

GESSIANE CEOLA

**BIOGEOGRAFIA E DIVERSIDADE DE FUNGOS
MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EM CENÁRIOS
CONTRASTANTES DE USO DO SOLO E DE REGIME
HÍDRICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Ciências Agrárias da Universidade do Estado
de Santa Catarina, como requisito parcial para
obtenção do grau de Doutor em Manejo do Solo.

Orientador: Dr. Osmar Klauberger Filho

LAGES, SC

2015

Ceola, Gessiane

Biogeografia e diversidade de fungos
micorrízicos arbusculares em cenários
contrastantes de uso do solo e de regime hídrico /
Gessiane Ceola. - Lages, 2015.

164 p. : il. ; 21 cm

Orientador: Osmar Klauberg-Filho

Inclui bibliografia

Tese (doutorado) - Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias,
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo,
Lages, 2015.

1. micorrizas. 2. biogeografia. 3. usos do
solo. 4. Regime hídrico. 5. agroecossistemas. I.
Ceola, Gessiane. II. Klauberg-Filho, Osmar. III.
Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa
de Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV. Título

Ficha catalográfica elaborada pelo aluno

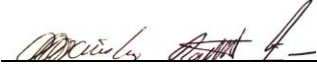
Tese apresentada à Universidade de Coimbra e à Universidade do Estado de Santa Catarina ao abrigo do Acordo para realização de Doutorado em Regime de Cotutela assinado entre as duas instituições para a obtenção do Grau de Doutor em Biociências (especialidade em Ecologia) pela Universidade de Coimbra e de Doutor em Manejo do Solo pela Universidade do Estado de Santa Catarina, realizada sob a supervisão Científica do professor Doutor José Paulo Filipe Afonso de Sousa, Professor Auxiliar do departamento de Ciências da Vida da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra e do professor Doutor Osmar Klauberg Filho, Professor Titular do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina.

GESSIANE CEOLA

**BIOGEOGRAFIA E DIVERSIDADE DE FUNGOS
MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EM CENÁRIOS
CONTRASTANTES DE USO DO SOLO E DE REGIME
HÍDRICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Manejo do Solo.

Banca Examinadora

Orientador/Presidente:	Dr. Osmar Klauberg-Filho. (UDESC/CAV-Lages-SC) 
Orientador/Regime cotutela:	Dr. Jose Paulo Filipe Afonso de Sousa (Universidade de Coimbra -Coimbra-Portugal) 
Membro externo:	Dr. ^a . Paula Maria Vasconcelos Moraes (Universidade de Coimbra -Coimbra-Portugal) 
Membro interno:	Dr. Dilmar Baretta (UDESC/CEO-Chapecó-SC) 
Membro externo:	Dr. Cláudio Roberto Fonsêca Sousa Soares (UFSC-Florianópolis-SC) 
Membro externo:	Dr. ^a . Sonia Purin da Cruz (UFSC-Curitiba-SC)

Lages, SC, 31/07/2015

As pessoas que acreditaram e
contribuíram para minha
formação social e profissional:
meus pais Inácio e Isolete e
meus orientadores Osmar e José
Paulo.

Dedico

.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Inácio e Isolete Ceola por todo apoio, dedicação e oportunidade e meus Irmãos Abel e Sirlene pelo carinho;

Ao meu orientador Osmar pela amizade e confiança e ao meu orientador em regime de cotutela Jose Paulo pelas contribuições e parceria nesta caminhada;

Ao Prof. Dilmar Baretta pela oportunidade de participar do Projeto SISBIOTA (*MCT/CNPq/MMA/MEC/CAPES/FNDCT – Ação Transversal/FAPs Nº 47/2010*), contribuições, convivência e principalmente pela ajuda e orientação durante as coletas e análises;

Ao Prof. Sidney L. Stürmer pelas contribuições e identificação das espécies de fungos micorrízicos arbusculares durante o projeto;

Ao Prof. Álvaro Mafra e ao Prof. Julio César Pires Santos por toda assistência durante a execução projeto;

Aos amigos e colaboradores da tese Joana Alves e Antonio Alves da Silva pelas contribuições extremamente necessárias para a escrita da tese;

Ao departamento de solos do CAV/UDESC pela disponibilidade dos laboratórios, aos meus colegas pós-graduandos e aos funcionários principalmente aos meus colegas do Lab. de Ecologia do Solo Janaina, Dayse, Ana, Marcos e Pamela;

Ao grupo de pesquisa Solos e Sustentabilidade (Marcio, Janaina, Patrícia Paulino, Dennis, Ana Lovatel, Marie, Dayse, Rafael Anselmi, Evandro, Rogério, Eduardo, Deives, Maximiliano, Rafael Brietzke, Patrícia Tormen, Talyta, Edpool, Renato, Roney, Marcos, Ivandro, Jonas e Julia);

Aos amigos da Universidade de Coimbra pelo apoio durante meu doutoramento em regime de cotutela (Tiago, João Raimundo, Sara, Carla, Filipa, Regiane, Filipe, Mathieu, Paulo Roger, Josieli, Sonia, Dalila, Nuno, Tomas, Henrique, Eduardo);

A Escola Superior Agrária de Coimbra e a BUNGUE pelo espaço cedido para os experimentos;

A FURB, especialmente ao Laboratório de Botanica/Micorrizas. Principalmente aos colegas que contribuíram para o desenvolvimento da minha pesquisa (Diego, Andressa e Karl);

Aos meus amigos que foram presentes e essenciais durante minha formação: Alessandra, Myrcia, Mariana M., Mariana C., Camila, Débora, Carla M., Junior, Dianessa, Marcio e Matheus;

A todos os agricultores e pecuaristas que contribuíram com as coletas a campo em Santa Catarina e Alentejo/Portugal;

Ao CIRAM/EPAGRI por disponibilizar dados meteorológicos sempre que necessário;

Ao Promop pela concessão da bolsa de doutoramento no início do período de estudos;

A CAPES pela concessão da bolsa de doutoramento no país e PDSE (Portaria 69/ Processo 99999.014610/2013-02: Diversidade estrutural e funcional de fungos micorrizicos arbusculares em cenários contrastantes de uso do solo e clima);

Ao CNPq e FAPESC pelo financiamento do projeto;

E a todos que se sentem responsáveis pela realização deste projeto:

Meu sincero obrigada!

RESUMO

A maior parte da biodiversidade de agroecossistemas reside no solo e as funções desempenhadas tem efeito direto e indireto sobre a qualidade e crescimento das culturas, ciclagem de nutrientes, produtividade e sustentabilidade do solo e assim a multifuncionalidade ecossistema. Dentre os microrganismos sensíveis a ações antropogênicas, destacam-se os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) que têm ocorrência generalizada e são influenciados por fatores diversos de natureza biótica e abiótica ocupando um importante nicho ecológico. O objetivo desta tese foi avaliar a diversidade de fungos micorrízicos arbusculares e aspectos funcionais em cenários contrastantes de uso do solo e de regime hídrico. O estudo é dividido em três capítulos. O **Capítulo I** delimitou a biogeografia de fungos micorrízicos arbusculares no estado de Santa Catarina-Brasil. O **Capítulo II** teve o objetivo de avaliar a influencia de diferentes sistemas de uso do solo sob a atividade e riqueza de FMA e o **Capítulo III** que avaliou a resistência e resiliência das comunidades de FMA de dois sistemas contrastantes de uso do solo sob a influência de eventos climáticos extremos e como estas comunidades operam em termos funcionais em Montemor-o-Novo (Sul de Portugal). A abordagem experimental utilizada foi para o **Capítulo I e II** foram realizadas coletas a campo em quatro regiões do Estado de Santa Catarina/Brasil em cinco sistemas de uso do solo: floresta nativa (FN), pastagem (PA), reflorestamento com eucalipto (RE), integração lavoura-pecuária (ILP) e plantio direto (PD). Em Portugal também foram realizadas coletas nos sistemas de manejo sustentável (MS) e manejo convencional (MC) em áreas de Montado (*Quercus suber* L.) (*Capítulo II*).

O **Capítulo III** foi realizado em Portugal a partir de experimentos de semi campo em unidades denominadas “modelos terrestres de ecossistemas” (terrestrial model ecosystems – TMEs) que consistiu na avaliação das alterações na estrutura e função das comunidades de FMA identificadas na Etapa I e sujeitas a diferentes eventos de pluviosidade extrema. No **Capítulo I**, a distribuição espacial das espécies de FMA nas regiões estudadas não é aleatória e a dissimilaridade na estrutura das comunidades do interior para o litoral de Santa Catarina está correlacionada com a distância geográfica. É confirma a hipótese de distância-dissimilaridade (*distance decay*) que prevê que a da similaridade entre duas comunidades pode ser ocasionado por eventos históricos, mas os resultados não rejeitam a hipótese de Baas-Becking uma vez que foram observadas relações significativas entre o teor de argila, de carbono orgânico; No **Capítulo II** foi concluído que a riqueza e diversidade de espécies de FMA foram influenciadas pelos sistemas de uso de forma pontual e dependente da região. As espécies *Acaulospora koskei* e *Glomus* sp. apresentaram-se com as principais espécie de caráter generalista, o que revela sua capacidade de adaptação a diferentes condições de solo; e No **Capítulo III** os FMA foram influenciados pelas alterações climáticas de regimes de chuva em diferentes manejos de produção.

Palavras-chave: usos do solo, biogeografia, diversidade, regime hídrico.

ABSTRACT

BIOGEOGRAPHY AND DIVERSITY OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI IN CONTRASTING SCENARIOS OF LAND-USE AND WATER REGIME

Most of agroecosystems biodiversity lies in soil, and the functions performed have direct and indirect effects on crop quality and growth, nutrient cycling, soil productivity and sustainability and, thus, ecosystem multifunctionality. Among the sensitive microorganisms to anthropogenic actions, arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), which have widespread occurrence and are influenced by various factors of biotic and abiotic nature, occupying an important ecological niche, are highlighted. This thesis aimed to evaluate the diversity of AMF and their functional aspects, in contrasting land-use and water regime scenarios. The study was divided into three chapters. Chapter I delimited the AMF biogeography in Santa Catarina State, Brazil. Chapter II aimed to evaluate the influence of different land-uses on AMF activity and richness and, Chapter III evaluated AMF communities' resistance and resilience in two contrasting land-uses under extreme climate events and also, how these communities operate in functional terms, in Montemor-o-Novo (Southern Portugal). For Chapter I and II, experimental approach consisted on field sampling in four regions of Santa Catarina State, Brazil, in five land-uses: native forest (FN), pasture (PA), eucalyptus afforestation (RE), crop-livestock integration (ILP) and no-till cropping (PD). Sampling in sustainable management systems (MS) and conventional management (CM) were performed in Portugal, in cork oak (*Quercus suber* L) areas (Chapter II). Chapter III was performed in Portugal, on semi-field experimental units called

"terrestrial model ecosystems" (TMEs), which consisted on the evaluation of structure and functions changes in AMF communities identified at stage I, subject to different extreme pluviosity events. In Chapter I, AMF species spatial distribution was found non-random and the communities' structure dissimilarity from countryside to coast was correlated to geographic distance. It confirmed the distance-dissimilarity (distance decay) hypothesis, which foresees that the similarity between two communities can be caused by historical events, but the results do not reject Baas-Becking hypothesis, since significant relationships with clay content and organic carbon were found; In Chapter II it was concluded that AMF species richness and diversity were influenced by land-use in a punctual and region dependent way. The species *Acaulospora koskei* and *Glomus* sp. were found as the main generalist species, unraveling their ability to adapt to different soil conditions; In Chapter III AMF were influenced by climatic alterations of water regime in different production managements.

