ ), no entanto depende da interação com altitude. O pH, o K, a saturação por bases (V) e Silt foram maiores nas altitudes mais baixas (800 e 900m). O alumínio (Al) foi maior na altitude mais alta (1400m). Acidez potencial (H+Al) e matéria orgânica (MO) foram maiores nas altitudes intermediárias (1200m) e na maior altitude (1400m). A capacidade de troca catiônica (T) foi maior nas maiores altitudes (1300 e 1400m), enquanto que areia grossa (Ag) foi maior nas altitudes de 900m e de 1300m. O pH foi maior no habitat de campos rupestres enquanto que o potássio (K) e a saturação por bases (V), foram maiores no habitat de cerrado. Já o alumínio (Al), acidez potencial (H+Al), capacidade de troca catiônica (T) e areia grossa, foram maiores no habitat de afloramento rochoso. As propriedades do solo também obtiveram estatisticamente correlação entre si. As maiores correlações positivas foram entre H+Al e capacidade de troca catiônica (T) (0,99) e entre alumínio (Al) e capacidade de troca catiônica efetiva (t) (0,99). As maiores correlações

negativas foram entre H+Al e saturação por bases (V) (-0,84) e entre capacidade de troca catiônica (T) e saturação por bases (V) (-0,82) (Tabela 1).

### **Densidade e riqueza de FMA nas altitudes, tipos de habitats, riqueza e abundância de plantas**

A densidade de esporos só variou entre as altitudes ( $F=5.2817$ ,  $df=88$ ,  $p=0,0239$ ), sendo maior nas altitudes intermediárias (1100 e 1200m). Entre os habitats, a densidade média de esporos de FMA foi maior nos afloramentos rochosos (770,05) quando comparado com os campos rupestres (657,02) e cerrado (499,00), no entanto não foram significativos ( $F=2,0789$ ,  $df=85$ ,  $p=0,1106$ ). A interação entre altitude e tipo de habitat também não foi significativa ( $p<0,05$ ). Além disso, a densidade de FMA não apresentou correlação significativa com a abundância e riqueza de plantas, segundo o coeficiente de correlação de Spermán ( $r = 0,01$ ;  $r = -0,08$ ;  $p>0,05$ , respectivamente).

A riqueza de FMA só variou entre as altitudes ( $F=4,0733$ ,  $df=88$ ,  $p=0,0473$ ), sendo maior nas altitudes intermediárias (1100 e 1200m). Entre os habitats, a riqueza média de FMA foi maior nos afloramentos rochosos (10,36) comparado com os campos rupestres (8) e cerrado (8,9), no entanto não foram significativos ( $F=0,9365$ ,  $df=85$ ,  $p=0,4276$ ). As interações entre as variáveis explicativas também não foram significativas ( $p<0,05$ ). A riqueza de FMA não apresentou correlação significativa com a abundância de plantas ( $r = 0,03$ ;  $p>0,05$ ), porém apresentou baixa correlação negativa com a riqueza de plantas ( $r = -0,22$ ;  $p<0,05$ ).

Os campos rupestres apresentaram maior número de espécies de FMA (49) e maior número de espécies exclusivas (9). Os afloramentos rochosos apresentaram 37 espécies de FMA e nenhuma espécie exclusiva. Já o cerrado apresentou 34 espécies de FMA e duas espécies exclusivas.

### **Composição de FMA**

A composição de FMA foi influenciada por variáveis edáficas como a saturação por soma de base (V) e areia fina (AF) e também pela altitude. No primeiro eixo de ordenação, a maioria das espécies da família Glomeraceae destaca-se por apresentar alta correlação com o aumento dos teores de areia fina, como as espécies *Glomus fasciculatum* (Glfas), *Gl.sp.2* (Glsp2), *Glomus glomerulatum* (Glgom) e *Glomus invermaium* (Glinver). A

soma de bases tem correlação com as espécies *Scutellospora dispurplencens* (Scdisp), *Gigaspora decipiens* (Gidec) e *Ambispora brasiliensis* (Ambra). A altitude está correlacionada com as espécies *Acaulospora birreticulata* (Acbir), *Septoglosum constrictum* (Secon), *Acaulospora mellea* (Acme1), *Claroideoglosum lamellosum* (Clam) (Fig. 1).

A composição de espécies de FMA também foi influenciada por duas espécies vegetais, *Neea theifera* Oerst. e *Byrsonima intermedia* A. Juss.. As espécies de FMA *Ambispora appendicula*, *Glomus macrocarpum*, *Glomus microcarpum* e *Acaulospora rugosa* apresentaram alta correlação com a espécie vegetal *Neea theifera*. Já as espécies de FMA *Acaulospora spinosa*, *Scutellospora callosa*, *Glomus diaphanum* e *Acaulospora mellea* tiveram correlação com a espécie vegetal *Byrsonima intermedia* (Fig. 2).

Na composição de espécies de FMA entre os habitats houve diferença significativa ( $p < 0,05$ ). No entanto, ocorreu similaridade na composição de espécies sendo maior entre os afloramentos rochosos e campos rupestres (76%) (Fig.3). Observou-se a formação de agrupamento dos três tipos de habitat em dois níveis (Fig. 3). No primeiro nível encontram-se os habitats de cerrado e afloramento rochoso, apresentando semelhança de 96%. No segundo nível, encontra-se o habitat de campo rupestre, apresentando semelhança de 48% com os demais habitats.

### **Espécies indicadoras de FMA nos habitats**

As espécies de FMA *Diversispora* sp, *Ac. delicata* e *Gl. microaggregatum* são consideradas espécies indicadoras para habitat de cerrado, localizado em algumas parcelas da altitude de 800 e 900m. As espécies de FMA, *Gl. diaphanus*, *Am. brasiliensis*, *Gl. macrocarpum*, dentre outras, são indicadoras de cerrado e afloramento rochoso, correspondente às altitudes de 900, 1000 e 1100m. As espécies *Ac. sp.2*, *C. etunicatum*, *Gl. glomerulatum*, *Funiliformes geosporum* e *Gl. invermaium*, são indicadoras dos habitats cerrado, afloramento rochoso e campos rupestres, na altitude de 1200m. Como indicadoras dos habitats afloramento rochoso e campo rupestre, de ocorrência na altitude de 1300m, foram *Am. callosa*, *Gl. sp5*, *Ac. denticulata*, *Ac. delicata*, *Am. Brasiliensis* e *Gl. macrocarpum*. Também se destacaram *F. mosseae*, *C. etunicatum*, *Gl. glomerulatum*, *F. geosporum* e *Gl. invermaium*, espécies indicadoras nos campos rupestres, altitude de 1400m (Tabela 2).

## **Discussão**

As condições edáficas de campos rupestres são adversas, apresentando baixa disponibilidade de recursos nutricionais e estresses hídricos causados por condições climáticas características de regiões montanhosas quartzíticas, como a Serra do Cipó (Carvalho et al., 2012; Coutinho et al., 2015; Fernandes et al., 2011; Negreiros et al., 2009, 2011). A variação das propriedades do solo foi determinada pelas altitudes e pela interação de cada altitude com o tipo de habitat. Isto se deve à heterogeneidade existente entre os habitats ao longo do gradiente altitudinal (Carvalho et al., 2012; Coutinho et al., 2015; Schaeffer et al., 2016).

A variação de densidade e riqueza de FMA está relacionada com as altitudes assim como com as propriedades do solo (Coutinho et al., 2015). Ao longo de gradientes altitudinais variam quase todos os parâmetros climáticos e edáficos, mas principalmente a temperatura, precipitação, umidade e solos diferenciando-se a curtas distâncias (Whitmore, 1990). A heterogeneidade ambiental encontrada nas montanhas influenciam a distribuição de plantas e animais, na biodiversidade, estrutura de comunidades (e.g., Dick and Wright, 2005; Fernandes and Price, 1988; Martinelle, 2007). A tendência é que seja encontrada maior densidade e riqueza de FMA em altitudes intermedárias ao longo de gradientes altitudinais de campos rupestres (Coutinho et al., 2015).

A grande diversidade de fungos micorrizicos arbusculares inicialmente era atribuída hipoteticamente ao alto endemismo e diversidade de espécies vegetais nos solos bastante pobres em nutrientes da Serra do Cipó (veja Coutinho et al., 2015). Este raciocínio foi devido a importância destes micro-organismos em áreas de baixa fertilidade para sobrevivências das espécies vegetais, uma vez que eles aumentam a área de absorção do sistema radicular das plantas, absorvendo mais nutrientes através de suas hifas (Reis and Krüger, 1990). Contudo, apesar de densidade de FMA não apresentar correlação significativa com a abundância e riqueza de plantas; e a riqueza de FMA não apresentar correlação significativa com a abundância de plantas, nós encontramos baixa correlação significativa entre a riqueza de FMA com a riqueza de plantas. Carvalho et al. (2012) também não encontraram correlação entre a riqueza e abundância de plantas com a riqueza e densidade de FMA em campos rupestres. Isso demonstra que as propriedades do solo são mais determinantes na distribuição e ocorrência de FMA nos campos rupestres.

O pH e o teor de Al do solo têm sido os principais fatores edáficos que regulam a composição das comunidades de FMA (Correia et al., 2004; Sieverding, 1991). Em campos rupestres, ao longo do gradiente altitudinal, as espécies de FMA estão correlacionadas com variáveis edáficas como a saturação por soma de base (V), matéria orgânica (MO), capacidade de troca catiônica (T) e areia fina (AF) (Coutinho et al. 2015). Já entre tipos de habitats de campos rupestres, as espécies de FMA estão correlacionadas com silt (Silt), areia grossa (AG) e cascalho. No entanto, neste trabalho verificamos que, ao adicionar variáveis (altitude, habitat e solo de campos rupestres, riqueza e abundância de plantas), este aspecto da correlação alterou-se, as espécies de FMA estão correlacionadas com variáveis edáficas como a saturação por soma de base (V), areia fina (AF) e também pela altitude. Essas correlações em resposta às propriedades do solo são importantes componentes nos estudos das atividades de FMA nos campos rupestres ao longo do gradiente altitudinal, demonstrando que esses fungos podem estar presentes no ambiente nestas condições edáficas.

A composição de espécies de FMA mostrou-se correlacionadas com duas espécies vegetais: *Neea theifera* e *Byrsonima intermédia*, espécies vegetais que ocorrem em campos rupestres (Giulietti et al., 1987; Mota et al., 2016). Estas espécies vegetais estão entre as mais abundantes em campos rupestres (Mota et al., 2016) e contribuem para explicar a distribuição de espécies de FMA em campos rupestres. Contudo, estudos sobre as relações entre as espécies vegetais endêmicas e FMA se fazem altamente necessárias neste momento, bem como entender a natureza desta relação sob o prisma de vista adaptativo e fisiológico.

A composição de espécies de FMA sofre variações entre os habitats, tem-se, com isso, heterogeneidade na distribuição dos FMA, uma vez que esta heterogeneidade está condicionada pelas propriedades do solo como por exemplo, o teor de potássio, de areia fina e de alumínio que variaram entre os habitats, condicionados pela interação com altitude. Dessa forma, a diferença do tipo de solo nos habitats entre as altitudes pode ter influenciado no estabelecimento dos FMA, pois a variação de altitude promove uma heterogeneidade na formação do gradiente edáfico que altera a composição de espécies (Trufem et al., 1989). De acordo com Coutinho et al. (2015), o grau de similaridade das espécies de FMA entre os tipos de habitats parece ser estruturado em função do solo. Isto provavelmente se deve à similaridade do teor das propriedades do solo encontradas neste trabalho como por, exemplo, pH, o silte, argila e matéria orgânica. Além disso, a similaridade entre os habitats de

afloramento rochoso e cerrado parece ser estruturado em função da altitude, pois estes habitats encontram-se ocorrem na mesma altitude, entre 900 e 1100m (Coutinho et al. 2015).

As espécies listadas como indicadoras de seus respectivos habitats podem também ocorrer em outros tipos de habitats do estudo, como as espécies *Claroideoglomus etunicatum*, *Glomus glomerulatum*, *Funeliformis geosporum* e *Glomus invermaium*, cuja distribuição prolongou-se até os habitats de altitudes elevadas, demonstrando maior plasticidade. Portanto, estas espécies foram consideradas indicadoras não restritas, já que sua ocorrência não se limita a um habitat. As espécies indicadoras não indicam espécies exclusivas de cada habitat. Além disso, estas espécies já foram registradas em áreas de campos rupestres, na Serra do Cipó (Carvalho et al., 2012). Assim, as espécies indicadoras possuem a capacidade de representar a realidade das condições ambientais de cada habitat de campos rupestres. No entanto, devido a fatores que podem determinar a ocorrência de uma espécie de FMA, como as propriedades do solo e altitude, os resultados encontrados não podem ser generalizados para outros ecossistemas. Dado que uma espécie indicadora em diferentes habitats e ao longo do gradiente altitudinal pode apresentar outras associações não avaliadas neste trabalho.

## **Conclusão**

A heterogeneidade ambiental associada à altitude e às características edáficas, foi determinante nas variações espaciais das espécies de FMA. Dessa forma, fatores abióticos condicionaram a organização da comunidade de FMA em campos rupestres. A presença de espécies indicadoras em cada habitat mostrou a associação e preferência entre espécies e habitats. Os resultados reforçam a ideia de que é necessário considerar preferencialmente as variações do solo que a vegetação associada aos campos rupestres, além disso, é necessário considerar também outras variações associadas com a altitude como a temperatura, precipitação, entre outras.

## **Agradecimentos**

Agradecemos a dois revisores anônimos pela leitura e críticas a este manuscrito e ao apoio no campo dos estagiários do Laboratório de Ecologia e Propagação Vegetal. À Mota G.S. pelo fornecimento dos dados da vegetação. Agradecemos ainda ao suporte financeiro do Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq: 40655/2008-5, 55 8250/2009-2, 30 3352/2010-8, 56

1883/2010-6) e da Fapemig (RDP-00048-10, APQ-04105-10), Natural Reserve Vellozia, à Fapemig pela bolsa concedida a ES Coutinho e à PPG-ECMVS/UFMG.