Keywords: biogeography, diversity, land-use, water regime.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Capítulo I

- Figura 1 – Distribuição geográfica dos locais de amostragem e suas classificações climáticas e de solo no estado de Santa Catarina-Brasil..... 66
- Figura 2 - Análise de Coordenadas Principais (PCoA), utilizando o coeficiente de Bray-Curtis com base na frequência de ocorrência das espécies de FMA em cada sistema de uso do solo dentro de cada região do estado de Santa Catarina-Brasil..... 73
- Figura 3 - Classificação das espécies de FMA em Cosmopolitas (ocorrência em $\geq 66\%$ das áreas amostradas), Frequentes (ocorrência entre 34% e 65% das áreas), Ocasionais (ocorrência $\leq 33\%$ das áreas) e Ausentes (sem ocorrência)..... 77
- Figura 4 - Análise de redundância baseada na distância (dbRDA) entre ocorrência de espécies de fungos micorrízicos arbusculares e as variáveis ambientais Carbono orgânico total (COT), Teor de argila e Classe de Solo (LVE-Latossolo Vermelho-amarelo, AVA-Argissolo Vermelho-amarelo, CHA-Cambissolo Háplico e GHA-Gleissolo Háplico)..... 79

Capítulo II

Figura 1 - Distribuição geográfica, locais de amostragem e suas classificações climáticas e de solo em Santa Catarina.....	101
Figura 2 - Ocorrência de espécies de FMA em diferentes sistemas de uso do solo em Santa Catarina-Brasil.....	112
Figura 3 - Riqueza estimada de espécies de FMA com base em GLMM para tipo de uso do solo em cada região do estado de SC.....	114
Figura 4 - Potencial de inóculo micorrízico (%) com base em Modelos Mistos Lineares Generalizados (GLMM) para tipo de uso do solo em cada região do estado de SC.....	118
Figura 5 - Comprimento de micélio extrarradicular total (m g^{-1}) FMA com base em GLMM para tipo de uso do solo em cada região do estado de SC.....	120
Figura 6 - Classificação das espécies de fungomicorrízicos arbusculares (FMA) em Generalistas (ocorrência em $\geq 66\%$ das áreas amostradas), Intermediárias (ocorrência entre 34% e 65% das áreas), Preferentes (ocorrência em $\leq 33\%$ das áreas) e Ausente (sem ocorrência).....	123

Capítulo III

- Figura 1 - Ilustração dos tratamentos e tempo de experimento. Manejo sustentável com baixa intervenção antrópica (MS) e manejo convencional com uso de maquinário agrícola e atividade pecuária (MC)..... 145
- Figura 2 - Abundância de esporos de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) em diferentes sistemas de usos do solo na região do Montado, Portugal. Manejo sustentável com baixa intervenção antrópica (MS) e manejo convencional com uso de maquinário agrícola e atividade pecuária (MC)..... 149
- Figura 3 - Comprimento de micélio extrarradicular total (m g^{-1}) em diferentes sistemas de usos do solo na região do Montado, Portugal. Manejo sustentável com baixa intervenção antrópica (MS) e manejo convencional com uso de maquinário agrícola e atividade pecuária (MC)..... 151

LISTA DE TABELAS

Capítulo I

Tabela 1 - Análise de variância multivariada permutacional (PERMANOVA) da comunidade de fungos micorrízicos arbusculares com base no coeficiente de Bray-Curtis da frequência de ocorrência de espécies em sistemas de uso do solo hierarquizados dentro de cada região. A – tabela de PERMANOVA; B – teste de comparações múltiplas entre regiões do estado de SC.....	74
Tabela 2 - Medida de similaridade de Bray-Curtis (%) para frequência de ocorrência de fungos micorrízicos arbusculares entre as regiões do estado de SC.....	75

Capítulo II

Tabela 1 - Histórico dos sistemas de uso do solo nas localidades de amostragem em SC..... 103

Tabela 2 - Índices de diversidade dos fungos micorrízicos arbusculares estimados com base em Modelos Mistos Lineares Generalizados (GLMM) para os tipo de uso do solo em cada região de SC. (média ± 95% de intervalo de confiança)..... 112

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	33
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	35
2.1. BIOGEOGRAFIA DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES.....	35
2.2. FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EM DIFERENTES SISTEMAS DE USO DO SOLO.....	37
2.3. MODELOS TERRESTRES DE ECOSSISTEMAS.	41
2.4. FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES E ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS (RECURSOS HÍDRICOS).....	43
REFERÊNCIAS	45
3. HIPÓTESES.....	56
4. OBJETIVO GERAL.....	57
5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	58
6. CAPÍTULO I.....	59
6.1. INTRODUÇÃO.....	63
6.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	65
6.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
6.4. CONCLUSÃO.....	85
REFERÊNCIAS.....	86
7. CAPÍTULO II.....	94

INTRODUÇÃO.....	98
7.2. MATERIAL E MÉTODOS,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	100
7.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	111
7.4. CONCLUSÃO.....	129
REFERÊNCIAS.....	130
8. CAPÍTULO III.....	139
8.1. INTRODUÇÃO.....	141
8.2. MATERIAL E MÉTODOS,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	143
8.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	147
8.4. CONCLUSÃO.....	155
REFERÊNCIAS.....	156
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	162

1. INTRODUÇÃO

A biodiversidade constitui um elemento chave no provisionamento de serviços de ecossistema e, portanto, deve ser considerado um fator importante nos processos de uso e manejo dos ecossistemas. Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA), Filo *Glomeromycota*, classe *Glomeromycetes* (glomeromicetos), são um dos principais componentes da microbiota do solo e representam uma das simbioses mais abundantes, uma vez que formam relações simbióticas com a maioria das plantas terrestres, colonizando raízes e a partir da sua rede de hifas contribuindo para a melhoria da estrutura do solo e absorção mineral da planta, que em contrapartida fornece hidratos de carbono ao fungo.

Os fatores abióticos (climáticos, edáficos), fatores bióticos (planta hospedeira comunidade, interações interespecíficas) e propriedades intrínsecas de determinadas espécies de FMA (capacidade de dispersão, taxas de extinção) podem influenciar a estrutura da comunidade fúngica em diferentes escalas, agrossistemas e condições climáticas.

Apesar da ecologia destes fungos ser amplamente explorada em pesquisas científicas, existem muitas lacunas a serem preenchidas, junto com isto ainda existe a ação antrópica que vem alterando bruscamente a paisagem e os ciclos ecológicos de todo o planeta, tornando estudos de funcionalidade e preservação da biota mais urgentes. A biota do solo ainda constitui uma “caixa preta” em termos de diversidade e funcionalidade real, porém a importância para o equilíbrio, manutenção e funcionamento do ecossistema não é mais motivo de dúvidas. Por isso entender a distribuição e os fatores ambientais que afetam as comunidades de FMA é de extrema importância para o manejo ecológico destas espécies.

O presente trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV/UDESC) e no Departamento de

Ciência da Vida, Universidade de Coimbra em regime de Co-tutela, apresentando três capítulos descritos à seguir:

No Capítulo I foi estudada a distribuição e a composição de comunidades de FMA em solos ao longo de um gradiente geográfico (de regiões do interior para regiões do litoral) no Estado de Santa Catarina-Brasil, para testar as hipóteses de Baas-Becking (1934) e de distância-dissimilaridade (*distance-decay*) e verificar quais as variáveis ambientais que influenciam a estrutura das comunidades;

No Capítulo II propôs-se avaliar a influência de diferentes sistemas de uso do solo, comuns em diversas regiões do estado de Santa Catarina-Brasil e em diferentes tipos de solo na composição e diversidade estrutural das comunidades de FMA, e aspectos funcionais da simbiose relacionados a formação de hifas e capacidade infectiva no solo;

Por fim, o Capítulo III apresenta estudos realizados em áreas de Montado-Portugal com o objetivo de avaliar a resistência e resiliência das comunidades de FMA de dois sistemas contrastantes de uso do solo em ecossistemas de sobreiros (*Quercus suber* L.) submetidos a eventos climáticos extremos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. BIOGEOGRAFIA DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES

Biogeografia é a ciência que estuda a distribuição geográfica dos seres vivos no espaço através do tempo, com o objetivo de entender os padrões de organização espacial dos organismos e os processos que resultaram em tais padrões. Existem três componentes que devem ser avaliados em conjunto para o entendimento dos padrões de distribuição da biota: espaço (área geográfica de ocorrência dos organismos), tempo (eventos históricos que influenciaram os padrões atuais) e forma (os grupos de organismos) (HUMPHRIES, 2000).

A biogeografia é definida por dois eventos, um referente a aspectos *contemporâneos* como variações de fatores ambientais e outro relacionado a aspectos *evolutivos* ou *históricos* como o isolamento continental ou a distancia geográfica (MARTINY et al., 2006). Esta hipótese ecológica é a mais aceita atualmente, pois admite que características ambientais como o pH, disponibilidade de água, vegetação entre outros aspectos, atuam como modeladores das da diversidade e distribuição das comunidades biológicas. Entretanto, Martiny et al. (2006) não consideram que a variabilidade seja resultado apenas de fatores contemporâneos, mas também históricos. Uma pesquisa recente sugere que padrões biogeográficos microbianos são mais complexos do que a hipótese Baas-Becking. VAN DER GAST et al. (2011) observaram efeito da distância geográfica, associado ou não a efeitos ambientais, sugerindo que eventos anteriores como dispersão, especiação e extinção podem afetar as distribuições microbianas.

Assim diversos questionamentos vem sendo feitos sobre a distribuição dos FMA como por exemplo: Existem diferenças

na diversidade das comunidades locais? Se sim, que fatores influenciam a diversidade?

Os estudos sobre a estrutura da comunidade de fungos através de múltiplas escalas espaciais e temporais são importantes, considerando que os ecossistemas são alterados pelas atividade antrópicas (LILLESKOV et al., 2002; MUMMEY & RILLIG, 2006). Muitos pesquisadores estão reunindo trabalhos para melhorar a qualidade e o conteúdo das bases de dados (BRUNS et al., 2008) e os ecologistas estão enfatizando os estudos de distribuição das micorrizas variando de região para escalas continentais ou mais abrangentes como em ecossistemas inteiros (LILLESKOV & PARRENT, 2007). Estes esforços da ecologia de fungos para identificar e se concentrar em espécies, linhagens ou grupos funcionais são fundamentais para elucidar os serviços ecossistêmicos deste grupo de organismos.

Evidências sugerem que as comunidades de FMA mostram padrões de escala espacial que pode ser impulsionados pela distância geográfica e heterogeneidade ambiental. Van der Gast et al. (2011) concluíram que a diversidade a nível espacial foi maior no manejo orgânico em relação ao convencional. A escala utilizada foi de 250 km entre as 9 áreas e as análises comprovaram que há mudança significativa na comunidade com a distância e o maior peso a estas diferenças foi atribuído a heterogeneidade ambiental. Estudos de Martiny et al. (2006) também sugerem que a distancia geográfica pode interferir na distribuição dos fungos.

No entanto, Lekberg et al. (2007) descobriram que tanto a textura do solo como a distância geográfica (distância máxima 25 km) influenciaram a comunidade FMA em raízes de *Zea mays*, em 10 áreas. Estes resultados são confirmados pelo estudo de Oehl et al. (2010), que encontraram 61 espécies de FMA associadas com a classe de solo. Fatores edáficos como o pH e a precipitação pluviométrica que variam dentro do uso do solo tem efeito mais significativo nas comunidades

de FMA que o uso do solo em si. Hazard et al. (2013) encontraram pouca influência do uso do solo na riqueza do FMA mesmo utilizando uma ampla gama de manejos do solo no experimento (plantio convencional, pastagem, turfeiras) que continham vegetação diferenciada, apesar de estudos anteriores confirmarem que a comunidade vegetal afeta a distribuição dos FMA (FITZSIMONS et al., 2008; HAUSMANN & HAWKES, 2009).

Do ponto de vista prático, a biogeografia é uma ferramenta extremamente útil, para a conservação da biodiversidade. A biogeografia microbiana é uma área que vem ganhando cada dia mais espaço apesar dos estudos ainda serem escassos. O conhecimento acerca desta área é de extrema importância para entender os fatores que influenciam a distribuição dos fungos micorrízicos arbusculares nos ecossistemas para melhoria da gestão e conservação do ambiente edáfico.