## Referências

- Barbosa, N.P.U., Fernandes, G.W., 2016. Rupestrian Grassland: Past, Present and Future Distribution., in: Fernandes, G.W. (Ed) Ecology and conservation of mountaintop grasslands in Brazil. Springer, New York, pp 531-544.
- Begon, M., Harper, J.L., Townsend, C.R., 1996. Ecology: individuals, populations and communities. 3rd ed. Blackwell, Oxford.
- Barbara, R.L.L., De Sousa, F.A., Fonseca, H.M.A., 2006. Fungos micorrízicos arbusculares: muito além da nutrição., in: Fernandes MS (Ed.). Nutrição mineral de plantas. SBCS, p. 53-88.
- Bryant, J.A., Lamanna, C., Morlon, H., Kerkhoff, A.J., Enquist, B.J., Green, J.L., 2008. Microbes on mountainsides: contrasting elevational patterns of bacterial and plant diversity. PNAS 105: 11505–11511.
- Caldeira, M.V.W., Silva, E.M.R., Franco, A.A., Zanon, M.L.B., 1999. Efeito de FMAs no desenvolvimento de duas leguminosas arbóreas. Cienc Flor 9:63-70.
- Carvalho, F., Souza, F.A., Carrenho, R., Moreira, F.M.S., Jesus, E.C., Fernandes, G.W., 2012. The mosaic of habitats in the high-altitude Brazilian rupestrian fields is a hotspot for arbuscular mycorrhizal fungi. Appl Soil Ecol 52:9-19.
- Conceição, A.A., Giulietti, A.M., 2002. Composição florística e aspectos estruturais de campo rupestre em dois platôs do Morro do Pai Inácio, Chapada Diamantina, Bahia, Brasil. Hoehnea 29:37-48.
- Conceição, A.A., Giulietti, A.M., Meirelles, S.T., 2007. Ilhas de vegetação em afloramentos de quartzito-arenito no Morro do Pai Inácio, Chapada Diamantina, Bahia, Brasil. Acta Bot Bras 21:335-347.
- Conceição, A.A., Pirani, J.R., 2007. Diversidade em quatro áreas de campos rupestres na Chapada Diamantina, Bahia, Brasil: espécies distintas, mais riquezas similares. Rodriguésia 58: 193-206.
- Correia, C.R.M.A., Reatto, A., Martins, E.S., Silva, E.M., Caldas, L.S., Fagg, J.F., 2004. Micorriza Arbuscular: Um bioindicador da fertilidade dos solos e da distribuição de árvores no Bioma Cerrado. Planaltina, Embrapa Cerrados, 169p.

- Coutinho, E.S., Fernandes, G.W., Berbara, R.L.L., Maia, H.M., Goto, B.T., 2015. Variation of arbuscular mycorrhizal fungal communities along an altitudinal gradient in rupestrian grasslands in Brazil. *Mycorrhiza*. 25, 627-638.
- De Cáceres, M., Legendre, P., 2009. Associations between species and groups of sites: indices and statistical inference. – *Ecology* 90: 3566–3574.
- Dick, C.W., Wright, S.J., 2005. Tropical mountain cradles of dry forest diversity. *PNAS* 102:10757-19758.
- Dufrêne, M., Legendre, P., 1997. Species assemblages and indicator species: the need for flexible asymmetrical approach. *Ecol Monogr* 67: 345-366.
- Fernandes, G.W., 2016a. Cerrado to rupestrian grasslands: patterns of species distribution and the forces shaping them along an altitudinal gradient., in: Fernandes GW. (Ed.). *Ecology and Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil*. Springer, New York, pp 345-377.
- Fernandes, G.W., 2016b. The megadiverse rupestrian grassland., in: Fernandes G.W. (Ed.) *Ecology and conservation of mountaintop grasslands in Brazil*. Springer, New York, pp 3–14.
- Fernandes, G.W., Oki, Y., Sanchez-Azofeifa, A., Faccion, G., Amaro-Arruda, H.C., 2011. Hail impact on leaves and endophytes of the endemic threatened *Coccoloba cereifera* (Polygonaceae). *Plant Ecol.*, 212(10): 1687-1697.
- Fernandes, G.W., Price, P.W., 1988. Biogeographical gradients in galling species richness: tests of hypotheses. *Oecologia* 76:161-167.
- Fernandes, G.W., Price, P.W., 1991. Comparison of tropical and temperate galling species richness: the roles of environmental harshness and plant nutrient status., in: Price, P.W., Lewinsohn, T.M., Fernandes, G.W., Benson, W.W. (Eds.). *Plant-animal interactions: evolutionary ecology in tropical and temperate regions*. Wiley and Sons. pp. 91-115
- Fierer, N., McCain, C.M., Meir, P., Zimmermann, M., Rapp, J.M., Silman, M.R, Knight, R., 2011. Microbes do not follow the elevational diversity patterns of plants and animals. *Ecology*, 92: 797-804.
- Giulietti, A.M., Menezes, N.L., Pirani, J.R., Meguro, M., Wanderley, M.G.L., 1987. Flora da Serra do Cipó, Minas Gerais: caracterização e lista de espécies. *Boletim de Botânica*. 9: 1-151.
- Hammer, O., Harper, D.A.T., Ryan, P.D., 2001. Past: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Paleont Electr*, 4:1-9.

- Kumar, A., Longino, J.T., Colwell, R.K., O'Donnell, S., 2009. Elevational Patterns of Diversity and Abundance of Eusocial Paper Wasps (Vespidae) in Costa Rica. *Biotropica*, 41: 338–346.
- Madeira, J.A., Fernandes, G.W., 1999. Reproductive phenology of sympatric *Chamaecrista* taxa of *Chamaecrista* (Leguminosae) in Serra do Cipó, Brazil. *J Trop Ecol* 15:463-479.
- Malhi Y, Silman M, Salinas N, Bush M, Meir P, Saatchi S (2010) Introduction: Elevation gradients in the tropics: laboratories for ecosystem ecology and global change research. *Glob Change Biol* 16: 3171-3175
- Martinelli, G., 2007. Mountain biodiversity in Brazil. *Rev Bras Bot* 30:587-597.
- McCune, B., Mefford, M.J., 1997. PC-ORD for Windows: Multivariate Analysis of ecological data – version 3.12. Oregon: MJM Software Design, Gleneden Beach.
- Menke, S.B., Harte, J., Dunn, R.R., 2014. Changes in ant community composition caused by 20 years of experimental warming vs. 13 years of natural climate shift. *Ecosphere* 5(!):1-17..
- Miranda, J.C.C., 2008. Cerrado: Micorriza arbuscular: ocorrência e manejo. Embrapa Cerrados, Planaltina, 169p.
- Mota, G.S., Mota, N.M., Coutinho, E.S., Luz G.R., Veloso, M.D.D.DM., Fernandes, G.W., Nunes, Y.R.F., 2016. Flora, estrutura e formas de vida das plantas lenhosas ao longo de um gradiente altitudinal de campo rupestre no sudeste do Brasil.
- Moreira, M., Baretta, D., Tsai, S.M., Gomes-da-Costa, S.M., Cardoso, E.J.B.N., 2007. Biodiversity and distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in *Araucaria angustifolia* Forest. *Sci Agric* 64:393-399.
- Negreiros, D., Fernandes, G.W., Berbara, R.L.L., Rodarte, L.H.O., Barbosa, N.P.U., 2011. Caracterização físico-química de solos quartzíticos degradados e áreas adjacentes de campo rupestre na Serra do Cipó, MG, Brasil. *Neotrop. Biol. Conserv.* 6, 156-161.
- Negreiros, D., Fernandes, G.W., Silveira, F.A.O.S., Chalub, S., 2009. Seedling growth and biomass allocation of endemic and threatened shrubs of rupestrian fields. *Acta Oecol* 35: 301-310.
- Oki, Y., Goto, B.T., Jobim, K., Rosa, L.H., Ferreira, M.C., Coutinho, E.S., Xavier, J. H.A., Carvalho, F., Moreira, F.M.S., Souza, F.A., Berbara, R.L. Fernandes, G.W., 2016. Arbuscular Mycorrhiza and Endophytic Fungi in Ruspestrian Grasslands., in: Fernandes,

- G.W. (Ed). Ecology and Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil. Springer, pp 157-179.
- Pianka, E.R., 1966. Latitudinal gradients in species diversity: A review of concepts. *Am Nat* 100: 33-46.
- R Development Core Team, 2012. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria : the R Foundation for Statistical Computing. ISBN: 3-900051-07-0. Available online at <http://www.R-project.org/>.
- Read, Q.D., Moorhead, L.C., Swenson, N.G., Bailey, J.K., Sanders, N.J., 2014. Convergent effects of elevation on functional leaf traits within and among species. *Funct Ecol*, 28:37–45.
- Reis, M.F., Krugner, T.L., 1990. Avaliação do efeito de fungos formadores de micorrizas vesicular-arbusculares no desenvolvimento de *Eucalyptus grandis* em condições de casa de vegetação. *Embrapa*, Piracicaba, 43/44: 79-83.
- Rolstad, J., Gjerde, I., Gundersen, V.S. and Saeterdal, M., 2002. Use of Indicator species to Assess Forest Continuity: a Critique. *Conserv Biol* 16, 253-257.
- Schaefer, C.E.G.R., Corrêa, G.R., Candido, H.G., Arruda, D.M., Nunes, J.A., Araujo, R.W., Rodrigues, P.M.S., Fernandes Filho, E.I., Pereira, A.F.S., Brandão, P.C., Neri, A.V., 2016. The Physical Environment of Rupestrian Grasslands (Campos Rupestres) in Brazil: Geological, Geomorphological and Pedological Characteristics, and Interplays. in: Fernandes, G.W. (Ed) Ecology and conservation of mountaintop grasslands in Brazil. Springer, New York, pp 15-53.
- Sieverding, E., 1991. Ecology of VAM fungi in tropical agrosystems. *Agr Environ* 29:369-390.
- Souza, F.A., Silva, I.C.L., Berbara, R.L.L., 2007. Fungos micorrízicos arbusculares: muito mais diversos do que se imaginava., in: Moreira, F.M.S., Siqueira, J.O., Brussard, L. (Eds). Biodiversidade do Solo em Ecossistemas Brasileiros. UFLA, Lavras, pp 483-536.
- Trufem, S.F.B., Otomo, H.S., Malatinszki, S.M.M., 1989. Fungos micorrízicos vesículo-arbusculares em rizosferas de plantas em dunas do Parque Estadual da Ilha do Cardoso, São Paulo, Brasil. *Acta Bot Bras* 3:141-152.
- Vargas, M.A.T., Hungria, M., 1997. Biologia dos solos dos cerrados. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 400p.

Whitmore, T.C., 1990. An introduction to tropical rain forests. Oxford University Press, Oxford. 226p.

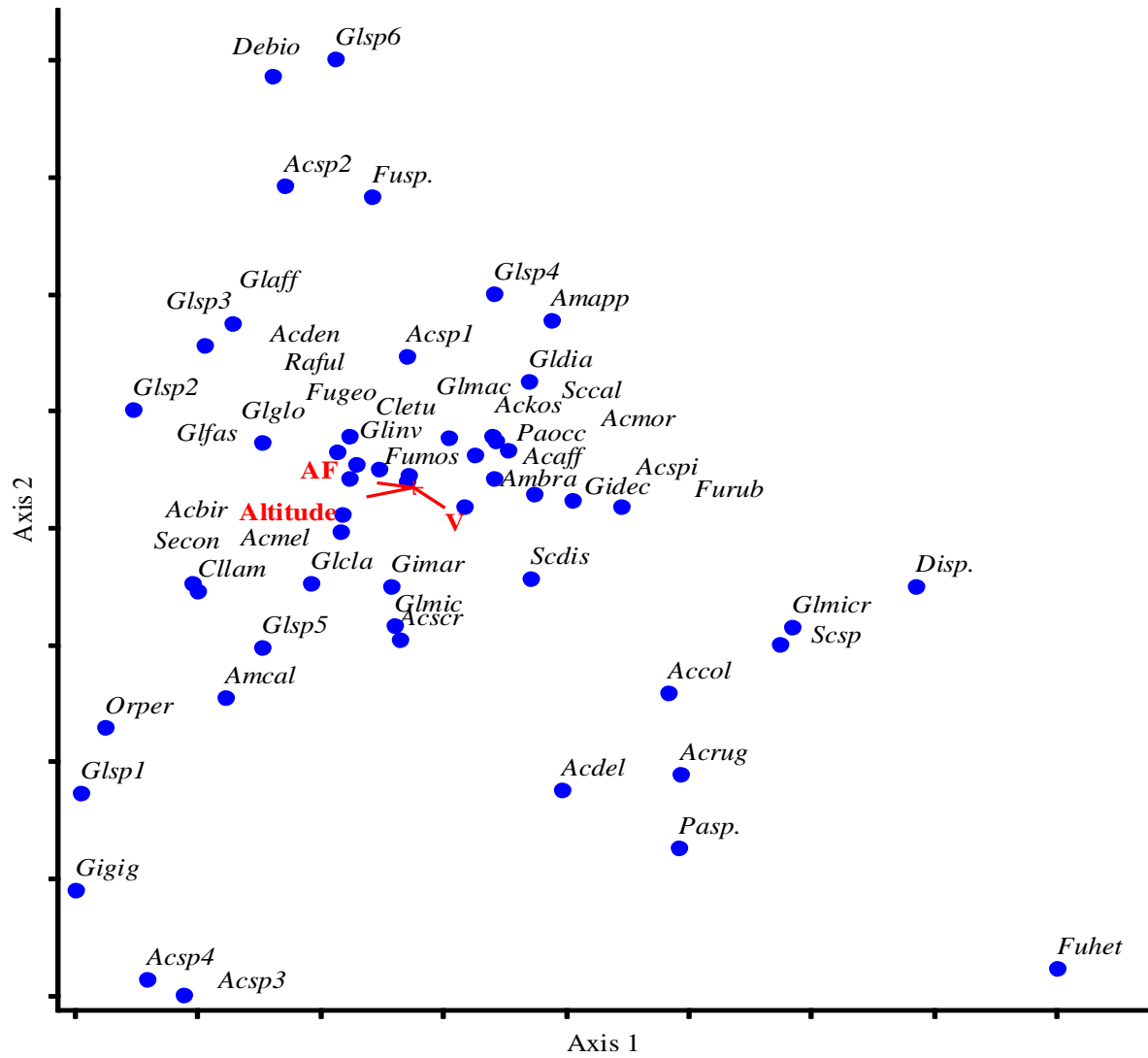
**Tabela 1.** Correlação das propriedades do solo ao longo do gradiente de altitude do complexo rupestre da Serra do Cipó, Minas Gerais. pH em água (pH), teores de potássio (K), fósforo (P-Mehlich), fósforo remanescente (P-rem), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), hidrogênio + alumínio (H+Al), soma de bases (SB), saturação por bases (V), capacidade de troca catiônica efetiva (t), saturação por alumínio (m), capacidade de troca catiônica a pH 7,0 (T), matéria orgânica (MO), e proporções de areia grossa (2 a 0,2 mm), areia fina (0,2 a 0,05 mm), silte (0,05 a 0,02mm) e argila (< 0,02mm).

	pH	PMe	Pre	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	m	T	V	MO	AG	AF	Silt	Arg
pH	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PMe	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pre	-	-	-	-0,52	-	-	-0,6	-0,61	-	-0,59	-0,52	-0,61	-	-0,62	-	-	-	-
K	-	-	-0,52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	-	-	-	-	-	0,82	-	-	0,89	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	-	-	-	-	0,82	-	-	-	0,85	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	-	-	-0,6	-	-	-	-	0,78	-	0,99	0,8	0,79	-0,63	0,8	-	-	-	-
H+Al	-	-	-0,61	-	-	-	0,78	-	-	0,77	0,7	0,99	-0,84	0,84	-0,63	0,5	-	-
SB	-	0,5	-	-	0,89	0,85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
t	-	-	-0,59	-	-	-	0,99	0,77	-	-	0,74	0,78	-0,57	0,79	-	-	-	-
m	-	-	-0,52	-	-	-	0,8	0,7	-	0,74	-	0,69	-0,78	0,65	-	-	-	-
T	-	-	-0,61	-	-	-	0,79	0,99	-	0,78	0,69	-	-0,82	0,85	-0,62	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-0,63	-0,84	-	-0,57	-0,78	-0,82	-	-0,7	0,64	-0,61	-	-
MO	-	-	-0,62	-	-	-	0,8	0,84	-	0,79	0,65	0,85	-0,7	-	-	-	-	-
AG	-	-	-	-	-	-	-	-0,63	-	-	-	-0,62	0,64	-	-	-0,71	-	-
AF	-	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-	-0,61	-	-0,71	-	-0,53	-
Silt	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,53	-	-
Arg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

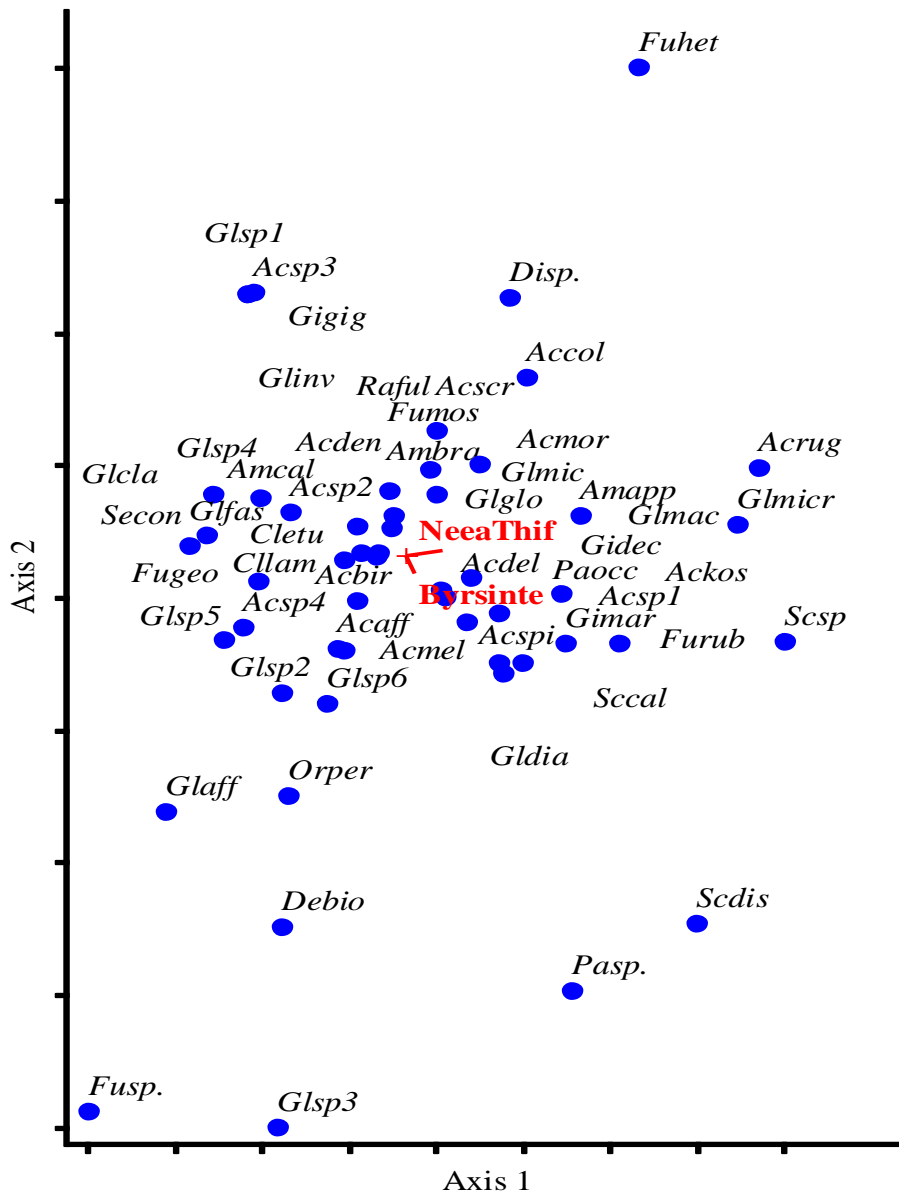
**Tabela 2** Espécies de fungos micorrízicos arbusculares em habitats de afloramento rochoso (AR), campo rupestre (CR) e cerrado (CE) do complexo rupestre na Serra do Cipó, Minas Gerais. (\* espécies indicadoras)

Espécies	Abrev.	Habitats		
		AR	CE	CR
<i>Acaulospora</i> sp.1	<i>Acsp1</i>	X	X	X
<i>Acaulospora</i> sp.2	<i>Acsp2</i>	X*	X*	X*
<i>Acaulospora</i> sp.3	<i>Acsp3</i>	-	-	X
<i>Acaulospora</i> sp.4	<i>Acsp4</i>	-	-	X
<i>Acaulospora bireticulata</i>	<i>Acbir</i>	X	X	X
<i>Acaulospora colossica</i>	<i>Accol</i>	X	X	X
<i>Acaulospora delicata</i>	<i>Acdel</i>	X*	X*	X*
<i>Acaulospora denticulata</i>	<i>Acden</i>	X*	X	X*
<i>Acaulospora koskei</i>	<i>Ackos</i>	X	X	X
<i>Acaulospora mellea</i>	<i>Acmel</i>	X	X	X
<i>Acaulospora morrowiae</i>	<i>Acmor</i>	X	X	X
<i>Acaulospora rugosa</i>	<i>Acrug</i>	-	-	X
<i>Acaulospora scrobiculata</i>	<i>Acscr</i>	X	-	X
<i>Acaulospora spinosa</i>	<i>Acspi</i>	X	X	X
<i>Ambispora appendicula</i>	<i>Amapp</i>	X	X	X
<i>Ambispora brasiliensis</i>	<i>Ambra</i>	X*	X*	X*
<i>Ambispora callosa</i>	<i>Amcal</i>	X*	X	X*
<i>Claroideoglosum etunicatum</i>	<i>Cletu</i>	X*	X*	X*
<i>Claroideoglosum lamellosum</i>	<i>Cllam</i>	X	-	X
<i>Dentiscutata biornata</i>	<i>Debio</i>	X	-	X
<i>Diversispora</i> sp.	<i>Disp.</i>	X	X*	X
<i>Funneliformis geosporum</i>	<i>Fugeo</i>	X*	X*	X*
<i>Funneliformis mosseae</i>	<i>Fumos</i>	X	X	X*
<i>Funneliformis</i> sp.	<i>Fusp.</i>	-	-	X
<i>Fuscutata heterogama</i>	<i>Fuhet</i>	-	-	X
<i>Fusfucata rubra</i>	<i>Furub</i>	X	X	X
<i>Gigaspora decipiens</i>	<i>Gidec</i>	X	X	X
<i>Gigaspora gigantea</i>	<i>Gigig</i>	-	-	X
<i>Gigaspora margarita</i>	<i>Gimar</i>	-	X	X
<i>Glomus clarus</i>	<i>Glcla</i>	-	X	X
<i>Glomus diaphanus</i>	<i>Gldia</i>	X*	X*	X
<i>Glomus fasciculatus</i>	<i>Glfas</i>	X	-	X
<i>Glomus glomerulatum</i>	<i>Glglo</i>	X*	X*	X*
<i>Glomus invermaium</i>	<i>Glinv</i>	X*	X*	X*
<i>Glomus macrocarpum</i>	<i>Glmac</i>	X*	X*	X*
<i>Glomus microaggregatum</i>	<i>Glmic</i>	X	X*	X

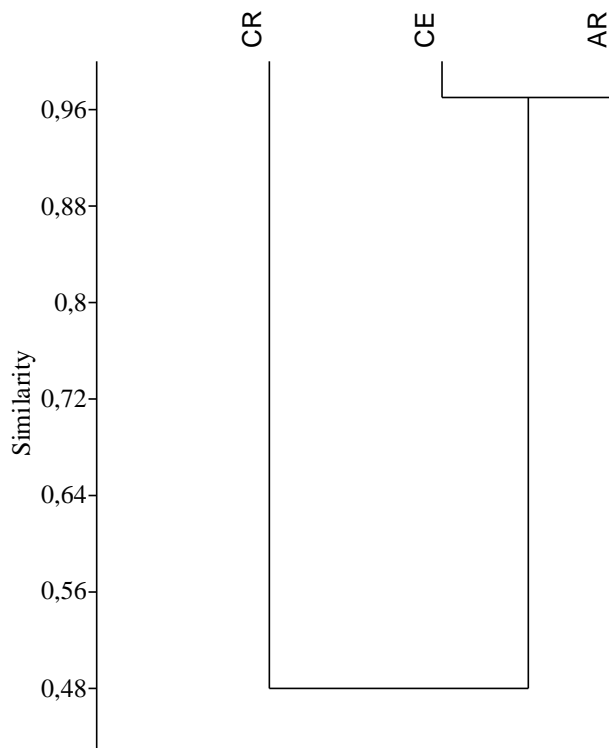
<i>Glomus microcarpum</i>	<i>Glmicr</i>	X	X	X
<i>Glomus</i> sp. 1	<i>Glsp1</i>	-	-	X
<i>Glomus</i> sp. 2	<i>Glsp2</i>	X	-	X
<i>Glomus</i> sp. 3	<i>Glsp3</i>	-	-	X
<i>Glomus</i> sp. 4	<i>Glsp4</i>	X	X	X
<i>Glomus</i> sp. 5	<i>Glsp5</i>	X*	-	X*
<i>Glomus</i> sp. 6	<i>Glsp6</i>	X	-	X
<i>Orbispora pernambucana</i>	<i>Orper</i>	-	-	X
<i>Pacispora</i> sp.	<i>Pasp.</i>	-	X	-
<i>Paraglomus occultum</i>	<i>Paocc</i>	X	X	X
<i>Racocetra fulgida</i>	<i>Raful</i>	X	X	X
<i>Scutellospora calospora</i>	<i>Sccal</i>	X	X	X
<i>Scutellospora dispurpurescens</i>	<i>Scdis</i>	-	X	X
<i>Scutellospora</i> sp.	<i>Scsp</i>	-	X	-
<i>Septoglomus constrictum</i>	<i>Secon</i>	X	-	X



**Figura 1.** Diagrama de ordenação (ACC) das espécies de FMA do complexo rupestre da Serra do Cipó, Minas Gerais, ao longo do gradiente altitudinal em relação às variáveis do solo (V= saturação de base; AF= areia fina) e altitude.



**Figura 2.** Diagrama de ordenação (ACC) das espécies de FMA do complexo rupestre da Serra do Cipó, Minas Gerais, ao longo do gradiente altitudinal, em relação a duas espécies vegetais *Neea theifera* (*Neea Thif*) e *Byrsonima intermédia* (*Byrsinte*).



**Figura 3.** Dendrograma de similaridade de fungos micorrízicos arbusculares entre os habitats de afloramento rochoso (AR), campo rupestre (CR) e cerrado (CE) no complexo rupestre da Serra do Cipó, Minas Gerais, empregando o índice de similaridade Raup-Crick.