2.2. FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES (FMA) EM DIFERENTES SISTEMAS DE USO DO SOLO

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA), Filo *Glomeromycota*, Classe *Glomeromycetes* são organismos biotróficos obrigatórios, que se associam á raízes de plantas vasculares terrestres epífitas, aquáticas e também com rizóides e talos de briófitas e outros vegetais basais formando a relação simbiótica mutualista denominada micorriza arbuscular e micotalia, para vegetais com e sem raízes (SCHÜßLER et al., 2001). Os FMA são muitas vezes considerados generalistas, uma vez que apenas 200 a 300 espécies foram descritas até o momento (ÖPIK et al., 2010; SCHÜßLER & WALKER, 2010).

Os FMA persistem no solo como esporos e colonizam as raízes através de hifas especializadas que se formam a partir do esporo em germinação na superfície da raiz. A partir daí as

hifas crescem entre as células corticais e penetram individualmente nas células da raiz formando os **arbúsculos** – estruturas extremamente ramificadas que acabam por ocupar a maioria do volume das células. Os arbúsculos são o principal local de troca de nutrientes entre o fungo e o hospedeiro. Através deles o fungo obtém açúcares da planta e esta os minerais que o fungo extrai do solo. Alguns fungos formam também **vesículas**, corpos globosos ricos em lípidos e com funções de armazenamento. A ação sinérgica das fases intrarradicular (vesícula, hifa, arbúsculo) e extrarradicular (hifa, esporo) do fungo são responsáveis pelo significado ecológico dos FMA, um grupo chave no ciclo solo-raiz-microrganismo (BONFANTE & GENRE, 2010).

Nesta simbiose a planta supre o fungo com energia para seu crescimento e reprodução via compostos de carbono provenientes da fotossíntese, e o fungo fornece a planta e ao solo vários benefícios: plantas colonizadas com FMA têm sua zona de depleção de nutrientes ampliada e podem ter aumentos na absorção de nutrientes inorgânicos, como fósforo (QUEREJETA et al., 2007) e nitrogênio (LEHMANN & RILLING, 2015). O fungo também auxilia na resistência da planta ao ataque de patógenos do sistema radicular e na capacidade de absorção de água (POZO & AZCON-AGUILAR, 2007). Os FMA acumulam carbono (RILLING et al., 2001) e contribuem para o aumento da biomassa microbiana no solo, favorecendo o processo de seqüestro de carbono na atmosfera (SMITH & READ, 2008). Ainda no solo estes fungos contribuem para a formação e estabilidade de agregados resultantes da ação física do micélio fúngico e da glomalina, que é uma glicoproteína produzida pelo fungo (RILLING & MUMMEY, 2006).

As práticas de manejo do solo afetam os atributos relacionados à qualidade do solo e a diversidade das espécies de FMA (MATHIMARAN et al., 2005; ALGUACIL et al., 2009; LUMINI et al., 2010; AVIO et al., 2013), desta forma

torna-se importante investigar o impacto das práticas de manejo nas propriedades edáficas e consequentemente na estrutura das comunidades de FMA.

As comunidades nativas de FMA são bastante variadas no que diz respeito à composição das espécies, pois a ocorrência é determinada pela vegetação e pelo ambiente. Carrenho et al. (2010) relataram a diversidade de FMA em ecossistemas brasileiros, tanto em naturais como cultivados, com base em 28 estudos de ocorrência de FMA em ecossistemas brasileiros onde Stürmer & Siqueira (2006), compilaram dados, encontrando 79 espécies em agrossistemas e 49 sob solos de florestas, o que evidencia a mudança de padrão de ocorrência com a alteração de ecossistemas naturais. Balota & Lopes (1996) observaram que monoculturas poderiam propiciar uma comunidade menos diversa se comparadas com sistemas que possuam uma rotatividade, o que poderia explicar a baixa diversidade de espécies no cafeeiro, além da baixa eficiência simbiótica dos fungos nativos.

A influência dos componentes bióticos sobre o estabelecimento e a associação micorrízica em agrossistemas deve ser considerada, tanto nos fatores diretamente ligados ao solo (fertilidade, porosidade...) e indiretamente (regime pluviométrico, cultivo, poluição ambiental, etc.). As práticas agrícolas como o preparo, correção da acidez, adição de fertilizantes químicos/orgânicos no solo podem alterar a estrutura das comunidades de FMA (SIQUEIRA et al., 1989). Segundo Miranda et al. (2005) de modo geral, observa-se maior número de esporos e a colonização radicular em áreas cultivadas quando comparadas com solos sob vegetação natural, mas a diversidade de espécies também é menor.

O revolvimento do solo promove a fragmentação da rede de hifas extrarradiculares estabelecidas no solo, rompendo as hifas e extravasando o seu conteúdo citoplasmático. Portanto o efeito desta fragmentação varia conforme a espécie: para

Glomeracea e Acaulosporacea, num primeiro momento ocorre o aumento dos propágulos infectivos, enquanto que para *Gigasporacea* ocorre o oposto (JASPER et al., 1989). Evans & Miller (1990) ressaltaram que o revolvimento do solo atua diretamente no processo de infecção e disseminação da colonização radicular, além de expor as estruturas fúngicas que atuam como propágulos afetando indiretamente, por ação da radiação solar, altas temperaturas, variação de umidade e predadores (ENTRY et al., 2002). A remoção da vegetação também impossibilita que os FMA se estabeleçam e ou completem seu ciclo de vida.

O plantio direto aumenta a proporção de macroagregados e macroporos, propiciando uma boa umidade e aeração, influenciando os processos bioquímicos e da biota do solo. Colozzi-Filho et al. (1999) observaram que em solos com sucessão de culturas a colonização radicular de trigo foi maior quando cultivado em plantio-direto, comparado com o plantio convencional, pois este último reduz a extensão do micélio no solo e a diminuição da colonização. É importante ressaltar que o efeito do preparo do solo sobre a comunidade micorrízica pode variar com o tipo de solo (ANTUNES et al., 1988) e a planta cultivada. Em solos arenosos do estado de Goiás, Cordeiro et al. (2005) observaram que a colonização e a esporulação foram maiores em área de milho sob plantio direto quando comparada com a cultura da soja e o nabo forrageiro.

Em relação ao manejo de culturas no solo, Johnson et al. (1992) demonstraram que a monocultura pode selecionar FMA com baixa eficiência simbiótica, diminuindo a eficiência da comunidade nativa, desequilibrando as relações entre populações. Já a rotação de culturas favorece a multiplicação dos FMA e estimula o estabelecimento da associação micorrízica e o efeito desta nas plantas (MIRANDA & MIRANDA, 1997). O cultivo de culturas anuais, adubos verdes e forrageiras, em rotação aumentam a população nativa e beneficiam os cultivos subseqüentes.

2.3. MODELOS TERRESTRES DE ECOSSITEMAS (TERRESTRIAL MODEL ECOSYSTEMS – TMEs)

Os TMEs são mesocosmos compostos por amostras indeformadas de solo que buscam simular processos e interações dos componentes bióticos e abióticos podendo, portanto, fornecer informações mais completas que os testes ecológicos em vasos ou mesmo a campo.

Essa metodologia pode ser amplamente utilizada para avaliações ecológicas ainda que sua complexidade faça com que não sejam apropriados para rotinas laboratoriais. Por outro lado, Knacker et al. (2004) afirmam que a extração de amostras de solo, armazenamento e manutenção dos mesocosmos, em laboratório são técnicas simples de baixo custo, e esses são facilmente replicável e permitem a avaliação estatística dos dados. Desta maneira, desenvolver metodologias ou adaptações que permitam esse tipo de avaliação tem fundamental importância para o entendimento do comportamento das comunidades ou organismos-teste quando expostos à diferentes condições ambientais.

A maiorias dos estudos publicados sobre a Biodiversidade do solo referem-se a estudos de levantamento, geralmente realizados em ecossistemas semi-naturais. Apenas em um quinto das publicações apresentam estudos realizados em solos agrícolas (POWLSON et al., 2011). Os estudos destes ecossistemas agrícolas indicam grande perda de diversidade do solo quando sistemas naturais são convertidos em agrícolas, entretanto, pouco se conhece sobre o quanto de biodiversidade se pode perder sem afetar a oferta dos serviços de ecossistemas necessários. Estudar tais relações a campo constitui um grande desafio dada a sua complexidade. Os TMEs surgem como alternativas por oferecerem a possibilidade de estudar as relações entre o uso do solo, variáveis ambientais e

comunidades microbianas em condições de semi-campo de forma controlada e reprodutível.

Sendo a biodiversidade elemento chave no provisionamento de serviços de ecossistema, deve portanto ser considerada nos processos de uso e manejo dos ecossistemas (POWLSON et al., 2011). As atividades humanas e os fenômenos de mudança climática global são questões que podem condicionar a biodiversidade assim como a prestação de serviços. É crescente o interesse por política que assegurem a não perda líquida de biodiversidade e oferta de serviços de ecossistema, dando prioridade a estudos que contribuam para o aumento do conhecimento sobre as relações entre a biodiversidade, a provisão de serviços e os impactos das mudanças climáticas (EUROPEAN COMMISSION, 2008). A natureza contribui para o bem-estar humano com serviços de provisionamento, regulação, culturais e de suporte (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2003).

O sistema solo contribui essencialmente com serviços de suporte (formação e retenção do solo e ciclagem de nutrientes) e serviços regulatórios (Sequestro de carbono) que são ofertados por uma ampla gama de organismos do solo (LAVELLE & SPAIN, 2001). Serviços de ecossistema são usualmente providos por espécies com diferentes características ecológicas (“*traits*”).

Existe um corrente interesse em relacionar características funcionais de diferentes grupos de organismos do solo com diferentes serviços de ecossistemas que poderiam estabelecer meios lógicos de acessar o funcionamento dos diferentes ecossistemas (DE BELLO et al., 2010). Esta abordagem é mais promissora quando se utiliza grupos que desempenham processo mais específicos nos solos como é o caso dos fungos micorrízicos arbusculares (POWLSON et al., 2011)

2.4. FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES E ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS (Recursos hídricos)

A produção agrícola é determinada pela cultura, condições ambientais e práticas agronômicas. Com o aumento áreas cultivadas em todo o mundo, sistemas agrícolas dependem de recursos hídricos, sendo assim, a água pode ser um fator chave limitante restringindo a sustentabilidade e desenvolvimento agrícola (LAMBIN et al., 2003).

A simbiose entre os FMA e as plantas melhora a capacidade do hospedeiro para sobreviver a estresse nutricional e hídrico (BLANKE et al., 2011; CAVAGNARO et al., 2012). Os FMA são importantes na promoção de crescimento radicular e sobrevivência da planta em ambientes áridos (AZCÓN et al., 2013; LIU et al., 2007). Plantas nativas em regiões áridas e semi-áridas geralmente mostram altos níveis de colonização micorrízica, indicando considerável relevância da simbiose para o desempenho da planta sob estresse hídrico (TCHABI et al., 2008; WORCHEL et al., 2013). Estudos têm mostrado que o micélio extrarradicular transfere fungos água para as plantas hospedeiras sob condições de baixa umidade do solo (KHALVATI et al., 2005; LIU & CHEN, 2007; MARULANDA et al., 2003).

Os estresses edáficos, como déficit de água e desequilíbrio do solo em nutrientes, afetam a diversidade, abundância de fungos ma nas zonas áridas e semi-áridas (CARTMILL et al., 2008). Por exemplo, Simpson & Daft (1990) constataram que o estresse hídrico reduziu significativamente a produção de esporos, mostrando que o número de esporos foi reduzido pela metade quando submetido a estresse hídrico na cultura do milho e que o efeito sobre o número de esporos em sorgo foi ainda maior. Miller & Bever, (1999) identificaram que *Glomus leptotichum* tem uma grande adaptação a diferentes condições hídricas. *Acaulospora laevis*, *G. etunicatum* e *Scutellospora heterogama* eram abundantes

em áreas mais secas; enquanto *A. trappei* e *G. clarum* foram mais abundantes em áreas alagadas. Ainda, *G. reticulatum* e *A. bireticulata* foram encontrados em solo mais seco, enquanto *G. clarum* foi mais rico em parcelas com maior presença de água.