## CAPÍTULO IV

### **Valoração do serviço ecossistêmico de estocagem de fungos micorrízicos arbusculares em campos rupestres**

Etiene Silva Coutinho (1), Rodrigo Fagundes Braga (2), Ana Carolina Neves (3), G. Wilson Fernandes (4), Ricardo Luís Louro Berbara (5), Thiago Sanna Freire Silva (6)

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre, Universidade Federal de Minas Gerais, ICB/Departamento de Biologia Geral, C. Postal 486, 30161-970 Belo Horizonte, MG, Brasil

<sup>2</sup> Universidade Federal de Lavras, Departamento de Biologia, Laboratório de Ecologia e Conservação de Invertebrados, C. Postal 3037, 37200-000, Lavras, MG, Brasil

<sup>3</sup> Universidade Federal de Minas Gerais, ICB/Departamento de Biologia Geral, Laboratório Ecologia Evolutiva & Biodiversidade, C. Postal 486, 30161-970 Belo Horizonte, MG, Brasil

<sup>4</sup> Department of Biology, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA

<sup>5</sup> Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, IA/Departamento de Solos, Laboratório de Biologia de Solos, 23890-000 Seropédica, RJ, Brasil

<sup>6</sup> Universidade Estadual Paulista (UNESP), Departamento de Geografia, Instituto de Geociências e Ciência Exatas (IGCE), Ecosystem Dynamics Observatory, C. Postal 199, 13506-900, Rio Claro, SP, Brasil

Autor para correspondência: [gw.fernandes@gmail.com](mailto:gw.fernandes@gmail.com)

*Formatado segundo as normas da Ecological Economics*

## Resumo

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) são componentes essenciais da maioria dos ecossistemas terrestres. Os campos rupestres são importantes para a conservação pois sustentam grande biodiversidade de FMA. Neste estudo, determinou-se o valor monetário dos serviços ecossistêmicos de armazenamento de FMA por campos rupestres localizados na porção Sul da Cadeia do Espinhaço, Brasil. O valor do armazenamento de FMA *in situ* foi avaliado avaliando os custos de coleta de solo, extração e identificação de FMA, produção de inóculos e a manutenção de uma coleção viva de espécies de FMA (*ex situ*). Para isso, foram utilizados dados de densidade e de riqueza de FMA no solo ao longo de um gradiente altitudinal de 800m a 1500m, com 100m intervalos. Estimou-se os gastos com materiais permanentes, materiais de consumo e recursos humanos necessários para manter coleções de FMA viáveis. As 51 espécies de FMA identificadas foram distribuídas da seguinte forma: 26 a 800m de altitude, 28 a 900 metros, 36 a 1000m, 37 em 1100m, 37 a 1200m, 35 em 1300m e 32 em 1400m. O custo médio para manter viável cada espécie de FMA foi de US \$ 116,64/ano. Os custos para manter coleções micorrízicas de diferentes altitudes diferem de acordo com a diversidade de FMA. Manutenção de coleções viáveis derivados de altitudes intermediárias (1100m a 1200m) foi o mais alto (US \$ 965,51/ano/km<sup>2</sup>). Os dados sugerem que os processos de produção de inoculantes e manutenção da coleção de FMA *ex situ* são, provavelmente, mais caros do que investir na conservação de campos rupestres. O valor dos serviços ecossistêmicos dos campos rupestres para armazenar biodiversidade de FMA é subestimada porque a diversidade e endemismo da FMA provavelmente acompanha a grande diversidade de vegetação e endemismo encontrada neste ecossistema.

**Palavras-chave:** campos rupestres, fungos micorrízicos arbusculares, gradiente altitudinal, serviços ecossistêmicos, solos, valoração.

## Abstract

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) are essential constituents of most terrestrial ecosystems. Rupestrian grassland are important for the conservation of AMF as they sustain great AMF biodiversity. In this study, we determined the monetary value of the ecosystemic benefits of AMF storage by rupestrian fields located at the southern area of the Espinhaço mountain range in Brazil. The value of this *in situ* AMF storage was evaluated by estimating the costs of collection, extraction, identification, inoculant production and the maintenance of a living collection of AMF species (*ex situ*). To this end, we used AMF density and biodiversity data on the soil along an altitude gradient from 800m to 1500m high with 100m intervals. We estimated the expenses with permanent materials, consumables and human resources needed to maintain viable AMF collections. The 51 AMF species identified were distributed as follows: 26 at 800m of altitude, 28 at 900m, 36 at 1000m, 37 at 1100m, 37 at 1200m, 35 at 1300m and 32 at 1400m. The average cost to maintain viable each AMF species was US\$116.64/year. The costs to maintain mycorrhizal collections from different altitudes differed according to the AMF diversity. Maintenance of viable collections derived from intermediate altitudes (1100m to 1200m) was the highest (US\$965.51/year/Km<sup>2</sup>). The data suggest that processes of inoculant production and AMF collection maintenance *ex situ* are probably costlier than investing in the conservation of rupestrian grassland. The value of rupestrian fields' ecosystemic services for storing AMF biodiversity is underestimated because the diversity and endemism of AMF probably accompanies the large vegetation diversity and endemism found in this ecosystem.

**Key words:** valuation, ecosystemic services, arbuscular mycorrhizal fungi, soils, altitude gradient, rupestrian grassland.

## 1. Introdução

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) formam um grupo diverso tanto em termos de número de espécies, como de funções e serviços ecossistêmicos que exercem. Os FMA atuam na estruturação do solo; aumento da absorção de nutrientes pelas plantas; tolerância ao aumento de patógenos na raiz e ao estresse hídrico; aumento da diversidade de espécies vegetais e funcionamento dos ecossistemas; recuperação de áreas degradadas; bem como na restauração ambiental (Barr, 2012; Berbara et al., 2006; Carneiro et al., 1998; Dandan and Zhiwei, 2007; Dodd, 2000; Emam 2016; Gianinazzi et al., 2010; Pouyu-Rojas et al., 2006; Siqueira et al., 2002; Souza et al., 2007).

Uma das maiores diversidade de FMA em ecossistemas foi recentemente descrita e encontrada em campos rupestres. Carvalho et al. (2012) encontraram 49 espécies de FMA em diferentes habitats de campos rupestres enquanto Coutinho et al. (2015) encontraram uma diversidade de 51 espécies de FMA ao longo do gradiente altitudinal, representando 23% da diversidade mundial de FMA. Isto indica que nos solos pobres como os da Serra do Cipó, as micorrizas exercem um papel importante na manutenção fisiológica das plantas e possivelmente na diversidade de espécies (Oki et al., 2016). Com uma riqueza tão elevada de FMA, os campos rupestres são importantes para a conservação deste grupo biológico, por armazenarem naturalmente dezenas de espécies de FMA as quais, de outra forma, exigiriam um custo monetário elevado para preservação *ex situ*.

A valoração do serviço ecossistêmico de estocagem de FMA pode contribuir para destacar a importância de preservarem-se os solos dos campos rupestres, pois estes representam um repositório de espécies. Assim, sabendo-se que áreas de campos rupestres estão degradadas, principalmente pela mineração, é necessário incorrer em elevados custos

monetários para sua restauração e recuperação de serviços ecossistêmicos. Além disso, a valoração pode contribuir para a tomada de decisão sobre o uso do solo e se é vantajoso manter o ecossistema natural ou convertê-lo para outros usos (Admiraal et al., 2013; Freeman, 2003) e ainda mostrar a importância da conservação ambiental (BDAC, 2005; Swart et al. 2001). Entretanto, embora estudos da diversidade de microorganismos no solo tenham se tornado mais comuns nos anos recentes, quase nada se sabe sobre a valoração deste grupo funcional (Santana et al., 2014). Pela primeira vez Resende et al. (2013) avaliaram economicamente o serviço fornecido para manter a flora dos campos rupestres, tendo como área de estudo o Parque Nacional da Serra do Cipó, os autores estimaram o valor monetário do serviço de estocagem da diversidade de plantas dos campos rupestres chegando a US\$ 25.260/ano.

De acordo com Meinard and Grill (2011), a valoração é reconhecida quando há procura e mercado para comercialização da biodiversidade, e assim, passa a ser notada a importância e o custo da biodiversidade pela sociedade. No processo de valoração como estratégia de conservação ambiental é imprescindível uma integração da economia com a política pública de desenvolvimento. Isto faz com que a opinião política e pública participe da construção do valor dos serviços ecossistêmicos associados aos campos rupestres, sensibilizando esses participantes para sua conservação. Entretanto, o valor econômico de muitos bens e serviços disponibilizados pelos ecossistemas não são inteiramente refletidos pelo mercado ou nem sempre quantificável (BDAC, 2005).

O valor do serviço de estocagem da biodiversidade fornecida pelos ecossistemas permite uma comparação direta com os valores econômicos do mercado (Hussain & Tschirhart, 2013). O comércio de FMA está restrito a algumas espécies de importância agrícola, devido a relação fungo-planta. No entanto, não há mercado amplo para

comercialização de FMA (Santana et al., 2014) devido ainda ao pouco conhecimento desta simbiose e pelos custos envolvidos em processos de inoculação. A maioria das espécies de FMA estocadas em campos rupestres não é comercializada, e sua valoração se justifica não pelo uso comercial imediato, mas pelo seu valor de uso futuro, tanto para conservação como restauração de áreas degradadas de campos rupestres. O risco é que, se estes valores não estão incluídos no processo de tomada de decisão, a decisão final pode favorecer espécies que têm um valor comercial e gerar consequências negativas para a conservação da biodiversidade (BDAC, 2005).

De acordo com Santana et al. (2014), em alguns países como o Brasil, há restrição na produção, em fase de investigação ou inexistência de comercialização de FMA. No entanto, inóculos de FMA são comercializados em outros países, sob diversos nomes comerciais como Mycorise, Endorize, Endomycorrhizal inoculant, AgBio-Endos, Rhizanova, BuRize, Mycor, Mycogold, AM 120 e Mycosim-Tri Ton (Santana et al., 2014). As espécies de FMA comercializáveis e/ou disponibilizadas são restritas, atingindo poucas espécies com interesse em aplicação em cultivos como *Glomus intraradices*, *G. aggregatum*, *G. mosseae*, e *Clarodeioglomus etunicatum*. Sendo assim, o conhecimento da biodiversidade, da sua funcionalidade bem como do valor de estocagem das espécies nativas e diversificadas de FMA em ecossistemas naturais se tornam informações cada vez mais importantes.

Diante da elevada diversidade de FMA encontrada em áreas de campos rupestres, este trabalho teve como objetivo determinar o valor monetário da estocagem de FMA em solos de um ambiente extremo como os campos rupestres. Sabendo que existe um custo de produção e manutenção *ex situ* de micorrizas, este trabalho determinou o valor da estocagem através dos custos gastos na coleta de solo, extração, identificação, produção de inóculos em laboratório e manutenção de espécies de FMA em micotecas. Em seguida, o valor foi

calculado para cada faixa altitudinal e estimado para a porção sul da Cadeia do Espinhaço onde está localizada a Serra do Cipó, Minas Gerais. Também comparou o valor de produção de inóculo com o valor comercial de FMA no mercado, a partir do conhecimento da diversidade de FMA ao longo do gradiente altitudinal de campos rupestres e da dificuldade de multiplicação e manutenção de FMA, uma vez que o preço existente no mercado não revela seu valor real (BDCA, 2005).

## **2. Materiais e métodos**

### **2.1 Área de estudo**

O estudo foi conduzido na Serra do Cipó, município de Santana do Riacho, Minas Gerais, entre as latitudes 19°10'S e 19°20'S e longitude de 43°40' W. Com altitudes que variam entre 700 e 1670 m, a Serra do Cipó localiza-se na porção sul da Serra do Espinhaço. O clima da região é do tipo Cwb (clima mesotérmico com verões brandos e estação chuvosa no verão) na classificação de Köppen, com temperaturas médias entre 17,4° e 19,8° C (Galvão and Nimer, 1965). A precipitação anual é de 1500 mm, com inverno seco de três a quatro meses, e período úmido de sete a oito meses (Madeira and Fernandes, 1999). Seus solos são normalmente rasos, arenosos, secos e com pouca retenção de água (Nogueira et al., 2011).

A Serra do Cipó é formada em grande proporção por substratos rochosos de quartzito-arenito e solos arenosos, originando uma paisagem uniforme à distância, formada por campos extensos e por porções de rocha com pequenas ilhas de vegetação (Conceição et al., 2007). Campos rupestres compreendem vários tipos de vegetação, que vão desde brejo arenoso, que sofre encharcamentos periódicos na estação chuvosa e possui vegetação herbácea ocorrendo de forma contínua; brejo turfoso, que permanece constantemente encharcado durante a estação chuvosa e onde há o predomínio do estrato herbáceo ocorrendo

de forma contínua; afloramento rochoso com altas proporções de rocha exposta e vegetação herbáceo-arbustiva; campo rupestre com a cobertura da superfície do solo por pequenos fragmentos de rochas quartzíticas; e o cerrado, cuja dominância de espécies em formas arbóreas-arbustivas declina com o aumento de altitude e estágio de menor desenvolvimento do perfil do solo, passando gradativamente ou bruscamente a campo rupestre (Alves and Kolbek, 2010; Carvalho et al., 2012; Giuliatti et al., 1987; Medina and Fernandes, 2007;). Além disso, nas áreas úmidas ao longo de rios e riachos encontram-se as matas de galeria, e principalmente a vertente oriental, os capões de mata.

## **2.2 Amostragem microbiológica**

A diversidade de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) em campos rupestres foi obtida a partir de Coutinho et al. (2015). A diversidade de FMA foi encontrada a partir de coletas de solos de campos rupestres distribuídos em sete pontos altitudinais, 800 m até 1400 m. No total, foram identificadas 51 espécies, sendo 26 espécies a 800 m de altitude, 28 a 900 m, 36 a 1000 m, 37 a 1100 m, 37 a 1200 m, 35 a 1300 m e 32 a 1400 m (veja Coutinho et al., 2015). Amostras de solo foram coletadas na camada superficial (0-0,2 m de profundidade) por parcela e altitude nos campos rupestres.

A extração de FMA do solo baseou-se na técnica de peneiragem úmida, seguida de centrifugação em gradiente de sacarose (50%) (Jenkins, 1964). Posteriormente, os glomerosporos foram separados por morfoespécies, de acordo com as semelhanças morfológicas (cor e tamanho), em placas de Petri e transferidos para lâminas (previamente identificadas) com PVLG (álcool polivinílico-lactoglicerol) e PVLG + Melzer 01:01 (vol / vol) (Morton et al., 1993). A identificação das espécies de FMA foi feita a nível de espécie com observações de caracteres morfológicos, através de um microscópio óptico (100x a

400x), utilizando-se literatura especializada (Schenck and Perez, 1988) e em sites específicos (<http://schuessler.userweb.mwn.de/amphylo/>; <http://www.zor.zut.edu.pl/Glomeromycota/Blaskowski%20Janusz.html>; <http://invam.wvu.edu/>). Após a identificação, foi determinada a riqueza de espécies de FMA, avaliada pelo número de espécies presentes em 50g de solo em cada amostra por altitude e o número total de espécies de FMA identificadas taxonomicamente (veja Coutinho et al. 2015).

A transformação de um FMA em um solo-inóculo artificial após a coleta de fungos naturais e identificação destes em microscópio, foi realizada pela multiplicação de FMA em solo, formando-se os inóculos; separação em espécies; e criação e manutenção do banco em coleção de fungos (micoteca) (Azcón-Aguilar and Barea, 1996; Berbara and Fonseca, 1996).

Não há consenso na literatura sobre o número de glomerosporos utilizados para manter uma espécie viável em coleções de micorrizas. Como a comunidade de FMA apresenta em média 600 glomerosporos por 50 g de solo em campos rupestres nativos (para detalhes veja Coutinho et al., 2015), estimamos que 600 glomerosporos seja um valor adequado para a manutenção de uma população viável em coleção durante um ano. Geralmente os trabalhos com inoculação de FMA utilizam cerca de 200 glomerosporos por vaso (Silva et al., 1998; Novais and Siqueira, 2009; Coelho et al., 2012; Janousková et al., 2013). No entanto, os campos rupestres apresentam alta densidade de glomerosporos (Carvalho et al., 2012; Coutinho et al., 2015; Oki et al., 2016) diferentemente do que ocorre em outros ecossistemas. Dessa forma, pelo princípio da parcimônia, consideramos que cada espécie apresente uma densidade de 50 glomerosporos por kg de solo-inóculo, e que sejam necessários 15 kg de solo-inóculo para atingir o valor estabelecido de 600 glomerosporos, para a conservação de cada espécie de FMA em coleção. A manutenção da coleção de FMA

consiste em multiplicação de esporos pela preparação culturas-armadilha, utilizando solo misturado com vermiculita/ areia na proporção 2:1 e inóculos de FMA e colocado em vasos, mantidos durante três ciclos por cerca de quatro meses. Foi utilizada *Urochloa decumbens* Stapf. (Poaceae) como planta hospedeira para a multiplicação dos FMA, pois apresenta crescimento perene, rusticidade e facilidade de manutenção das plantas. Esta espécie tem sido empregada para multiplicação de várias espécies de FMA, nas coleções (Smith and Read, 2008).

### 2.3 Valoração da estocagem de fungos micorrízicos arbusculares

O valor da estocagem (VE) das 51 espécies de FMA em cada fase: coleta de solo em campo, extração e identificação de FMA, produção de solo-inóculo e manutenção das coleções vivas em micotecas foi calculado a partir dos custos relativos à aquisição de material de consumo (MC), material permanente (MP), e com recursos humanos (RH) (descritos no Anexo 1), utilizando-se a seguinte fórmula:

$$VE = MC+MP+RH$$

Em seguida o valor foi calculado por espécie, utilizando-se a seguinte fórmula:

$$VE = \frac{MC+MP+RH}{51\text{espécies}}$$

Foram calculados os custos relativos aos materiais utilizados durante a coleta durante três dias, utilizando três pessoas, alojamento, alimentação e combustível. Para extração e identificação de FMA, foram calculados os custos gastos com os materiais,

utilizando duas pessoas para o trabalho, durante 30 dias (veja Coutinho et al., 2015). Também foi calculado o custo relativo à identificação molecular das espécies de FMA para comparação, pois há falta de taxonomistas especializados na identificação.

O valor da estocagem de FMA foi projetado através do custo estimado para manter as espécies vivas durante um ano em micotecas. Para a estimativa dos custos relativos à manutenção das coleções vivas em micotecas, informações relacionadas à produção de solo-inóculo e à manutenção foram fornecidas pela Embrapa Agrobiologia Seropédica/UFRRJ. Estes custos foram considerados como custo de reposição de FMA no caso de restauração em solos de campos rupestres e considerados como valor de estocagem ao se conservar os solos destes ambientes.

A partir dos custos de cada fase: coleta de solo em campo, extração e identificação de FMA, produção de inóculo e manutenção em micoteca, o valor da estocagem de uma espécie foi calculado e depois projetado por altitude, de acordo com o número de espécies de FMA encontradas em cada altitude. Cada altitude corresponde à aproximadamente a 1,3 Km<sup>2</sup>, dessa forma, foram calculados os custos de estocagem por altitude (VA), a partir do número total de espécies (RT) e o número de espécies por altitude (RA) encontradas para cada Km<sup>2</sup> e para o total da área de cada faixa altitudinal (FA) (800 – 1400 m) ao longo da porção sul da Cadeia do Espinhaço (Tabela 1), utilizando-se a seguinte fórmula:

$$VA = \frac{\sum(MC+MP+RH)}{RT*RA}$$

$$FA = VA * 1,3$$

Os preços foram obtidos em reais (R\$) e transformados em dólar (US \$ 1 = 3,52 R\$).

## **2.4 Comparação com valor de mercado**

O custo de produção de solo-inóculo/espécie de fungos micorrízicos arbusculares foi projetado para 1 kg de solo-inóculo. O valor foi comparado com o custo de comercialização de inóculos destes microorganismos de 11 marcas no mercado: BioAg Endos, BioOrganics Endomycorrhizal Inoculant, Endomycorrhizal inoculant, MycoApilly, Mycogold, Mycorrhiza seed inoculante, Mycorrhiza (VAM) Inoculant, Mycorrhizal, Mycosym-Tri Ton, Rhizanova Inoculant e VAM Endo-Mix.

## **3. Resultados**

### **3.1 Custo da Estocagem de Coleção de Referência *Ex situ***

Para coleta das 51 espécies de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) ao longo do gradiente de altitude de campos rupestres na Serra do Cipó, o custo total (material permanente, material de consumo e recursos humanos para 51 espécies) durante a fase de coleta de solo foi de US\$ 335,12. O maior custo foi com os recursos humanos (US\$ 161,84), seguido dos materiais de consumo (US\$ 127,93) e dos materiais permanentes (US\$ 45,35) (Tabela 2).

O custo total (material permanente, material de consumo e recursos humanos) com a extração e a identificação de 51 espécies de FMA no laboratório foi de US\$ 646,63. O maior custo foi com os recursos humanos (US\$ 340,78), seguido dos materiais permanentes (US\$ 220,37) e dos materiais de consumo (US\$ 85,49) (Tabela 2). Considerando a identificação molecular das espécies, esta fase custaria mais. O custo total (material

permanente, material de consumo e recursos humanos) com a extração e a identificação molecular de FMA no laboratório seria de US\$ 7.904,96. O maior custo seria com materiais permanentes (US\$ 7.159,09) seguido dos materiais de consumo (US\$ 745,87) e com os recursos humanos (US\$ 340,77) (Tabela 2).

O custo total (material permanente, material de consumo e recursos humanos) com a produção de solo-inóculo das 51 espécies de FMA em micoteca foi de US\$ 3.340,79. O maior custo foi com os materiais permanentes (US\$ 2.556,81), seguido dos materiais de consumo (US\$ 443,21) e dos recursos humanos (US\$ 340,78) (Tabela 2).

Dividindo-se o custo total (material permanente, material de consumo e recursos humanos) das fases de coleta à produção de solo-inóculo por 51 espécies de FMA, o custo da produção de solo-inóculo por espécie foi maior (US\$ 65,51), em relação à extração e identificação de FMA (US\$ 12,68), e coleta do solo (US\$ 6,57).

### **3.2 Valor de estocagem de FMA entre as altitudes**

O valor de estocagem de FMA nas diferentes altitudes por Km<sup>2</sup> variou, conforme a Tabela 3, sendo maior nas altitudes intermediárias (1100m e 1200m, US\$ 965,51), devido à maior riqueza de espécies.

Considerando-se o número de espécies e o tamanho da área de cada faixa altitudinal na porção sul da Cadeia do Espinhaço entre 800 a 1500 m, o valor da estocagem de FMA em solos de campos rupestre nesta região tem o valor total de US\$ 59.845.845,89. O valor de estocagem nas altitudes mais baixas passa a ser maior nas menores altitudes (800-900 m) devido à maior proporção de área nesta faixa altitudinal (Tabela 3).

### **3.3 Valor comercial**

O valor comercial de inóculos de FMA no mercado é inferior ao valor de estocagem de FMA em solos de campos rupestres por kg (Tabela 3). O valor dos inóculos de campos rupestres por espécie/kg é de US\$ 1.014,35. Em outros países, os preços de inoculantes comerciais variam de US\$ 27,90 a US\$ 136,66 por kg. Estes inóculos comerciais variam no número de espécies de FMA utilizadas, variando de uma a sete espécies (Tabela 4).

## **4. Discussão**

Não existem na literatura valores monetários estimados para a riqueza de FMA no solo em ecossistemas naturais. Somente há perspectivas da produção de inóculos para comercialização (Berruti et al., 2014) e aplicação de FMA para a recuperação de comunidades vegetais naturais (Barr, 2010). Existem grandes variações entre os valores da biodiversidade encontrados na literatura mesmo quando se trata de valorações no mesmo bioma. Este fato é resultado da própria diversidade biológica encontrada dentro dos biomas, como também devido às distintas metodologias, organismos e produtos utilizados na valoração econômica dos ambientes (Guerra et al., 2009).

Pugliesi et al. (2011) avaliaram as perdas de nutrientes do solo após o manejo agrícola, dependendo do sistema de manejo, o custo de reposição dos nutrientes em um solo degradado fica em média US\$ 18,16/ha, valor muito baixo, por não considerar a microbiota do solo. De acordo com Barr (2010), os custos de FMA nativos a ser aplicados em uma área de 1 ha para ser restaurada, onde o solo foi removido e as concentrações de nutrientes foram reduzidas, são calculados em US\$ 3.968,90/ano, no entanto, o cálculo da aplicação de FMA não levou em consideração o número de espécies FMA nativas existentes na área nativa para

recuperação, além disso, o cálculo do valor da produção de inóculo não levou em consideração o número de glomerosporos utilizados para manter a espécie viável.

O maior valor de estocagem da coleção de FMA foi nas altitudes intermediárias, devido ao maior número de espécies encontrado neste local, que por sua vez, deve ser atribuído à maior heterogeneidade ambiental. A variedade dos solos é um fator muito importante que influencia a variedade de habitats encontrados nos campos rupestres e, provavelmente, o fator mais relevante na distribuição espacial de FMA ao longo do gradiente altitudinal dos campos rupestres (Coutinho et al., 2015; Oki et al., 2016). Como a base das montanhas possui uma área maior, o valor de estocagem de FMA em solos de campos rupestres na porção sul da Cadeia do Espinhaço é maior nas altitudes inferiores. Apesar de possuir menor riqueza de espécies de FMA em relação às outras altitudes avaliadas, as menores altitudes estão mais susceptíveis à degradação e portanto, perdem mais espécies.

Na Serra do Cipó, o único trabalho com valoração de serviços ecossistêmicos envolve o valor de estocagem de diversidade de plantas, com um valor de US\$ 25.260 milhões por ano para toda a região (Resende et al., 2013), sendo US\$ 109,95 para cada espécie vegetal e US\$ 799,11/ha/ano, que é inferior ao valor encontrado para estocagem de FMA. Como o próprio autor afirma, este valor é baixo por não considerar outros serviços fornecidos pela biodiversidade vegetal da região, inclusive a associação simbiótica (Resende et al., 2013).

O valor da estocagem da coleção de FMA em campos rupestres na porção sul da Cadeia do Espinhaço é consideravelmente alto quando comparado com a valoração da biodiversidade de outros organismos de outras áreas, como na Floresta Amazônica (Bentes-Gama et al., 2002; Fearnside, 1999). Mesmo assim, os resultados são de extrema importância para a conservação de FMA em campos rupestres, já que é o primeiro relato da valoração dos

FMA. Ao degradar-se um hectare de solo de campos rupestres, perde-se um valor equivalente a US\$ 7.836,27/ha/ano apenas considerando-se o serviço de estocagem da diversidade de FMA na área de estudo. Considerando a alta riqueza da vegetação e endemismo dos campos rupestres, provavelmente o número de espécies de FMA é muito maior que a encontrada neste trabalho. Por isso, o valor da diversidade de FMA realizada neste estudo está certamente subestimado, principalmente por não avaliarmos a abundância dos glomerosporos por espécie. Ainda que iniciada a valoração de FMA em campos rupestres com este trabalho, diante da complexidade de avaliação dos custos com recursos humanos, materiais e tecnológicos para isolar, identificar e preservar esses microorganismos, fornecer mais custos no valor agregado aos benefícios da simbiose na relação planta-fungo em solo ácido, raso e com pouco nutriente, e ampliá-los para ambientes montanhosos, com foco nas áreas ecologicamente sensíveis ou hotspots de biodiversidade, pode ser uma opção. Mas isso requer tempo e conhecimento dessa interação.