A seca é um dos principais fatores de estresse abióticos negativamente afetando a produtividade em todo o mundo. A possibilidade de aumentar a resistência à seca em plantas através da inoculação com FMA tem sido amplamente investigada (AUGÉ, 2001; RAPPARINI & PEÑUELAS, 2014; SAIA et al., 2014). Recentemente foi demonstrado que as inoculações FMA em sistemas agroflorestais como *Phaseolus mungo*, *Triticum aestivum*, *Eucalytus tereticornis* e *Albizia procera*, poderia ser mais importante do que a umidade do solo para melhorar o crescimento das plantas (SHUKLA et al., 2013).

A irrigação também tem um impacto sobre a colonização e densidade de esporos na rizosfera, demonstrando que o aumento da oferta de água teve um efeito negativo na colonização micorrízicas (SCHREINER & LINDERMAN, 2005; NDIAYE et al., 2011; GARCÍA et al., 2008). Mais recentemente, tem sido sugerido que os benefícios de várias espécies de FMA em plantas podem ser maiores do que aqueles dos isolados individuais (HOEKSEMA et al., 2010; VERBRUGGEN & KIERS, 2010). Estes benefícios podem ser o resultado de diferenciação de nicho e facilitação entre espécies de fungos, efeito complementar, (MAHERALI & KLIRONOMOS, 2007) ou o efeito dominante de uma determinada espécie produtiva individual, efeito de seleção (VOGELSANG et al., 2006).

REFERENCIAS

ALGUACIL, M.M.; ROLDÁN, A.; TORRES, M.P. **Assessing the diversity of AM fungi in arid gypsophilous plant communities.** Environmental Microbiology, 11:2649-2659, 2009.

ANTUNES, V.; SILVEIRA, A.P.; CARDOSO, E.J.B.N. **Interação entre diferentes tipos de solo e fungos micorrízicos vesículo-arbusculares na produção de mudas de café (*Coffea arabica*, L.).** Turrialba, 38:117-122, 1988.

AUGÉ, R.M. **Water relations, drought, and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis.** Mycorrhiza, 11:3-42, 2011.

AVIO, L., et al. **Impact of nitrogen fertilization and soil tillage on arbuscular mycorrhizal fungal communities in a Mediterranean agroecosystem.** Soil Biology and Biochemistry 67:285-294, 2013.

AZCÓN, R., et al. **Abiotic stress remediation by the arbuscular mycorrhizal symbiosis and rhizosphere bacteria/yeast interactions.** In: De Bruijn, F.J. (ed) Molecular microbial ecology of the rhizosphere. Wiley-Blackwell, Hoboken, 991-1003, 2013.

BALOTA, E.L.; LOPES, E.S. **Introdução de fungo micorrizico arbuscular no cafeeiro em condições de campo:**

I. Persistência e interação com espécies nativas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 20:217-223, 1996.

BLANKE, V., et al. **Nitrogen supply affects arbuscular mycorrhizal colonization of *Artemisia vulgaris* in a phosphate-polluted field site.** New Phytologist, 166: 981-992, 2011.

BONFANTE, P., et al. **Disclosing arbuscular mycorrhizal fungal biodiversity in soil through a land-use gradient using a pyrosequencing approach.** Environmental Microbiology, 12:2165-2179, 2010.

BRUNS, T.D.; ARNOLD, A.E.; HUGHES, K.W. **Fungal networks made of humans: UNITE, FESIN, and frontiers in fungal ecology.** New Phytologist, 177: 586–588, 2008.

CARRENHO, R., et al. **Fungos micorrízicos arbusculares em agrossistemas brasileiros.** In: SIQUEIRA, J.O.; DE SOUZA, F.A.; CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M. Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil. Lavras: Editora UFLA, 1 ed. p. 153-214, 2010.

CARTMILL, A.D.; ALARCON, A.; VALDEZ, D. **Arbuscular mycorrhizal fungi enhance tolerance of *Rosa multiflora* cv. Burrto bicarbonate in irrigation water.** Journal of plant Nutrition, 30:1517-1540, 2008.

CAVAGNARO, T.R.; BARRIOS-MASIAS, J.L.E. **Arbuscular mycorrhizas and their role in plant growth, nitrogen**

interception and soil gas efflux in na organic production system. Plant and Soil, 353:181-194, 2012.

COLOZZI-FILHO, A.; BALOTA, E.L.; ANDRADE, D.S.
Microrganismos e processos biológicos no sistema de plantio direto. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIM, G.; FURTINI-NETO, A.E. e CARVALHO, j.G. org. Soil Fertility, Soil Biology and Plant nutrition Inter-relationship. Lavras , Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, 1ed. p147-153, 1999.

CORDEIRO, M.A.S., et al. **Colonização e densidade de esporos de fungos micorrízicos em dois solos do cerrado sob diferentes sistemas de manejo.** Pesquisa Agropecuária Tropical, 35:147-153, 2005.

DE BELLO, F., et al. **Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits.** Biodiversity and Conservation, 19:2873-2893, 2010.

ENTRY, J.A., et al. **Influence of adverse soil conditions on the formation and function of arbuscular mycorrhizas.** Advances in Environmental Research, 7:123-138, 2002.

EUROPEAN COMISSION. Communication from the commission to the European Parliament, the council, the economic and social committee and the committee of the regions. Our life, our natural capital: an EU biodiversity strategy to 2020. COM(2011) 244 final, Brussels, 2008.

EVANS, D. G.; MILLER, M. H. **The role of the external mycelial network in the effect of soil disturbance upon vesicular-arbuscular mycorrhizal colonization of maize.** New Phytologist, 114:65-71, 1990.

FITZSIMONS, M.S.; MILLER, R.M.; JASTROW, J.D. **Scale dependent niche of arbuscular mycorrhizal fungi.** Oecologia 158:117-127, 2008.

GARCÍA, I.; MENDONZA, R.; POMAR, M.V. **Deficit and excess of soil water impact on plant growth of *Lutetia* by affecting nutrient uptake and arbuscular mycorrhizal symbiosis.** Plant and Soil, 304:177-181, 2008.

HAUSMANN, N.T.; HAWKES, C.V. **Plant neighborhood controls arbuscular mycorrhizal community composition.** New Phytologist, 183: 1188-1200, 2009.

HAZARD, C., et al. **The role of local environment and geographical distance in determining community composition of arbuscular mycorrhizal fungi at the landscape scale.** The ISME Journal, 7:498-508, 2013.

HOEKSEMA, J.D., et al. **A meta-analysis of context-dependency in plant response to inoculation with mycorrhizal fungi.** Ecology Letters, 13: 394-407, 2010.

HUMPHRIES, C.J. **Form, space and time; which comes first?** Journal of Biogeography, 27:11-15, 2000.

JASPER, D. A., ABBOTT, L. K.; ROBSON, A. D. **Hyphae of a vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus maintain infectivity in dry soil, except when the soil is disturbed.** New Phytologist, 112:101-107, 1989.

JOHNSON, N.C., et al. **Mycorrhizae: Possible explanation for yield decline with continuous corn and soybean.** Agronomy Journal, 84:387-390, 1992.

KHALVATI, M.A., et al. **Quantification of water uptake by arbuscular mycorrhizal hyphae and its significance for leaf growth, water relations, and gas exchange of barley subjected to drought stress.** Plant Biology, 7:706–712, 2005.

KNACKER T., et al. **Ring-testing and field validation of a Terrestrial Model Ecosystem (TME) - an instrument for testing potentially harmful substances: conceptual approach and studies design.** Ecotoxicology, 13:5-23, 2004.

LAMBIN, E.F.; GEIST, H.J.; LEPERS, E. **Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions.** Annual Review of Environment and Resources, 28:205-241, 2003.

LAVELLE, P.; SPAIN, A.V. **Soil Ecology.** Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, p. 654, 2001.

LEHMANN, A.; RILLIG, M.C. **Arbuscular mycorrhizal contribution to copper, manganese and iron nutrient concentrations in crops - a meta-analysis.** Soil Biology & Biochemistry, 81:147-158, 2015.

LEKBERG, Y.; KOIDE, R.T.; ROHR, J.R.; ALDRICH-WOLFE, L.; MORTON, J.B. **Role of niche restrictions and dispersal in the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities.** *Journal of Ecology*, 95:95-105, 2007.

LILLESKOV, E.A., et al. **Belowground ectomycorrhizal community change over a nitrogen deposition gradient in Alaska.** *Ecology* 83:104-115, 2002.

LILLESKOV, E.A.; PARRENT, J.L. **Can we develop general predictive models of mycorrhizal fungal community-environment relationships?** *New Phytologist*, 174: 250-256, 2007.

LIU, R.J.; CHEN, Y.L. **Mycorrhizology** (China). Science Press, Beijing, 2007.

LUMINI, E., et al. **Disclosing arbuscular mycorrhizal fungal biodiversity in soil through a land-use gradient using a pyrosequencing approach.** *Environmental Microbiology* 12:2165-2179, 2010.

MAHERALI, H.; KLIRONOMOS, J.N. **Influence of phylogeny on fungal community assembly and ecosystem functioning.** *Science*, 316:1746-1748, 2007.

MARTINY, J. B., et al. **Microbial biogeography: putting microorganisms on the map.** *Nature Reviews Microbiology*, 4:102- 112, 2006.

MARULANDA, A.; AZCÓN, R.; RUIZ-LOZANO, J.M.
Contribution of six arbuscular mycorrhizal fungal isolates to water uptake by *Lactuca sativa* L. plants under drought stress. *Physiologia Plantarum*, 119:526-533, 2003.

MATHIMARAN, N., et al. ***Glomus intraradices* dominates arbuscular mycorrhizal communities in a heavy textured agricultural soil.** *Mycorrhiza*, 16: 61-66, 2005.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. Ecosystems and their services. Pages 49–70 in *Ecosystems and Human Wellbeing: A Framework for Assessment*. Washington (DC): Island Press. doi:10.2903/j.efsa.2010.1821, 2003.

MILLER, S.P.; BEVER, J.D. **Distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in stands of the wetland grass *Panicum hemitomon* along a wide hydrologic gradient.** *Oecologia*, 119, 586–592, 1999.

MIRANDA, J. C. C.; VILELA L.; MIRANDA, L. N.
Dinâmica e contribuição da micorriza arbuscular em sistemas de produção com rotação de culturas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40:1005-1014, 2005.

MIRANDA, J.C.C.; MIRANDA, L.N. **Micorriza arbuscular.** In: VARGAS, M.A.T.; Hungria, M., eds. *Biologia dos Solos dos Cerrados*. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 67:71, 1997.

MUMMEY, D..L.; RILLIG, MC. **The invasive plant species *Centaurea maculosa* alters arbuscular mycorrhizal fungal communities in the field.** Plant and Soil, 288:81-90, 2006.

NDIAYE, M., et al. **Improved Acacia senegal growth after inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi under water deficiency conditions.** International Journal of Agriculture and Biology, 2:271-274, 2011.

OEHL, F., et al. **Soil type and land use intensity determines the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities.** Soil Biol Biochemist, 42: 724-738, 2010.

ÖPIK, M., et al. **The online database MaarjAM reveals global and ecosystemic distribution patterns in arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota).** New Phytologist, 188: 223-241, 2010.

POWLSON, D.S., et al. **Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services.** Food Policy, 36:72-87, 2011.

POZO, M.J.; AZCÓN-AGUILAR, C. **Unraveling mycorrhizainduced resistance.** Current Opinion in Plant Biology 10: 393-398, 2007.

QUEREJETA, J.I.; EGERTON-WARBURTON, L.M.; ALLEN, M.F. **Hydraulic lift may buffer rhizosphere hyphae against the negative effects of severe soil drying in a California Oak savanna.** Soil Biology & Biochemistry, 39:409-417, 2007.

RAPPARINI, F.; PENUELAS, J. **Mycorrhizal fungi to alleviate drought stress on plant growth, in Use of Microbes for the Alleviation of Soil Stresses.** Springer Science and Business Media, 1: 21-42, 2014.

RILLING, C. M.; MUMMEY, D. **Mycorrhizas and soil structure.** New Phytologist, 171: 41-53, 2006.

SAIA, S., et al. **The effect of arbuscular mycorrhizal fungi on total plant nitrogen uptake and nitrogen recovery from soil organic material.** Journal Agriculture Science, 152: 307-378, 2014.

SCHREINER, R. P.; LINDERMAN, R. G. **Mycorrhizal colonization in dryland vineyards of the Willamette Valley, Oregon.** Small Fruits Review, 4:41 -55, 2005.

SCHÜßLER, A. **A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution.** Mycology Resource, 105:1413–1421, 2001.

SCHÜßLER, A.; WALKER, C. **The Glomeromycota. A species list with new families and new genera.** Gloucester, England, 2010.

SHUKLA, A.; VYAS, D.; JHA, A. **Soil depth: an overriding factor for distribution of arbuscular mycorrhizal fungi.** Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 13: 23-33, 2013.

SIMPSON, D., DAFT, M.J. **Interactions between water-stress and different mycorrhizae development in maize and sorghum.** Plant Soil, Hague, 121:179-186, 1990.

SIQUEIRA, J.O.; A. COLOZZI-FILHO, E. O. **Ocorrência de micorrizas vesicular-arbusculares em agro e ecossistemas do estado de Minas Gerais.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, 24:1499-1506, 1989.

SMITH, S.E., READ, D.J. **Mycorrhizal Symbiosis.** Academic Press, New York. 2008.

STÜRMER, S.L.; SIQUEIRA, J.O. **Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in Brazilian ecosystems.** In: MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O.; BRUSSAARD, L. (Ed.). Soil biodiversity in Amazonian and other Brazilian ecosystems. Wallingford: CABIPub. p 206-236. 2006.

TCHABI, A., et al. **Arbuscular mycorrhizal fungal communities in sub-Saharan savannas of Benin, West Africa, as affected by agricultural land use intensity and ecological zone.** Mycorrhiza, 18:181-195, 2008.

VAN DER GAST, C.J., et al. **Spatial scaling of arbuscular mycorrhizal fungal diversity is affected by farming practice.** *Environment Microbiology*, 13:241-249, 2011.

VERBRUGGEN, E.; KIERS, E.T. **Evolutionary ecology of mycorrhizal functional diversity in agricultural systems.** *Evolutionary Applications*, 3:547-560, 2010.

VOGELSANG, K.M.; REYNOLDS, H.L.; BEVER, J.D. **Mycorrhizal fungal identity and richness determine the diversity and productivity of a tallgrass prairie system.** *New Phytologist*, 172:554-562, 2006.

WORCHEL, E.R.; GLAUQUE, H.E.; KIVLIN, S.N. **Fungal symbionts alter plant drought response.** *Microbiology Ecology* 65:671-678, 2013.

3. HIPÓTESES

As distâncias estabelecidas pelo gradiente geográfico promovem dissimilaridade na diversidade estrutural das comunidades de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) (*distance- decay*) e esta dissimilaridade é ocasionada por dispersão espacial limitada;

O tipo de uso do solo, atributos edáficos e fatores ambientais nos habitats interagem, dirigindo as mudanças na distribuição e na composição do FMA em cada região, como proposto na hipótese de Baas-Becking;

Os FMA são sensíveis às práticas de manejo e uso do solo apresentando mudanças no padrão de ocorrência com a alteração dos ecossistemas naturais;

Os manejos sustentáveis suportam uma maior diversidade de FMA do solo quando comparados com manejos mais impactados, o que vai conferir maior resistência e/ou resiliência em relação aos eventos climáticos.

4. OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho teve o objetivo de estudar a distribuição biogeográfica e a composição de comunidades de fungos micorrízicos arbusculares, bem como a influência do uso do solo e o regime hídrico sob estes organismos.

5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar a riqueza de espécies das comunidades de fungos micorrízicos arbusculares em solos tropicais (Capítulo I);

Avaliar os efeitos de diferentes sistemas de uso do solo na ocorrência de espécies de FMAs e em aspectos funcionais da simbiose ao longo do estado de SC, assim como suas possíveis relações com variáveis químicas, físicas e biológicas nos solos tropicais e sua relação com o uso do solo em diferentes regiões de Santa Catarina-Brasil (Capítulo II);

Avaliar a resistência e resiliência das comunidades de FMA de dois sistemas contrastantes de uso do solo sob a influência de eventos climáticos extremos e como estas comunidades operam em termos funcionais em Montemor-o-novo (Sul de Portugal) (Capítulo III).

6. CAPÍTULO I

DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EM SOLOS DO ESTADO DE SANTA CATARINA

RESUMO

Entender os processos ecológicos envolvidos e prever as respostas ambientais das comunidades de FMA no solo constitui uma etapa importante para melhoria da gestão e conservação da biodiversidade e avanços no estabelecimento das relações entre diversidade e funcionalidade nos ecossistemas. Neste sentido, pela primeira vez em uma zona de clima subtropical e no Brasil, investigamos a distribuição biogeográfica e a composição de comunidades de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) em solos ao longo de um gradiente geográfico (de regiões do interior para regiões do litoral) para testar as hipóteses de Baas-Becking e de distância-dissimilaridade (*distance-decay*) e verificar quais as variáveis ambientais (solo) que influenciam a estrutura das comunidades de FMA. Foram realizadas coletas a campo em cinco sistemas de uso do solo: floresta nativa (FN), reflorestamento com eucalipto (RE), pastagem (PA), integração lavoura-pecuária (ILP) e plantio direto (PD); distribuídos em quatro regiões (Planalto - P, Oeste - O, Leste - L e Sul - S) do Estado de Santa Catarina- Brasil. As amostragens foram realizadas no inverno de 2011 e no verão 2012, . Em todas as regiões foram selecionados três municípios que constituíram as repetições. Em cada sistema de uso do solo foi estabelecida uma grade amostral com nove pontos, georeferenciados e distanciados em 30m, considerando 20m de bordadura, totalizando 100 m² de área. As espécies de FMAs foram identificadas através de esporos recuperados em culturas armadilhas. A distribuição espacial das espécies de FMA nas regiões estudadas não é

aleatória e a dissimilaridade na estrutura das comunidades do interior para o litoral de Santa Catarina está relacionada com a distância geográfica. É confirmada a hipótese de distância-dissimilaridade (*distance decay*) que prevê que a similaridade entre duas comunidades pode ser ocasionada por eventos passados como limitação na dispersão espacial, especiação e extinção, mas nossos resultados não rejeitam a hipótese de Baas-Becking uma vez que foram observadas relações significativas com a classe de solo e em menor grau com o teor de argila e de carbono orgânico dos solos.

Palavras-chave: *Glomeromycetes*, biogeografia, diversidade, *distance-decay*.

ABSTRACT

GEOGRAPHIC DISTRIBUTION OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI IN SANTA CATARINA STATE SOILS

Understanding the ecological processes involved and predict environmental responses of the arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) communities in soil is an important step to improve management and biodiversity conservation and also to advance the establishment of ecosystems diversity and functionality relationships. In this sense, it was investigated for the first time, the biogeographic distribution and composition of AMF communities in soils along a geographic gradient (from countryside to coast region) in order to test Baas-Becking and distance-dissimilarity (distance-decay) hypotheses and, check which soil environmental variables influenced AMF communities' structure. Field samples were collected in four regions of Santa Catarina State, Brazil in five land-uses in five land-uses: native forest (FN), pasture (PA), eucalyptus afforestation (RE), crop-livestock integration (ILP) and no-till cropping (PD). This study was conducted between 2011-2012, in winter and summer, on Highland Plateau (P), Western (O), Eastern (L) and Southern (S) regions of Santa Catarina State. True replicates consisted of three selected municipalities each region. A sampling geogrid, with nine points, georeferenced and spaced at 30m, considering a 20m border, totaling 100 m², was established for each land-use. AMF species were identified through recovered spores from trap-cultures. AMF species spatial distribution in the studied regions was found non-random and the communities' structure dissimilarity from countryside to coast was correlated to geographic distance. It confirmed the distance-dissimilarity (distance decay)

hypothesis, which foresees that the similarity between two communities can be caused by past events, as limitation on spatial dispersal, speciation and extinction, but our results did not reject Baas-Becking hypothesis, since significant relationships with clay content and organic carbon were found.

Keywords: biogeography, distance-decay, diversity, *Glomeromycetes*.

6.1 INTRODUÇÃO

Os fungos micorrízicos arbusculares, Filo *Glomeromycota*, classe *Glomeromycetes* constituem importante componente da diversidade e biomassa microbiana do solo, colonizando as raízes e a partir da sua rede de hifas contribuindo para a absorção de água e nutrientes para as plantas (SIKES et al., 2009). Além disso, podem auxiliar na melhoria da estrutura do solo. Através de seus efeitos no hospedeiro, os FMAs afetam múltiplos processos e serviços ecossistêmicos, incluindo a produtividade primária, a ciclagem de nutrientes, a manutenção da estrutura do solo, a estocagem de C no solo, regulação biológica de populações, competição e diversidade vegetal (VAN DER HEIJDEN et al., 2003; WILSON et al., 2009; VERBRUGGEN et al., 2012; HAZARD et al., 2013; AVERILL et al., 2014).

Estes fungos são considerados cosmopolitas por colonizarem mais de 80% das plantas terrestres (WANG & QIU 2006; SMITH & READ, 2008), apesar de estudos indicarem certa restrição a ecossistemas específicos, tipos de vegetação e clima (OEHL & SIEVERDING, 2004). Aproximadamente 200 espécies de FMA foram descritas nos mais variados ecossistemas terrestres. O conhecimento atual sobre os padrões de distribuição geográfica e as respostas dessas espécies aos fatores ambientais está limitado a locais específicos e existem poucos estudos em escalas geográficas mais amplas (BAHRAM et al., 2014).

Tradicionalmente, assumiu-se que os padrões biogeográficos da diversidade microbiana seguem a hipótese de Baas-Becking que pressupõe que “tudo está em todo lugar, porém o ambiente seleciona” (BAAS-BECKING, 1934), ou seja, as comunidades tem sua composição determinada pelo ambiente local não sendo influenciadas por fatores geográficos (HARZARD et al., 2013). Diversos fatores abióticos (climáticos, edáficos) e bióticos (planta hospedeira

comunidade, interações interespecíficas), assim como propriedades intrínsecas de determinadas espécies de FMA (capacidade de dispersão e taxas de extinção) influenciam a estrutura da comunidade fúngica em diferentes escalas geográficas (CHAUDHARY et al., 2008; CARUSO et al., 2012). As condições edáficas como a disponibilidade de nutrientes, pH, textura, umidade, temperatura, aeração, agregação, matéria orgânica e composição da microbiota também foram identificadas como fatores importantes na distribuição e funcionalidade das comunidades de FMA (STHAL & CHRISTENSEN, 1991).

Em contrapartida Van Der Gast et al. (2011) sugerem que as comunidades FMA apresentam padrões de escala espacial que podem ser impulsionados não só por fatores ambientais mas também pela distância geográfica. Estudos mais recentes sobre diversidade microbiana sugerem padrões mais complexos onde o efeito da distância geográfica é demonstrado (ODA et al., 2003; FULTHORPE et al., 2008), com ou sem efeitos ambientais, indicando que eventos históricos como limitação da dispersão, especiação e extinção, podem também afetar a distribuição e estrutura das comunidades (MARTINY et al., 2006; VAN DER GAST et al., 2011).

Entender os processos ecológicos envolvidos e prever as respostas ambientais das comunidades de FMA no solo constitui uma etapa importante para melhoria da gestão e conservação da biodiversidade e avanços no estabelecimento de relações entre diversidade e funcionalidade nos ecossistemas. Neste sentido, pela primeira vez em uma zona de clima subtropical e no Brasil, investigamos a distribuição biogeográfica e a composição de comunidades de fungos micorrízicos arbusculares em solos ao longo de gradiente geográfico (de regiões do interior para regiões do litoral) para testar as hipóteses de Baas-Becking (1934) e de distância-dissimilaridade (*distance-decay*) (MARTINY et al., 2006) e

verificar quais as variáveis ambientais (solo) que influenciam a estrutura das comunidades de FMA.