Os custos da produção comercial e estocagem das 51 espécies de FMA nativos neste trabalho provavelmente seriam menores se fossem em larga escala, pois uma grande proporção correspondeu a despesas com recursos humanos e com infra-estrutura. A produção de inóculos de FMA em larga escala é muito difícil. O principal obstáculo para a produção de um inóculo é a simbiose obrigatória e os riscos de contaminação. Isto significa que os FMA são propagados através da colonização em planta hospedeira em condições controladas o que requer tempo e infra-estrutura adequadas (Berruti et al., 2014). Além disso, a impossibilidade de avaliar rapidamente a colonização e a identificação de espécies de FMA também contribui para a elevação dos custos de manutenção das espécies. Diante da dificuldade na identificação taxonômica dos FMA, a utilização da identificação molecular é importante para esclarecer a identidade e variabilidade de FMA em ambientes nativos e degradados (Mergulhão et al.,

2014) o que elevaria o custo da identificação de espécies de FMA. Assim, as técnicas de produção de inóculos e manutenção da coleção envolvem custos elevados que não são aparentemente competitivos com custos relacionados à conservação.

A inoculação com FMA é uma ferramenta útil em programas de recuperação. Atualmente, os inóculos comerciais de FMA são produzidos com espécies mais generalistas, compostos principalmente por espécies da família Glomeraceae (Emam, 2016). McKay et al. (2015) afirmam que na recuperação de áreas degradadas deve-se utilizar espécies vegetais nativas, o mesmo deve ocorrer com FMA nativos (Ji et al., 2010), pois o uso de inóculos não nativos podem não fornecer os benefícios desejados para a recuperação do ambiente, uma vez que as fontes do inóculo contêm espécies e densidade diferentes de FMA (Emam, 2016).

Campos rupestres são áreas sujeitas à degradação, tais como aqueles afetados por atividades de mineração (Fernandes et al. 2014). As atividades de mineração afetam negativamente a diversidade de FMA (Melloni et al., 2003) devido a remoção da cobertura vegetal e da camada superficial do solo. Assim, são evidentes que os diferentes tipos de exploração que ocorrem nos solos de campos rupestres causam prejuízos, e isso pode ser mostrado em valores econômicos. O preço existente no mercado não revela seu valor real (BDCA, 2005). Geralmente, o valor real pode ser maior do que o mercado existente. De acordo com Nellyat and Pisupati (2014), a valoração dos recursos biológicos facilitaria a identificação do valor real desses recursos e entender melhor os benefícios. Se conseguirmos o preço da valoração mais próximo do ideal, o comportamento cotidiano e as decisões poderão ser direcionados em que a natureza seja vista como bem valioso e essencial para sustentar e melhorar o bem-estar de todos (Daily, 1997).

## 5. Conclusão

Sob o ponto de vista do interesse ecológico-econômico, o estudo é bastante representativo pois apresenta um caso real de aplicação de valoração econômica para uma decisão de investimento e conservação. O valor monetário da estocagem de FMA em solos de um ambiente extremo como os campos rupestres é alto em relação a outros grupos ecológicos e ambientes. O valor da estocagem através dos custos gastos com material de consumo, material permanente e recursos humanos variam de acordo com cada fase de coleta de solo, extração, identificação, produção de inóculos e manutenção de espécies de FMA em micotecas. O valor de estocagem é maior em solos de altitudes intermediárias na Serra do Cipó, devido a maior riqueza de espécies, no entanto, na porção sul da Cadeia do Espinhaço, o valor de estocagem é maior em solos de altitudes mais baixas, devido a maior proporção da área (km<sup>2</sup>). O valor de produção de inóculo a partir da riqueza de espécies estocadas em campos rupestres é muito maior que o valor comercial de FMA no mercado, uma vez que o preço existente no mercado não revela seu valor real. Embora muitas vezes possamos ter objeções quanto à quantificação de valor de fungos micorrízicos arbusculares em termos monetários, é importante fazê-la, porque a eficiência econômica é um importante critério para a conservação e determinação de custos em um projeto.

## 5. Referências

- ADMIRAAL, J.F. , WOSSINK, A., GROOT, W.T., and SNOO, G.R., 2013. More than total economic value: How to combine economic valuation of biodiversity with ecological resilience. *Ecological Economics*, vol.89, pp. 115–122.
- ALVES, R.J.V., and KOLBEK, J., 2010. Can campo rupestre vegetation be floristically delimited based on vascular plant genera? *Plant Ecology*, vol. 207, no. 1, pp. 67-79.
- AZCÓN-AGUILAR, C., and BAREA, J.M., 1996. Arbuscular mycorrhizas and biological control of soil-borne plant pathogens – an overview of the mechanisms involved. *Mycorrhiza*, vol. 6, no. 6, pp. 457–464.
- BARR, J., 2010. Restoration of plant communities in The Netherlands through the application of arbuscular mycorrhizal fungi. *Symbiosis*, vol. 52, no. 2, pp. 87-94.
- BARR, J., 2012. *The value of mycorrhizal fungi for sustainable and durable soils*. In: A.P. SILVA, M. SOL (eds). *Fungi: Types, Environmental impact and role in disease*. Nova Science Publishers, Ins, pp. 127-139.
- BENTES-GAMA, M.M., SCOLFORO, J.R.S., GAMA, J.R.V., and OLIVEIRA, A.D., 2002. Estrutura e valoração de uma floresta de várzea alta na Amazônia. *CERNE*, vol. 8, no. 1, pp. 88-102.
- BERBARA, R.L.L., SOUSA, F.A., and FONSECA, H.M.A.C., 2006. *Fungos micorrízicos arbusculares: muito além da nutrição*. In: M.S. Fernandes (Ed.). *Nutrição mineral de plantas*. Viçosa: SBCS. pp. 53-88.
- BERBARA, R.L.L., and FONSECA, H.M.A.C., 1996. *Colonização Radicular e Esporulação de Fungos Micorrízicos Arbusculares in vitro*. In: J.O. SIQUEIRA. *Avanços em*

- Fundamentos e Aplicações de Micorrizas. Lavras: Universidade Federal de Lavras/DCS e DCF, pp. 39-66.
- BERRUTI, A., BORRIELLO, R., ORGIAZZI, A., BARBERA, A.C., LUMINI, E., and BIANCIOTTO, V., 2014. *Arbuscular Mycorrhizal Fungi and their Value for Ecosystem Management*. In: O. GRILLO (ed). *The Dynamic Balance of the Planet*. Publisher: IntechOpen, pp. 159-191.
- CARDOSO, M., and KUYPER, T.W., 2006. Mycorrhizas and tropical soil fertility. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 116, no. 1-2, pp. 72–84.
- CARNEIRO, M.A.C., SIQUEIRA, J.O., MOREIRA, F.M.S., CARVALHO, D., BOTELHO, A.S., and SIQUEIRA-JUNIOR, O.J., 1998. Micorriza arbusculares em espécies arbóreas e arbustivas nativas de ocorrência no Sudeste do Brasil. *CERNE*, vol. 4, no. 1, pp. 129-145.
- CARVALHO, F., SOUZA, F.A., CARRENHO, R., MOREIRA, F.M.S., JESUS, E.C. and FERNANDES, G.W., 2012. The mosaic of habitats in the high-altitude Brazilian rupestrian fields is a hotspot for arbuscular mycorrhizal fungi. *Applied Soil Ecology*, vol. 52, pp. 9-19.
- COELHO, I.R., CAVALCANTE, U.M.T., CAMPOS, M.A.S. and SILVA, F.S.B., 2012. Uso de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) na promoção do crescimento de mudas de pinheira (*Annona squamosa* L., Annonaceae). *Acta Botanica Brasilica*, vol. 26, no. 4, pp. 933-937.
- CONCEIÇÃO, A.A., GIULIETTI, A.M. and MEIRELLES, S.T., 2007. Ilhas de vegetação em afloramentos de quartzito-arenito no Morro do Pai Inácio, Chapada Diamantina, Bahia, Brasil. *Acta Botanica Brasilica*, vol. 21, no. 2, pp. 335-347.

- COUTINHO, E.S., FERNANDES, G.W., BERBARA, R.L.L., MAIA, H.M. and GOTO, B.T., 2015. Variation of arbuscular mycorrhizal fungal communities along an altitudinal gradient in rupestrian grasslands in Brazil. *Mycorrhiza*, vol. 25, no. 8, pp. 627-638.
- DAILY, G.C., 1997. *Nature's services. Societal dependence on natural ecosystems*. Island Press, Washington, DC. 392 p.
- DANDAN, Z. and ZHIWEU, Z., 2007. Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the hot-dry valley of the Jinsha River, southwest China. *Applied Soil Ecology*, vol. 37, no. 1-2, pp.118-128.
- DODD, J.C., 2000. The role of arbuscular mycorrhizal fungi in agro – and natural ecosystems. *Outlook on Agriculture*, vol. 29, no. 1, pp. 55- 62.
- EMAM, T., 2016. Local soil, but not commercial AMF inoculum, increases native and non-native grass growth at a mine restoration site. *Restoration Ecology*, vol. 24, no. 1, pp. 35-44.
- FEARNSIDE, P.M., 1999. *Serviços ambientais como uso sustentável de recursos naturais na Amazonia*. In: Anais da Conferência Internacional “Amazônia no Terceiro Milênio—Atitudes Desejáveis”, 22 a 23 de outubro de 1999, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia-INPA, Manaus-AM, Brasil, pp. 1-20.
- FINLAY, R.D., 2008. Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis: with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium. *Journal of Experimental Botany*, vol. 59, no. 5, pp. 1115–1126.
- FREEMAN, M.C., PRINGLE, C.A., GREATHOUSE, E.A. and FREEMAN, B.J., 2003. Ecosystem-level consequences of migratory faunal depletion caused by dams. *Biodiversity, Status and Conservation of the World's Shads*, vol. 35, pp. 255–266.

- GALVÃO, M.V. and NIMER, E., 1965. *Clima. Geografia do Brasil - grande região leste.* (ed. by IBGE). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro. pp. 91-139.
- GIANINAZZI, S., GOLLOTE, A., BINET, M.N., VAN TUINEN, T., REDECKER, D. and WIPF, D., 2010. Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza*, vol. 20, no. 8, pp. 519-530.
- GIULIETTI, A.M., MENEZES, N.L., PIRANI, J.R., MEGURO, M., and WANDERLEY, M.G.L., 1987. Flora da Serra do Cipó, Minas Gerais: caracterização e lista de espécies. *Boletim de Botânica*, vol. 9, pp. 1-151.
- GUERRA, F.G.P.Q., SANTOS, A.J., SANQUETTA, C.R., BITTENCOURT, A.M. and ALMEIDA, A.N., 2009. Quantificação e valoração de produtos florestais não-madeireiros. *Floresta*, vol. 39, no. 2, pp. 431-439.
- HESTER, R.E. and HARRISON, R.M., 2010. *Ecosystem Services. Issues in Environmental Science and Technology*, 176p, RSC Publishing.
- JANOUSKOVÁ, M., KRAK, K., WAGG, C., STORCHOVÁ, H., ČAKLOVÁ, P. and VOSÁTKA, M., 2013. Effects of Inoculum Additions in the Presence of a Preestablished Arbuscular Mycorrhizal Fungal Community. *Applied Environmental Microbiology*, vol. 79, no. 20, pp. 6507-6515.
- JENKINS, W.R., 1964. A rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. *Plant Disease Reporter*, vol. 48, no. 9, pp. 692.
- JI, B., BENTIVENGA, S. and CASPER, B., 2010. Evidence for ecological matching of whole AM fungal communities to the local plant-soil environment. *Ecology*, vol. 91, no. 10, pp. 3037-3046.

- JOHNSON, N.C. and GEHRING, C.A., 2007. *Mycorrhizas: Symbiotic mediators of rhizosphere and ecosystem processes*. In: Z.G. CARDON and J.L. WHITBECK. (eds.). *The rhizosphere - an ecological perspective*. USA, Elsevier Academic Press, pp. 73–100.
- MADEIRA, J.A. and FERNANDES, G.W., 1990. Reproductive phenology of sympatric *Chamaecrista* taxa of *Chamaecrista* (Leguminosae) in Serra do Cipó, Brazil. *Journal of Tropical Ecology*, vol. 15, pp. 463-479.
- McKAY, J.K., CHRISTIAN, C.E., HARRISON, S. and RICE, K.J., 2005. “How local is local?”—a review of practical and conceptual issues in the genetics of restoration. *Restoration Ecology*, vol. 13, no. 3, pp. 432–440.
- MEDINA, B.M.O. and FERNANDES, G.W., (2007). The potential of natural regeneration of rocky outcrop vegetation on rupestrian field soils in “Serra do Cipó”, Brazil. *Revista Brasileira Botânica*, vol. 30, no. 4, pp. 665-678.
- MEINARD, Y. and GRILL, P., 2011. The economic valuation of biodiversity as an abstract good. *Ecological Economics*, vol. 70, no. 10, pp. 1707–1714.
- MELLONI, R., SIQUEIRA, J.O., and MOREIRA, F.M.S., 2003. Fungos micorrízicos arbusculares em solos de área de mineração de bauxita em reabilitação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 38, no. 2, pp. 267-276.
- MERGULHÃO, A.C.E.S., SILVA, M.V., LYRA, M.C.C.P. , FIGUEIREDO, M.V.B. , SILVA, M.L.R.B. and MAIA, L.C., 2014. Caracterização morfológica e molecular de fungos micorrízicos arbusculares isolados de áreas de mineração de gesso, Araripina, PE, Brasil. *Hoehnea*, vol. 41, no. 3, pp. 393-400.
- MOREIRA, F.M.S. and SIQUEIRA, J.O., 2006. *Microbiologia e Bioquímica do Solo*. 2nd ed. 729p. Lavras: UFLA.