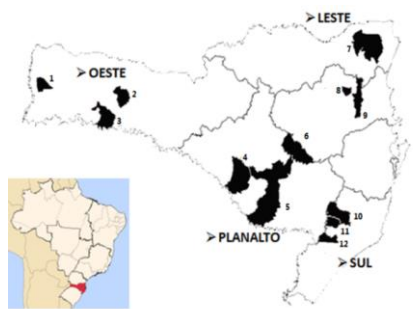
Nossas hipóteses são: 1) que o tipo de uso do solo, atributos edáficos e fatores ambientais nos habitats analisados interagem, dirigindo as mudanças na distribuição e na composição em cada região, como proposto na hipótese de Baas-Becking; e 2) que as distâncias estabelecidas pelo gradiente geográfico também promovem dissimilaridade na diversidade estrutural das comunidades de FMA (*distance-decay*) e que esta dissimilaridade é ocasionada por dispersão espacial limitada, independente de diferenças ambientais entre as regiões (Teoria Neutral de HUBBEL, 2001).

6.2 MATERIAL E MÉTODOS

Áreas

Este estudo foi realizado ao longo de um gradiente geográfico do interior (Oeste) para o litoral (Sul) do Estado de Santa Catarina, Sul do Brasil, perfazendo quatro regiões distintas: Oeste (O), Planalto (P), Leste (L) e Sul (S). Em cada uma das regiões foram selecionados três municípios representativos que constituíram as repetições deste estudo. No Oeste: Xanxerê (XAN), São Miguel do Oeste (SMO) e Chapecó (XAP); no Planalto: Campo Belo do Sul (CBS), Santa Teresinha do Salto (STS) e Otacílio Costa (OTC); no Leste: Joinville (JOI), Blumenau (BLU) e Timbó (TIM), e no Sul: Orleans (ORL), Lauro Müller (LAU) e Siderópolis (SID) (Figura 1).

Figura 1 - Distribuição geográficas dos locais de amostragem e suas classificações climáticas e de solo no estado de Santa Catarina-Brasil.



Região	Localidades	Nº Mapa	Latitude	Longitude	Altitude	Clima (Köppen)	Classe solo
Oeste	SMO	1	26° 43' 31" S	53° 31' 05" W	645m	Subtropical (Cfa)	Latossolo Vermelho
	XAN	2	26° 52' 37" S	52° 24' 15" W	800m	Subtropical (Cfa)	Latossolo Vermelho
	CHA	3	27° 05' 47" S	52° 37' 06" W	674m	Subtropical (Cfa)	Latossolo Vermelho
Planalto	CBS	4	27° 53' 57" S	50° 45' 39" W	1017m	Subtropical (Cfb)	Nitossolo Bruno
	STS	5	27° 48' 58" S	50° 19' 34" W	884m	Subtropical (Cfb)	Nitossolo Bruno
	OC	6	27° 28' 59" S	50° 07' 19" W	884m	Subtropical (Cfb)	Cambissolo Húmico
Leste	JOI	7	26° 18' 16" S	48° 50' 44" W	3m	Subtropical (Cfa)	Gleissolo Háplico
	TIM	8	26° 49' 24" S	49° 16' 18" W	68m	Subtropical (Cfa)	Cambissolo Háplico
	BLU	9	26° 55' 10" S	49° 03' 58" W	21m	Subtropical (Cfa)	Argissolo Vermelho Amarelo
Sul	ORL	10	28° 21' 32" S	49° 17' 29" W	132m	Subtropical (Cfa)	Argissolo Vermelho Amarelo
	LAU	11	28° 23' 34" S	49° 23' 48" W	220m	Subtropical (Cfa)	Argissolo Vermelho Amarelo
	SID	12	28° 35' 52" S	49° 25' 28" W	147m	Subtropical (Cfa)	Argissolo Vermelho Amarelo

Xanxerê (XAN), Chapecó (XAP) e São Miguel do Oeste (SMO), representado a região Oeste; Santa Teresinha do Salto (STS), Campo Belo do Sul (CBS) e Otacílio Costa (OTC), representando a região do Planalto; Blumenau (BLU), Joinville (JOI) e Timbó (TIM), representando a região Leste e Orleans (ORL), Siderópolis (SID) e Lauro Müller (LAU) representando a região Sul.

Fonte: Produção do autor, 2015.

O Planalto Catarinense, segundo classificação de Köppen, possui o clima tipo CMC, subtropical, caracterizado por ser chuvoso, com invernos e verões amenos. As demais regiões, segundo a mesma classificação, apresentam o clima tipo Cfa, subtropical com verão quente. Os solos são

predominantemente argilosos, com exceção da região Sul que possui solos médio-argilosos a arenosos.

Em cada região, dentro dos municípios, foram selecionados cinco ecossistemas de ocorrência generalizada no Sul do Brasil, classificados quanto ao tipo de uso do solo em: Floresta nativa (FN), Reflorestamento de eucalipto (RE), Pastagem (PA), Integração lavoura-pecuária (ILP) e Plantio direto (PD) para estudo da diversidade estrutural (composição das comunidades de FMAs) e da frequência de ocorrência das espécies.

Amostragem do solo

Para as análises de solo foram realizadas coletas no inverno (Julho-Agosto 2011) e no verão (Dezembro/2011-Janeiro/2012) para estudos da diversidade (riqueza e frequência de ocorrência) de FMA. Análises químicas e físicas foram realizadas apenas nas amostras coletadas no inverno.

Em cada ecossistema foram estabelecidas grades amostrais com nove pontos georreferenciados e distanciados em 30m, considerando 20m de bordadura (BARTZ et al., 2014). Foram coletadas 12 subamostras ao redor de cada ponto amostral na camada de 0-10 cm com trado tipo holandês, para compor uma amostra composta representativa conforme Moreira et al. (2008).

As amostras foram armazenadas em sacos plásticos e transportadas em caixas térmicas com gelo até o Laboratório de Ecologia do Solo, do Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV), Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em Lageso – SC, e mantidas em câmara fria a 4°C. Para as análises químicas as amostras foram peneiradas (2 mm) e secas a 60 °C.

Diversidade de Fungos micorrízicos arbusculares (FMA)

A diversidade de FMA foi avaliada através da riqueza das espécies com base na presença de esporos dos fungos. A extração dos esporos foi realizada de amostras de solo de culturas-armadilhas de acordo com a metodologia de Stutz & Morton (1996).

No estabelecimento das culturas-armadilhas, as amostras de solo do campo (amostras compostas da grade amostral) contendo propágulos fúngicos (raízes colonizadas, hifas e esporos) foram misturadas com areia estéril (1:1, v/v) e colocadas em vasos de 1,5 kg onde foi semeado (50-60 sementes) milho (*Zea mays*), trevo (*Trifolium repens* L.) e sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), conforme recomendado por Brundrett (1999). As plantas foram mantidas em casa-de-vegetação durante 6 meses (BEVER et al., 2001), quando os esporos foram recuperados pela técnica de peneiragem úmida (GERDEMANN & NICOLSON, 1963), seguida de gradiente de sacarose. No microscópio estereoscópio os esporos foram separados por morfotipos e contados.

Lâminas permanentes foram montadas com os esporos, utilizando-se PVLG (Álcool polivinílico, glicerol e ácido lático) e PVLG misturado ao reagente de Melzer. A identificação das espécies de FMA foi baseada no tamanho, cor e forma dos esporos determinados sob microscópio estereoscópio e pela análise das estruturas sub-celulares dos esporos sob microscópio (REDECKER et al., 2013) e com a descrição das espécies nas páginas da *International Culture Collection of Arbuscular and Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (INVAM) (<http://invam.caf.wvu.edu>). A identificação das espécies foi feita na Universidade Regional de Blumenau(FURB).

Parâmetros biológicos, químicos e físicos.

O Carbono da Biomassa Microbiana (CMic) foi determinado pelo método de fumigação-extração (VANCE et al., 1987), com três repetições laboratoriais, sendo três amostras fumigadas e três não fumigadas. A fumigação foi realizada com clorofórmio livre de etanol (CHCl_3). As amostras foram incubadas em dessecador por 24h, à 25°C, na ausência de luminosidade, após isto o CMic foi extraído com sulfato de potássio 0,5 mol L⁻¹ (K_2SO_4) agitadas por 30 minutos, permitindo a decantação por uma hora e procedida a filtração lenta em filtro de papel número 42.

A leitura das amostras foi realizada através da oxidação destas com dicromato de potássio 66,7 mmol L⁻¹ ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$). O teor de C solúvel foi determinado por titulação com $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 33,3 mmol L⁻¹ na presença do indicador difenilamina (1%). O CMic foi calculado pela diferença entre carbono extraído do solo fumigado e não fumigado multiplicada pelo fator de correção KEC = 0,33, que representa a eficiência da extração de 33 %, proposto por Sparling & West (1988) para solos com baixo pH e menos de 10% de carbono orgânico.

A atividade microbiana foi avaliada pela determinação da respiração basal microbiana (RMic, evolução de C-CO₂) de amostras de 50 gramas de solo incubadas por 10 dias a 28°C. O CO₂ liberado foi capturado em solução de hidróxido de sódio (NaOH) 50 mmol L⁻¹, precipitado com solução de cloreto de bário ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 0,5 mol L⁻¹, e quantificado por titulação do NaOH remanescente com ácido clorídrico (HCl) 50 mmol L⁻¹ na presença de fenolftaleína (ALEF & NANNIPIERI, 1995).

Com os resultados da atividade respiratória microbiana e do CMic calculou-se o quociente metabólico ($q\text{CO}_2$), que representa a taxa de respiração por unidade de C na biomassa microbiana (ANDERSON & DOMSCH, 1978;1993). A determinação do teor de carbono orgânico total (COT) foi

realizada por combustão seca em autoanalisador de Carbono, Nitrogênio, Hidrogênio e Enxofre (CNHS), equipamento Elementar Vario EL Cube. O carbono orgânico particulado (COP) foi determinado utilizando 20 g de amostra e 60 ml de hexametáfosfato de sódio (5 g l^{-1}), com agitação por 16 horas, e passagem da suspensão em peneira de $53 \mu\text{m}$ (Cambardella & Elliot, 1992). O material orgânico retido na peneira consiste no COP, que foi quantificado a partir da massa da fração seca em estufa a 60°C e moído com pistilo em gral de porcelana, onde o teor de carbono orgânico foi determinado (CNHS).

A partir dos resultados de CMic e COT foi calculado o Quociente Microbiano (qMic) expresso como a percentagem de C microbiano em relação ao C orgânico total do solo (ANDERSON, 1994). O $\text{pH}_{\text{água}}$ SMP, matéria orgânica (MO), teores de P, K, Ca, Mg e suas relações, Al, H+Al, $\text{CTC}_{\text{pH } 7}$ e soma de bases, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). A umidade volumétrica do solo foi determinada em amostras secas em estufa a 105°C por 24 horas.

A densidade do solo (D_s) foi determinada em as amostras indeformadas pelo método do anel volumétrico. O volume de bioporos foi determinado em mesa de tensão de areia à sucção de 1 kPa. A densidade de partículas (D_p) foi determinada pelo método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997). A microporosidade do solo foi determinada na mesa de tensão de areia à sucção de 60 cm (tensões de 6 kPa), e a porosidade total (PT) calculada pela razão entre a densidade do solo e a densidade de partículas [$\text{PT} = 1 - (D_s/D_p)$]. A macroporosidade foi obtida pela diferença entre PT e a microporosidade (EMBRAPA, 1997). A estabilidade de agregados do solo foi determinada pelo peneiramento úmido de acordo com a metodologia de Kemper & Chepil (1965), representada pelo diâmetro médio ponderado (DMP). A granulometria do solo foi determinada pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986), utilizando-se solução de hidróxido de sódio como dispersante químico. A fração areia foi

removida por tamisação em peneira de 0,053 mm. As frações silte e argila foram separadas por sedimentação e posterior pipetagem da argila em suspensão. As frações argila e areia foram calculadas após pesagem em estufa a 105 °C, sendo o silte calculado por diferença. A resistência do solo à penetração foi medida nas amostras volumétricas, com umidade equilibrada na tensão correspondente a 10 kPa, utilizando-se um penetrômetro de bancada Marconi®, modelo MA-933. Os resultados das análises foram utilizados como variáveis explicativas nas análises estatísticas.

Análise de dados

Os dados brutos de presença-ausência em cada ponto de coleta dentro de cada área amostrada foram convertidos em frequência de ocorrência tendo para cada área considerando a grade de 9 pontos de coleta. A matriz foi posteriormente logaritimizada e utilizada nas diferentes análises. De modo a obter-se uma visualização gráfica das diferentes áreas, efetuou-se uma Análise de Coordenadas Principais (PCoA) com base na matriz de similaridade após a aplicação do índice de Bray-Curtis.

A avaliação das possíveis diferenças estatísticas entre regiões foi efetuada via uma PERMANOVA, também com base no índice de *Bray-Curtis*. Nesta análise utilizaram-se a REGIÃO e TIPO DE USO como fatores fixos, mas o USO estava hierarquizado dentro de cada região. Optou-se por este modelo hierárquico, pois neste capítulo o objetivo não é avaliar diferenças entre usos do solo, mas apenas perceber se a variabilidade entre os tipos de usos dentro de cada região poderia impedir a detecção de diferenças entre regiões. Como forma de avaliar quais as espécies que mais contribuíram para uma possível separação entre regiões, efetuou-se uma análise de SIMPER, obtendo-se a contribuição de cada espécie para a dissimilaridade observada entre pares de regiões. Como forma

de avaliar se os resultados estavam de acordo com a hipótese do “*distance decay*”, foi ainda efetuado um teste de Mantel entre a matriz de distâncias das diferentes áreas amostradas com base nas espécies (índice de *Bray-Curtis*) e a matriz de distâncias Euclideanas com base nas coordenadas geográficas. Esta última análise foi realizada em ambiente R (R Development Core Team, 2011) com o pacote Vegan (OKSANEN, 2011), mas as restantes análises foram efetuadas no programa PRIMER 6.0.

Com o objetivo de tentar avaliar se a relação entre as espécies de FMA e diferentes variáveis explicativas (parâmetros químicos e físicos do solo) mostra quais os fatores (além da distância) que podem justificar a dissimilaridade entre regiões, foi realizada uma dbRDA (“*distance-based Redundancy Analysis*”), tendo como base a matriz resultante da PCoA. Antes da realização da dbRDA, as variáveis explicativas foram analisadas relativamente à colinearidade e algumas destas variáveis foram eliminadas com base no seu elevado valor de VIF (“*variance inflation factor*”). Na dbRDA procedeu-se a uma seleção manual das variáveis cuja significância foi avaliada por permutações de Monte-Carlo. Estas análises foram realizadas com o programa CANOCO 4.0 (TER BRAAK & SMILAUER, 2002).

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

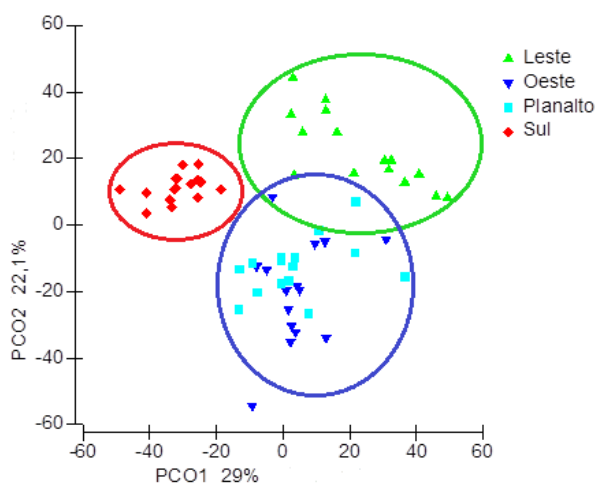
Resultados

No total, 23 espécies de FMA foram identificadas nas 4 regiões do Estado de Santa Catarina. Na região Oeste ocorreram 14 espécies, no Planalto 17, 12 na região Leste e 11 espécies na região Sul. De todas as espécies, 20 foram identificadas em nível de espécie e as demais em nível de gênero.

Já na Análise de Coordenadas Principais (PCoA) com base nos dados de frequência de ocorrência é possível observar

que o Eixo 1 (29%) separou a região sul das demais regiões e o Eixo 2 (22,1%) separou a região leste, do conjunto composto pelas regiões oeste e planalto (Figura 2). A análise aponta uma clara diferenciação das comunidades de FMAs entre as regiões estudadas, não sendo estas comunidades largamente afetadas pelo uso do solo.

Figura 2 - Análise de Coordenadas Principais (PCoA), utilizando o coeficiente de Bray-Curtis com base na frequência de ocorrência das espécies de FMA em cada sistema de uso do solo dentro de cada região do estado de Santa Catarina-Brasil.



Fonte: Produção do autor, 2015.

Esta separação entre as diferentes regiões é confirmada pela análise de PERMANOVA, onde se obtiveram diferenças significativas nas comunidades de FMA entre regiões (Tabela 1A - Pseudo-F = 22,71, $p < 0,001$) sendo todas elas diferentes umas das outras (Tabela 2B). A significância obtida também ao nível dos usos de solo dentro de cada região (Tabela 1A -

Pseudo-F = 2,71, $p < 0,01$) é apenas devido a algumas diferenças pontuais, não devendo ser de todo generalizadas. Estas diferenças ocorreram entre a RE e PA na região Leste ($t=3,68$, $p < 0,01$) e entre FN e RE ($t=2,59$, $p < 0,05$) e FN e ILP ($t=2,36$, $p < 0,05$) na região Oeste.

Tabela 1 - PERMANOVA da comunidade de FMA com base no coeficiente de Bray-Curtis para os dados de frequência de ocorrência. Os sistemas de uso do solo estão hierarquizados dentro de cada região. A – tabela gera da PERMANOVA; B – teste de comparações múltiplas entre regiões.

(A)

Parâmetros	GL	SQ	MSQ	Pseudo-F	P(perm)	Perms
Região	3	49467	16489	22,709	0,001	999
Uso do solo (Região)	16	31441	1965,1	2,7064	0,001	999
Resíduo	40	29044	726,09			
Total	59	109952				

(B)

Regiões	t	P(perm)	Perms
Leste, Oeste	4,49	0,001	999
Leste, Planalto	4,42	0,001	999
Leste, Sul	6,95	0,001	998
Oeste, Planalto	2,80	0,002	999
Oeste, Sul	5,04	0,001	999
Planalto, Sul	5,48	0,001	999

Fonte: Produção do autor, 2015.

Analisando a similaridade entre e dentro de cada região (entre os diferentes usos do solo dentro de cada região) pode verificar-se claramente que os primeiros possuem valores mais elevados (Tabela 2) o que indica a existência de relação inversa entre a composição da comunidade de FMA com a distância entre os diferentes locais de coleta. Esta relação é de fato significativa se observarmos os resultados do teste de Mantel entre a matriz de distâncias de Bray-Curtis relativa às comunidades de FMA e a matriz de distância Euclidiana efetuada com base nas coordenadas geográficas ($r=0,37$, $p<0,001$ com base em 999 permutações). O valor significativo desta relação demonstra que estes resultados seguem o padrão da hipótese de “*distance decay*”.

Tabela 2 - Medida de similaridade de Bray-Curtis (%) para frequência de ocorrência de fungos micorrízicos arbusculares entre as regiões do estado de SC.

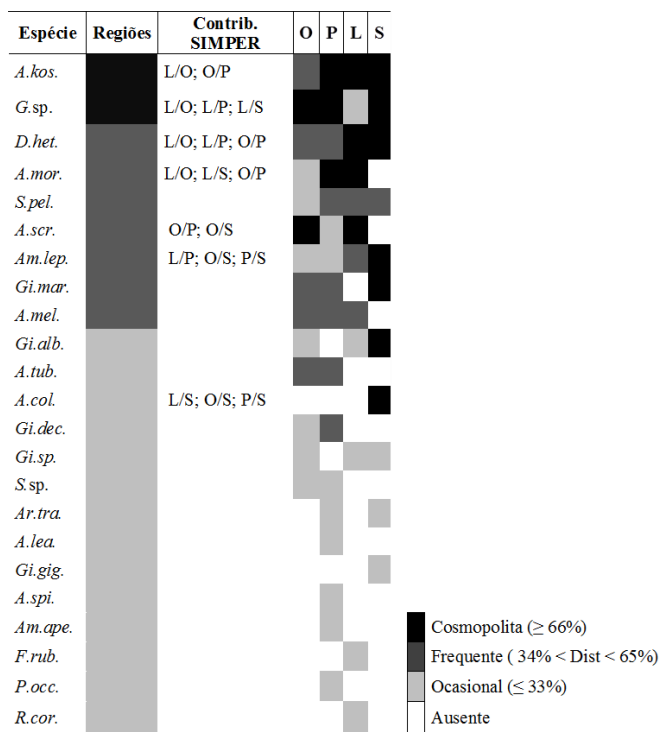
	Leste	Oeste	Planalto	Sul
Leste	57,97			
Oeste	32,83	45,71		
Planalto	37,68	41,38	52,55	
Sul	34,45	35,99	38,32	71,60

Fonte: Produção do autor, 2015.

Uma análise mais detalhada em relação à ocorrência das espécies nas diferentes regiões revela a existência de poucas espécies cosmopolitas, como *Acaulospora koskei* e *Glomus* sp. que ocorreram em mais de 70% das áreas amostradas (Figura 3) e de algumas espécies frequentes, onde as mais representativas são *Dentisculata heterogama* e *Acaulospora morrowiae*, que ocorreram em mais de 50% das áreas

amostradas. No entanto, a grande maioria das espécies (14 das 23 identificadas) são ocasionais ou mesmo raras, quando se considera todas as áreas amostradas no Estado. As primeiras 7 espécies representadas como ocasionais na Figura 3 (de *Gigaspora albida* a *Archaeospora trappei*) ocorrem entre 10 a 30% das áreas amostradas, mas as restantes espécies deste grupo possuem uma distribuição muito restrita, com uma ocorrência menor do que 5% (ocorrem em 1 ou 2 áreas apenas) sendo específicas de uma determinada região.

Figura 3 - Classificação das espécies de FMA em Cosmopolitas (ocorrência em $\geq 66\%$ das áreas amostradas), Frequentes (ocorrência entre 34% e 65% das áreas), Ocasionais (ocorrência $\leq 33\%$ das áreas) e Ausentes (sem ocorrência).



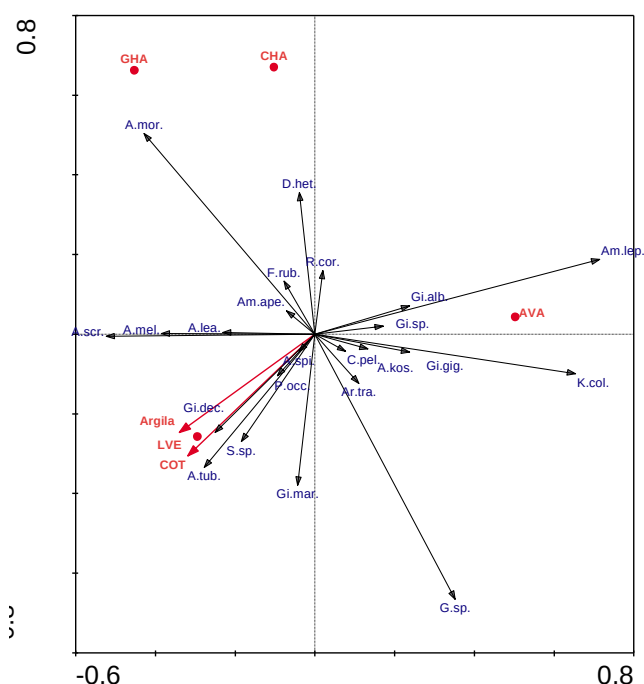
Planato (P), Oeste (O), Leste (L) e Sul (S) com 15 áreas amostradas cada; Regiões (total para as regiões com 60 áreas amostradas). As espécies que apresentam uma contribuição superior a 10% para a separação (dissimilaridade) entre as regiões com base na análise de SIMPER estão indicadas (ex: L/O indica que essa espécie contribuiu para separar as regiões Leste e Oeste). *Kuklospora colombiana* (*A.col.*), *Acaulospora koskei* (*A.kos.*), *Acaulospora laevis* (*A.lea.*), *Acaulospora mellea* (*A.mel.*), (...continuação Figura 3) *Acaulospora morrowiae* (*A.mor.*), *Acaulospora*

crobiculata (A.scr.), *Acaulospora spinosa* (A.spi.), *Acaulospora tuberculata* (A.tur.), *Ambispora appendicula* (Am.app.), *Ambispora leptoticha* (Am.lep.), *Archaeospora trappei* (Ar.tra.), *Dentiscutata heterogama* (D.het.), *Fuscutata rubra* (F.rub.), *Gigaspora albida* (G.alb.), *Gigaspora decipiens* (G.dec.), *Gigaspora gigantea* (Gi.gig.), *Gigaspora margarita* (Gi.mar.), *Gigaspora* sp. (Gi.sp.), *Racocetra coralloidea* (R.cor.), *Scutellospora pellucida* (S.pel.), *Scutellospora* sp. (S.sp.), *Glomus* sp. (G.sp.), *Paraglomus occultum* (P.occ.).