- MORTON, J.B., BENTIVENGA, S.P., and WHEELER, W.W., 1993. Germplasm in the Internacional Collection of Arbuscular and Vesicular-arbuscular Mycorrhizal Fungi (INVAM) and procedures for culture development, documentation and storage. *Mycotaxon*, vol. 48: pp. 491-528.
- NAEEM, S., BUNKER, D.E., HECTOR, A., LOREAU, M., and PERRINGS, C., 2009. *Biodiversity, ecosystem functioning, and human wellbeing: an ecological and economic perspective*. Ed. Oxford. 260p.
- NEGREIROS, D., FERNANDES, G.W., BERBARA, R.L.L., RODARTE, L.H.O. and BARBOSA, N.P.U., 2011. Caracterização físico-química de solos quartzíticos degradados e áreas adjacentes de campo rupestre na Serra do Cipó, MG, Brasil. *Neotropical Biology and Conservation*, vol. 6, no. 3, pp. 156-161.
- NELLYAT, P. and PISUPATI, B., 2014. Economic valuation of bioresources for access and benefit sharing, *National Biodiversity Authority*, Chennai, pp. 1-14.
- NOVAIS, C.B. and SIQUEIRA, J.O., 2009. Aplicação de formononetina na colonização e esporulação de fungos micorrízicos em braquiária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 44, no. 5, pp. 496-502.
- OKI, Y., GOTO, B.T., JOBIM, K., ROSA, L.H., FERREIRA, M.C., COUTINHO, E.S., XAVIER, J. H.A., CARVALHO, F., MOREIRA, F.M.S., SOUZA, F.A., BERBARA, R.L. and FERNANDES, G.W., 2016. *Arbuscular Mycorrhiza and Endophytic Fungi in Ruspestrian Grasslands*. In: G.W. Fernandes (ed). *Ecology and Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil*. Springer, pp 157-179.
- POUYU-ROJAS, E., SIQUEIRA, J.O. and SANTOS, J.G.D., 2006. Compatibilidade simbiótica de fungos micorrízicos arbusculares com espécies arbóreas tropicais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 30, no. 3, pp. 413-424.

- PUGLIESI, A.C.V., MARINHO, M.A., MARQUES, J.F., and LUCARELLI, J.R.F., (2011). Valoração econômica do efeito da erosão em sistemas de manejo do solo empregando o método custo de reposição. *Bragantia*, vol. 70, no. 1, pp.113-121.
- RESENDE, F.M., FERNANDES, G.W. and COELHO, M.S., 2013. Economic valuation of plant diversity storage service provided by Brazilian rupestrian grassland ecosystems. *Brazilian Journal of Biology*, vol. 73, no.4, pp. 709-716.
- SANTANA, A.S.S., CAVALCANTE, U.M.T., SAMPAIO, E.V.S.B. and MAIA, L.C., 2014. Production, storage and costs of inoculum of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). *Brazilian Journal of Botany*. vol. 37, no. 2, pp.159-165.
- SCHENCK, N.C. and PÉREZ, Y., 1988. *Manual for identification of VA mycorrhizal fungi*. Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Gainesville, 245p..
- SILVA, E.M.R., SUDO, A., ALMEIDA, D.L., MATOS, R.M.B., PEREIRA, M.G., BOVI, M.L.A. and MACHADO, C.T., 1998. *Ocorrência e efetividade de fungos micorrízicos em plantas cultivadas*. Seropédica: EMBRAPA Agrobiologia, 25 p. Documentos, no. 83.
- SIQUEIRA, J.O., LAMBAIS, M.R. and STÜRMER, S.L., 2002. Fungos micorrízicos arbusculares: Características, associação simbiótica e aplicação na agricultura. *Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento*, vol..25, no.4, pp.12-21.
- SMITH, S.E. and READ, D.J., 2008. *Mycorrhizal symbiosis*. 3rd edn. Academic Press.
- SMITH, S.E. and SMITH, F.A., 2011. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales. *Plant Physiology*, vol 156, no. 3, pp. 1050-1057.
- SOUZA, F.A., SILVA, I.C.L. and BERBARA, R.L.L., 2007. *Fungos micorrízicos arbusculares: muito mais diversos do que se imaginava*. In: F.M.S. MOREIRA, J.O.

- SIQUEIRA, L. BRUSSARD (eds). Biodiversidade do Solo em Ecossistemas Brasileiros, Lavras: UFLA. pp. 483-536.
- VAN DER HEIJDEN, M.G.A., KLIRONOMOS, J.N., USIC, M., PETER, M., STREITWOLF-ENGEL, R., BOLLER, T., WIEMKEN A., and SANDERS, S., 1998. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*, vol. 396, pp.60-72.
- ZHANG, W.J. and ZHANG, X.Y., 2007. A forecast analysis on fertilizers consumption worldwide. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 133, pp. 427-434.

**Tabela 1.** Tamanho da área (Km<sup>2</sup>) de campos rupestres em cada faixa altitudinal ao longo do gradiente altitudinal na porção sul da Cadeia do Espinhaço, Minas Gerais.

<b>Altitude (m)</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>
800 - 900	36.677,41
901 - 1000	20.261,77
1001 - 1100	9.969,85
1101 - 1200	5.658,98
1201 - 1300	3.471,64
1301 - 1400	1.631,51
1401 - 1500	581,38

**Tabela 2.** Custos anuais de cada fase relativos à estocagem da coleção de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) em solos de campos rupestres. Valor parcial indica a soma dos custos de cada fase.

	<b>Coleção (US\$)</b>	<b>Material de consumo (US\$)</b>	<b>Material permanente (US\$)</b>	<b>Recursos humanos (US\$)</b>	<b>Valor parcial (US\$)</b>
Coleta do solo	-	2,50	0,89	3,17	6,57
Extração/identificação de FMA	-	1,68	4,32	6,68	12,68
Produção de solo- inóculo	-	8,69	50,13	6,68	65,51
Manutenção anual	33,92	-	2,50	80,21	116,64
<b>Valor Total (US\$)</b>	<b>33,92</b>	<b>12,87</b>	<b>57,84</b>	<b>96,74</b>	<b>769,70</b>

**Tabela 3.** Valor relativo ao custo de estocagem da coleção de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) em campos rupestres por altitude e ao longo do gradiente altitudinal da porção sul da Cadeia do Espinhaço. O custo total indica o valor de cada faixa altitudinal da porção sul da Cadeia do Espinhaço.

<b>Altitude (m)</b>	<b>Número de espécies de FMA</b>	<b>Custo/Km<sup>2</sup> (US\$)</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Custo Total (US\$)</b>
800 - 900	26	678,47	36.677,41	24.884.494,15
901 - 1000	28	730,65	20.261,77	14.804.340,18
1001 - 1100	36	939,41	9.969,85	9.365.753,78
1101 - 1200	37	965,51	5.658,98	5.463.788,72
1201 - 1300	37	965,51	3.471,64	3.351.903,14
1301 - 1400	35	913,32	1.631,51	1.490.095,73
1401 - 1500	32	835,03	581,38	485.470,19
<b>Total</b>		<b>6.027,90</b>	<b>78.252,54</b>	<b>59.845.845,89</b>

**Tabela 4.** Valor comercial (\$) de inóculos de FMA comparado com FMA nativos de campos rupestres

<b>Nome comercial</b>	<b>Componentes</b>	<b>Valor de mercado/Kg</b>
BioAg Endos	espécies de FMA	US\$ 38,28
BioOrganics Endomycorrhizal Inoculant	<i>Glomus intraradices</i>	US\$ 53,00
Endomycorrhizal inoculant	espécies de FMA	US\$ 136,66
MycoAply	espécies de FMA	US\$ 27,90
Mycogold	4 espécies de FMA Ectomicorrizas <i>Bacillus</i> <i>Trichoderma</i>	US\$ 32,95
Mycorrhiza seed inoculante	4 espécies de FMA	US\$ 99,48
Mycorrhiza (VAM) Inoculant	<i>Glomus intraradices</i>	US\$ 44,44
Mycorrhizal	espécies de FMA	US\$ 100,00
Mycosym-Tri Ton	espécies de FMA	US\$ 63,12
Rhizanova Inoculant	Endomicorrizas Ectomicorrizas	US\$ 69,00
VAM Endo-Mix	7 espécies de FMA	US\$ 60,93
<b>Campos Rupestres</b>	<b>51 espécies de FMA</b>	<b>US\$ 1014,35</b>

## Considerações Finais

Estudos sobre ocorrência e distribuição de FMA no ecossistema de campos rupestres vêm crescendo com o tempo, porém o número de espécies de FMA descrito é muito menor em comparação com o número de espécies vegetais conhecidas. Esta comparação é possível já que estes fungos são simbiotes obrigatórios e é de se imaginar que há muitas espécies de FMA a serem descritas. Ao mesmo tempo e em pouco tempo de publicação já foi possível perceber que os campos rupestres são fontes de diversidade de FMA pelo número de espécies encontradas. Neste trabalho encontramos em uma única região a maior diversidade de fungos micorrízicos arbusculares jamais reportada na literatura, uma vez que o número de espécies de FMA aumentou. Somente na Serra do Cipó, o número de espécies de FMA em campos rupestres passa a contar com registro de mais 15 espécies ainda não reportadas (Anexo 3). Estas observações reforçam a necessidade de estudos detalhados sobre as relações entre os FMA e flora local, bem estudos evolutivos sobre especiação e radiação adaptativas destes organismos em áreas de montanhas.

O conhecimento da diversidade de fungos micorrízicos em áreas degradadas é fundamental para os projetos de recuperação de campos rupestres. A degradação ocasiona mudanças nas condições do solo e na cobertura vegetal, e por sua vez, altera a riqueza e a estrutura da comunidade de FMA, favorecendo a dominância de algumas espécies. A disponibilidade de FMA no solo varia entre as espécies vegetais de campos rupestres, apesar dos FMA serem generalistas. Isto se deve às diferenças das relações entre fungo, solo e plantas. As propriedades físicas e químicas do solo variam ao longo do gradiente de altitude e, paralelamente, composição, riqueza, frequência e densidade de FMA. Geralmente há um declínio nos padrões de distribuição e riqueza de espécies de outros táxons ao longo de gradientes altitudinais, no entanto, a riqueza e a densidade de FMA são maiores em altitudes intermediárias. Os fatores da diversidade de fungos micorrízicos arbusculares em campos rupestres ao longo do gradiente devem-se às propriedades dos solos, bem como as diferentes estratégias de sobrevivência dos FMA neste ecossistema. Além de constatar que existem espécies indicadoras de um tipo específico de habitat. Diante da diversidade de FMA encontrada em áreas de campos rupestres, propomos utilizar estes fungos como uma ferramenta para subsidiar informações científicas para a conservação do solo dos campos

rupestres, a partir da valoração econômica, uma vez que consiste em um armazenamento natural de espécies de FMA.

## **Anexo 1**

### **1. Extração dos esporos de FMA**

Utilizar a técnica do peneiramento úmido (GERDEMANN & NICOLSON, 1963) seguida por decantação em água e flutuação em sacarose (DANIELS & SKIPPER, 1982).

#### **1.1 Materiais necessários:**

- 1 peneira de nylon com abertura de 53  $\mu\text{m}$ ;
- 1 peneira de nylon com abertura de 500  $\mu\text{m}$ ;
- tubos Falcon com capacidade de 50mL com tampas (um para cada amostra de solo);
- baldes plásticos com capacidade de 2L;
- torneira com água corrente;
- balança eletrônica (com 2 casas decimais, para balancear os tubos Falcon);
- centrifuga de baixa rotação (até 5000rpm que suporte os tubos Falcon);

#### **1.2 Preparo das soluções:**

##### **Solução 1. SACAROSE 60% (p/v)**

- pesar 60 g de açúcar cristal e transferir para um balão volumétrico com capacidade de 100mL e completar o volume com água destilada.

#### **1.3 Procedimentos:**

A) Colocar o solo no balde, encher com água e mexer com bastão de vidro. Deixar decantar a fração grosseira por 10 segundos e verter a água nas peneiras 500/53  $\mu\text{m}$ , deixando o material decantado no balde. Repetir esta operação até restar apenas areia no fundo do balde; os agregados do solo poderão ser desmanchados com a mão.

B) Lavar com água corrente o material retido na primeira peneira (500  $\mu\text{m}$ ) e em seguida descartá-lo;

C) Recolher o material retido na segunda peneira (53  $\mu\text{m}$ ) em tubos Falcon com auxílio de um pisseta.

D) Calibrar os tubos Falcon juntamente com suas tampas;

E) Centrifugar o material a 3000 rpm durante 3 minutos;

F) Descartar a solução em suspensão e o material sobrenadante. As paredes do tubo Falcon deverão ser limpas com auxílio dos dedos para retirada de material orgânico (sobrenadante), tomando-se o cuidado de não tocar no material precipitado.

G) Adicionar aproximadamente 20mL da solução 1 (sacarose (60%) e ressuspender o precipitado com auxílio de um bastão de vidro;

H) Calibrar os tubos Falcon juntamente com suas tampas;

I) Centrifugar o material a 2000 rpm durante 2 minutos;

J) Coletar o sobrenadante vertendo-o na peneira de 53  $\mu$ m. As paredes do tubo Falcon deverão ser limpas com auxílio dos dedos para retirada do restante do material suspenso (esporos), tomando-se o cuidado de não tocar no material precipitado.

K) Lavar o material recolhido na peneira 53  $\mu$ m com água corrente;

L) Transferir os esporos da peneira de 53  $\mu$ m para placas Petri com auxílio de uma pisseta

## **2. Preparação das lâminas microscópicas de esporos de FMA**

### **2.1 Materiais necessários:**

- lâminas para microscopia (dimensões: 76x26mm; 1-1.2 mm de espessura) e com o área áspera para etiqueta (1 para cada amostra de solo ou espécie de FMA);

- lamínulas de vidro (com dimensões no mínimo de 0,13 mm de diâmetro) (1 para cada amostra de solo ou espécie de FMA);

- 1 micropipeta;

- ponteiros para micropipeta;

- placas de Petri;

- lupa estereoscópica;

- 2 seringas e 2 agulhas pequenas (do tipo para insulina);

- 2 frascos com sistema conta-gotas para as soluções.

### **2.2 Preparo das soluções:**

#### **2.2.1 Reagente de PVLG (Polivinil Álcool Lacto Glicerol)**

- pipetar 10 mL de Ácido láctico;

- pipetar 1 mL Glicerina;

- pesar 1,66g Álcool Polivinil;

- transferir os reagentes para um balão volumétrico com capacidade de 20mL e completar o volume com água destilada.

**Obs:** Agitar bem esta solução porque é muito viscosa.

### **2.2.2 Reagente de MELZER**

- pesar 1,5g do reagente Iodeto de Potássio;

- pesar 0,5 g do reagente Iodo;

- pipetar 25mL do reagente de PVLG;

- transferir para um balão volumétrico com capacidade de 50mL e completar o volume com água destilada.

**Obs:** Agitar bem esta solução porque é muito viscosa.

### **2.3 Procedimentos:**

A) Extrair e selecionar os esporos visualmente viáveis de acordo com o **Erro! Fonte de referência não encontrada.**;

B) Dividir os esporos selecionados (pelo menos em 2 grupos) quanto a:

- tamanho (grandes, médios e pequenos);

- coloração (marrons, amarelados e hialinos);

- forma (arredondados, alongados e em cacho);

C) Com o auxílio da micropipeta, transfira os 2 grupos de esporos selecionados (aproximadamente 20 esporos cada) para as lâminas (devidamente identificadas);

D) Retire lentamente a água (que transportou os esporos) com auxílio de pequenos pedaços de papel toalha;

E) Deposite de 1 a 2 gotas da solução 1 (PVLG) sobre um grupo de esporos, e de 1 a 2 gotas da solução 2 (Melzer) sobre o outro grupo de esporos;

F) Coloque as lamínulas sobre os esporos evitando a formação de bolhas de ar;

G) Não esmagar os esporos. Sua morfologia e dimensões podem ser observadas e medidas quando inteiros.

H) Se não for realizar o procedimento “G”, então, cuidadosamente aplicar pressão sobre a lamínula que cobre os esporos com o êmbolo da seringa (esmagá-los suavemente até o rompimento de suas paredes até a exposição dos componentes internos dos esporos aos reagentes);

**Obs:** Deve-se tomar o cuidado de não esmagar completamente os esporos (dificultando sua identificação) e para não quebrar as lamínulas.

I) Etiquetar todas as lâminas (origem, data, etc);

J) Deixar secando por aproximadamente 24 horas em temperatura ambiente ( $\pm 26^{\circ}\text{C}$ );

K) Colocar as lâminas em estufa (aquecedor ou placa quente) com temperatura aproximada de  $60^{\circ}\text{C}$  por mais 24 horas, tornando-as permanentes.

L) Cobrir as laterais das lamínulas com esmalte incolor (base) ou cola líquida e deixar secar antes de serem armazenadas;

M) Observar, anotar, desenhar, fotografar e registrar todos os detalhes das estruturas dos esporos, o que facilitará sua identificação e descrição, com o auxílio de um microscópio de alta qualidade (que é uma ferramenta essencial na determinação nos detalhes dos esporos).

N) Armazenar as lâminas em local seguro (de preferência acondicionadas em caixas próprias).

Anexo 2. Discriminação dos materiais e serviços utilizados.

<b>Fases</b>	<b>Material de Consumo</b>	<b>Material Permanente</b>	<b>Recursos Humanos</b>
<b>Coleta do Solo</b>	Sizal	Trado	Diárias
	Piquete	Balde 10L	Combustível
	Sacos plásticos	Marreta	Serviços
	Fita adesiva	Trena	
	Caneta de retroprojektor	Capas de chuva	
<b>Extração e Identificação</b>	Açúcar cristalizado	Lupa estereoscópica	Diárias
	Placa de petri	Microscópio óptico	Serviços
	Tubos falcon 50 ml	Balança eletrônica	
	Lâmina	Computador	
	Lamínula	Contador numérico	
	Seringa	Conta Gotas	
	Porta Lâminas	Peneira	
	Caneta de retroprojektor	Balde 2L	
	Iodeto de potássio	Bastão de vidro	
	Iodo	Centrifuga	
	Ácido Lático	Agitador tipo Vortex*	
	Água	Termociclador*	
	Glicerina		
	Alcool polivinílico		
	Energia Elétrica		
	Dimetilsulfuróxido 20%*		
	Dodecil Sulfato Sódico*		
	Microtubos Eppendorf*		
	Persulfato de amônia*		
	Solução Ditiotreitól*		
TEMED*			
Tubos de ensaio*			
<b>Solo-inóculo</b>	Alça	Estrutura física	Diárias

	Ampola	Serviços	
	Solução de Cristal Violeta Lamina de vidro Solução de Lugol Solução de Meio 79 Microtubo Óleo mineral Papel de filtro Solução Peptona/Sacarose		
	Placa de Petri Solução Safranina Tubo Gás Oxigênio Gás Butano Peróxido de Hidrogênio Álcool Vasos de 20 kg Sementes de <i>Urochloa</i> Ácido sulfúrico Hipoclorito de sódio Água Vermiculita Areia		
<b>Manutenção anual</b>	Energia Elétrica Papel A4 Caneta de retroprojektor Placa de Petri Meio 79 Butano	Cadeira de laboratorio Armário de reagentes e vidraria Impressora Mesas e cadeiras Computador Programas de computador	Diárias Serviços

Alça  
Lamina de vidro  
Sol. Cristal Violeta  
Solução de Lugol  
Etanol  
Solução de Safranina  
Ampola  
Solução Peptona/Sacarose  
Oxigênio  
Papel de filtro  
Óleo mineral

---

\*materiais utilizados se utilizar os custos envolvendo a identificação molecular



**Anexo 3.** Fungos micorrízicos arbusculares reportados em campos rupestres, Serra do Cipó, Minas Gerais, Brasil. Espécies já registradas em referências Carvalho et al. (2012) e Coutinho et al. (2015), e registradas nos Capítulo I (Cap. I) e Capítulo II (Cap. II) desta tese.

Espécies	Referências
<i>Acaulospora bireticulata</i> F.M. Rothwell & Trappe	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. II
<i>Acaulospora cavernata</i> Błaszk.	Carvalho et al. 2012
<i>Acaulospora colossica</i> P.A. Schultz, Bever & J.B. Morton	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015
<i>Acaulospora delicata</i> C. Walker, C.M. Pfeiffer & Bloss	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Acaulospora denticulata</i> Sieverd. & S. Toro	Coutinho et al. 2015; Cap. II
<i>Acaulospora foveata</i> Trappe & Janos	Cap. I; Cap. II
<i>Acaulospora aff herrerae</i> Furrázola, B.T.Goto, G.A.Silva, Sieverd. & Oehl	Cap. II
<i>Acaulospora koskei</i> Błaszk.	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I
<i>Acaulospora lacunosa</i> J.B. Morton	Cap. I
<i>Acaulospora leavis</i> Gerd. & Trappe	Cap. I
<i>Acaulospora mellea</i> Spain & N.C. Schenck	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Acaulospora morrowiae</i> Spain & N.C. Schenck	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. II
<i>Acaulospora</i> sp. 2	Cap. II
<i>Acaulospora rehmii</i> Sieverd. & S. Toro	Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Acaulospora rugosa</i> J.B. Morton	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. II
<i>Acaulospora scrobiculata</i> Trappe	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Acaulospora spinosa</i> C. Walker & Trappe	Coutinho et al. 2015
<i>Acaulospora</i> sp.1	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Acaulospora</i> sp.2	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I
<i>Acaulospora</i> sp.3	Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Acaulospora</i> sp.4	Coutinho et al. 2015
<i>Ambispora appendicula</i> (Spain, Sieverd., N.C. Schenck) C. Walker	Coutinho et al. 2015; Cap. I

---

<i>Ambispora brasiliensis</i> B.T. Goto, L.C. Maia & Oehl	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015
<i>Ambispora callosa</i> (Sieverd.) C. Walker, Vestberg & A. Schüssler	Coutinho et al. 2015
<i>Ambispora</i> sp.1	Cap. I
<i>Ambispora</i> sp.2	Cap. I
<i>Ambispora</i> sp.3	Cap. II
<i>Cetraspora gilmorei</i> (Trappe & Gerd.) Oehl, F.A. de Souza & Sieverd.	Carvalho et al. 2012
<i>Claroideoglopus claroideum</i> (N.C. Schenck & G.S. Sm.) C. Walker & A. Schüssler	Carvalho et al. 2012; Cap.I; Cap. II
<i>Claroideoglopus etunicatum</i> (W.N. Becker & Gerd.) C. Walker & A. Schüssler	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Claroideoglopus lamellosum</i> (Dalpé, Koske & Tews) C. Walker & A. Schüssler	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015
<i>Claroideoglopus</i> sp.	Cap.I; Cap. II
<i>Dentiscutata biornata</i> (Spain, Sieverd. & S. Toro) Sieverd., F.A. de Souza & Oehl	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I
<i>Dentiscutata heterogama</i> T.H. Nicolson & Gerd.) Sieverd., F.A. de Souza & Oehl	Cap. I
<i>Dentiscutata</i> sp.	Cap. II
<i>Diversispora</i> aff <i>pustulata</i> (Koske, Friese, C. Walker & Dalpé) Oehl, G.A. Silva & Siever	Cap. I
<i>Diversispora</i> sp. 1	Coutinho et al. 2015
<i>Diversispora</i> sp.2	Cap. II
<i>Funneliformis geosporus</i> (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schüssler	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Funneliformis mosseae</i> (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schüssler	Coutinho et al. 2015; Cap. II
<i>Funneliformis</i> sp.	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Fuscutata heterogama</i> (T.H. Nicolson & Gerd.) Sieverd., F.A. de Souza & Oehl	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015

---

---

<i>Fusfutada rubra</i> Stürmer & J.B. Morton) Oehl, F.A. de Souza & Sieverd.	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015
<i>Gigaspora decipiens</i> I.R. Hall & L.K. Abbott	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. II
<i>Gigaspora gigantea</i> (T.H. Nicolson & Gerd.) Gerd. & Trappe	Coutinho et al. 2015
<i>Gigaspora margarita</i> W.N. Becker & I.R. Hall	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Gigaspora</i> sp.1	Cap. I
<i>Gigaspora</i> sp.2	Cap. I
<i>Gigaspora</i> sp.3	Cap. II
<i>Glomus diaphanum</i> J.B. Morton & C. Walker	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Glomus glomerulatum</i> Sieverd.	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Glomus</i> aff. <i>heterosporum</i> G.S. Sm. & N.C. Schenck	Cap. I
<i>Glomus macrocarpum</i> Tul. & C. Tul.	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Glomus microcarpum</i> Tul. & C. Tul.	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Glomus</i> aff. <i>pellucidum</i> McGee & Pattinson	Carvalho et al. 2012
<i>Glomus</i> aff. <i>rubiforme</i> (Gerd. & Trappe) R.T. Almeida & N.C. Schenck	Carvalho et al. 2013
<i>Glomus</i> sp. 1	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Glomus</i> sp. 2	Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Glomus</i> sp. 3	Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Glomus</i> sp. 4	Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Glomus</i> sp. 5	Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Glomus</i> sp. 6	Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Glomus</i> sp.7	Cap. II
<i>Glomus spinuliferum</i> Oehl, Wiemk. & Sieverd.	Cap. II
<i>Glomus tortuosum</i> N.C. Schenck & G.S. Sm	Cap.I; Cap. II
<i>Glomus trufemii</i> B.T. Goto, G. A. Silva & Oehl	Cap. II
<i>Intraornatospora intraornata</i> (B.T. Goto & Oehl) B.T. Goto, Oehl & G.A. Silva	Cap.I; Cap. II

---

---

<i>Kuklospora colombiana</i> Spain & N.C. Schenck) Oehl & Sieverd.	Carvalho et al. 2012
<i>Orbispora pernambucana</i> (Oehl, D.K. Silva, N. Freitas, L.C. Maia) Oehl, G.A.Silva	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. II
<i>Orbispora</i> sp.	Cap. II
<i>Pacispora dominikii</i> (Blaszk.) Sieverd. & Oehl	Carvalho et al. 2012
<i>Pacispora robigina</i> Sieverd. & Oehl	Carvalho et al. 2012; Cap. I
<i>Pacispora</i> sp.	Coutinho et al. 2015; Cap. II
<i>Paraglomus brasilianum</i> (Spain & J. Miranda) J.B. Morton & D. Redecker	Cap. II
<i>Paraglomus occultum</i> (C. Walker) J.B. Morton & D. Redecker	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. II
<i>Racocetra fulgida</i> (Koske & C. Walker) Oehl, F.A. de Souza & Sieverd.	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I
<i>Racocetra</i> sp.	Cap. II
<i>Racocetra tropicana</i> Oehl, B.T.Goto & G.A.Silva	Cap. II
<i>Rhizoglomus clarum</i> (T.H. Nicolson & N.C. Schenck) Sieverd., G.A. Silva & Oehl	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Rhizoglomus fasciculatum</i> (Thaxt.) Sieverd., G.A. Silva & Oehl	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I
<i>Rhizoglomus invermaium</i> (I.R. Hall) Sieverd., G.A. Silva & Oehl	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. II
<i>Rhizoglomus microaggregatum</i> (Koske, Gemma & P.D. Olexia) Sieverd., G.A. Silva & Oehl	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015
<i>Scutellospora calospora</i> (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & F.E. Sanders	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015
<i>Scutellospora dispurpurescens</i> J.B. Morton & Koske	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I
<i>Scutellospora</i> sp.	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. I; Cap. II
<i>Semiglomus</i> sp.	Cap. II
<i>Septoglomus constrictum</i> (Trappe) Sieverd G.A. Silva & Oehl	Carvalho et al. 2012; Coutinho et al. 2015; Cap. II

---