Fonte: Produção do autor, 2015.

A diferenciação verificada entre as regiões evidenciada pela PCoA e PERMANOVA é notória na Figura 4, onde mesmo entre as espécies cosmopolitas e frequentes ao nível das 60 áreas amostradas, verificam-se diferenças na co-ocorrência entre regiões. Além das espécies com ocorrência exclusiva em algumas regiões (muito embora com uma frequência baixa) são evidentes as diferenças nas espécies assinaladas e que mais contribuíram para diferenciar as regiões (com uma contribuição superior a 10% de dissimilaridade): *Acaulospora koskei* (contribui para a separação entre a região Oeste do Planalto e do Leste), *Glomus* sp. (separação do Leste com as restantes regiões), *Dentiscutata heterogama* e *Acaulospora morrowiae* (separação entre Oeste e Planalto e Leste e também entre estas duas regiões), *Acaulospora scrobiculata* (separação entre Oeste e Planalto e Sul) e *Ambispora leptoticha* (separação entre Sul e Oeste e Planalto e ainda entre o Planalto e Leste). A espécie *Kuklospora colombiana* também contribui para a dissimilaridade entre as regiões ao ocorrer exclusivamente no Sul.

Figura 4. Análise de redundância baseada na distância (dbRDA) entre ocorrência de espécies de fungos micorrízicos arbusculares e as variáveis ambientais Carbono orgânico total (COT), Teor de argila e Classe de Solo (LVE-Latossolo Vermelho-amarelo, AVA-Argissolo Vermelho-amarelo, CHA-Cambissolo Háplico e GHA-Gleissolo Háplico)



Espécies: *Kuklospora colombiana* (A.col.), *Acaulospora koskei* (A.kos.), *Acaulospora laevis* (A.lea.), *Acaulospora mellea* (A.mel.), *Acaulospora morrowiae* (A.mor.), *Acaulospora crobiculata* (A.scr.), *Acaulospora spinosa* (A.spi.), *Acaulospora tuberculata* (A.tur.), *Ambispora appendicula* (Am.app.), *Ambispora leptoticha* (Am.lep.), *Archaeospora trappei* (Ar.tra.), *Dentiscutata heterogama* (D.het.), *Fuscutata rubra* (F.rub.), *Gigaspora albida* (G.alb.), *Gigaspora decipiens* (G.dec.), *Gigaspora gigantea* (Gi.gig.), *Gigaspora margarita* (Gi.mar.), *Gigaspora sp.* (Gi.sp.), *Racocetra coralloidea* (R.cor.), *Scutellospora pellucida* (C.pel.), *Scutellospora sp.* (S.sp.), *Glomus sp.* (G.sp.), *Paraglomus occultum* (P.occ.). Fonte: Produção do autor, 2015.

Os resultados obtidos na análise dbRDA indicaram como variáveis significativas o tipo de solo (classe), o teor de argila e o teor de carbono orgânico total (COT) (Figura 4). Estas variáveis explicam significativamente 35,4% da variabilidade da matriz das espécies (permutações de Monte-Carlo com $F=4,847$, $p<0,01$), sendo que 39,3% e 32,5% desta variabilidade é explicada nos eixos 1 e 2 respectivamente. A análise mostra que espécies como *Gigaspora gigantea*, *Acaulospora tuberculata*, *Scutellospora* sp. e *Gigaspora margarita*, aparecem fortemente associadas aos teores de argila e COT e ao Latossolo Vermelho-Amarelo (LVE). Também associadas a estas variáveis explicativas, mas em menor grau, estão as espécies *Acaulospora scrobiculata*, *Acaulospora mellea* e *Acaulospora laevis*. Todas estas espécies possuem uma frequência de ocorrência superior nas regiões Oeste e Planalto, sendo que as três últimas são também frequentes no Leste. Já as espécies *Acaulospora morrowiae* e *Dentisculata heterogama* aparecem mais associadas com os tipos de solo Cambissolo Háplico (CHA) e Gleissolo Háplico (GHA), mais frequentes na região Leste. Já as espécies *Ambispora leptoticha* e *Kuklospora colombiana*, estão associadas ao Argissolo Vermelho-Amarelo (AVE), frequente no Sul e em algumas áreas do Leste.

Discussão

Nosso estudo propôs-se a avaliar os padrões biogeográficos das comunidades de FMA num gradiente espacial composto de quatro mesorregiões no estado de Santa Catarina, zona subtropical do Brasil. A biogeografia de microrganismos é comumente estudada em habitats naturais e semi-naturais (MARTINY et al, 2006; HAZARD et al, 2013; CHAUDHARY et al., 2014), entretanto este é o primeiro estudo de biogeografia que avaliou a distribuição espacial dos FMA considerando 5 ecossistemas diferentes no tipo de uso do solo, todos de ocorrência generalizada dentro de cada região

amostradas (Fragmento de floresta nativa, reflorestamento com *Eucaliptus* sp., pastagem, área agrícola com plantio direto e área de integração-lavoura pecuária) e que utilizou réplicas verdadeiras (municípios).

Os nossos resultados indicam primeiramente que a distribuição espacial das espécies de FMA nas regiões estudadas não é aleatória e que a dissimilaridade na estrutura das comunidades do interior para o litoral de SC está correlacionada com a distância geográfica como demonstrado pelo teste de Mantel. Isto confirma a hipótese de distância-dissimilaridade (*distance decay*) que prevê que a da similaridade entre duas comunidades pode ser ocasionado por eventos passados como limitação na dispersão espacial, especiação e extinção (ODA et al., 2003, FULTHORPE et al., 2008; HAZARD et al., 2013). A maioria dos estudos com FMA não considera os eventos históricos e geográficos, pois o foco muitas vezes é pontual em determinado fatores como tipo de uso, tipo de solo, poluição ou cultura agrícola. Estudos recentes que consideram os fatores históricos vêm trazendo novas informações sobre a distribuição dos FMA em determinadas regiões que geram resultados inovadores, por exemplo, Martiny et al. (2006) em um estudo detalhado e considerado parametro em biogeografia microbiana concluiu que a variabilidade das comunidades seja resultado não apenas de fatores contemporâneos, mas também históricos.

Por outro lado, nossos resultados não rejeitam a hipótese de Baas-Becking, (1934) uma vez que foram observadas relações significativas entre o teor de argila, de carbono orgânico total e principalmente do tipo de solo (classe edafológica) e a composição das comunidades em cada região (beta-diversidade); o que revela que características associadas ao tipo de solo estejam condicionando as comunidades. É importante salientar que uma análise de partição de variabilidade (resultados não apresentados) indicou que a variabilidade da matriz das espécies explicada pelos diferentes

tipos de solo foi quatro vezes superior à variabilidade explicada pelas duas variáveis restantes (teor de argila e COT), indicando que os tipos de solo podem ser os principais condicionadores da presença e/ou mais frequência de ocorrência de diferentes espécies, levando à separação entre regiões.

Observou-se ainda que o uso do solo teve influência pontual e pouco significativa na composição e distribuição geográfica das comunidades de FMA. Estudos de Verbruggen et al. (2012) indicaram que a abundância e diversidade de FMA estão negativamente relacionadas à intensidade do uso do solo e que a dispersão é fortemente influenciada pelo acaso. Assim a distribuição das espécies são influenciadas por outros fatores como por exemplo o tipo de solo (LEKBERG et al., 2007; HELGASON & FITTER, 2009; BALESTRINI et al., 2010; OEHL et al., 2010). Portanto, as comunidade de FMA sofrem efeito ambiental quando consideramos curtas escalas e efeitos geográficos quando estas escalas são ampliadas, como sugerido por Martiny et al. (2006).

Lekberg et al. (2007) observaram que tanto a textura do solo como a distância geográfica (distância máxima de 25 km) influenciaram a comunidade de FMA em milho em 10 áreas agrícolas. Neste sentido, Van der Gast et al. (2011) demonstrou que o manejo orgânico vs. convencional do solo e as distâncias geográficas (locais com 250 km de distância) afetaram a composição da comunidade destes fungos nas plantas. Estas relações podem ainda estar relacionadas a escala de estudo, onde os efeitos de distância ocorreriam mais a nível de grande escala espacial e os efeitos ambientais ao nível de pequena escala. Nossos resultados corroboram os observados nos estudos descritos acima e sugerem relações entre a distância geográfica e os efeitos ambientais sobre as comunidades ao nível de beta-diversidade. Entretanto, há que se considerar que a variação espacial das variáveis explicativas como “tipo de solo” e outras associadas, podem estar mascarando ou

interferindo nos efeitos de distância geográfica, o que merece melhor elucidação.

Por fim, este estudo revelou a existência de poucas espécies cosmopolitas, como *Acaulospora koskei* e *Glomus* sp. Estas duas espécies são capazes de tolerar uma ampla gama de condições ambientais o que as torna tão amplamente distribuídas. A distribuição das espécies resulta entre outros fatores de características morfológicas e funcionais e sua decorrente capacidade de interagir com a heterogeneidade espacial das condições ambientais (DRAY et al., 2012;). Das 23 espécies identificadas no estudo, 14 foram classificadas como especialistas por apresentarem baixa ocorrência nas regiões amostradas (ocuparam de 0-5 áreas das 15/ou 0-20 das 60). Entretanto, estas espécies destacaram-se na diferenciação entre as regiões, como *Paraglomus occultum* para o Planalto, *Gigaspora decipiens* para o Oeste, *Fuscututa rubra* e *Racocetra coralloidea*. para o leste e *Gigaspora gigantea* para o Sul. A região Sul não apresentou ocorrência das espécies *Acaulospora morrowiae*, *Acaulospora scrobiculata*. e *Acaulospora mellea*. Estas espécies foram importantes na separação da região Sul das demais regiões. O Sul também apresentou o maior número de espécies generalistas (5).

A classe do solo e a textura (argila) foram os fatores que apresentaram valor significativo para a separação das comunidades de FMA nas regiões estudadas (Figura 5). Estes dados refletem diretamente os resultados obtidos até o momento, pois a classe de solo difere entre as regiões (Figura 1).

A influência do tipo de solo na composição da comunidade de fungos tem sido previamente observada em alguns estudos, mas a textura do solo não tem normalmente sido identificada como fator de grande importância. Lekberg et al. (2007) observou que tanto a textura do solo como a distância geográfica influenciou a comunidade FMA de *Zea mays* em dez áreas. Estes resultados são confirmados pelo

estudo de Oehl et al. (2010), que encontrou 61 espécies de FMA associadas com a classe de solo. Fatores edáficos como o pH e a precipitação pluviométrica não é homeogenea dentro do uso do solo tem efeito mais significativo nas comunidades de FMA que o uso do solo em si (HAZARD et al., 2013) O mesmo autor encontrou pouca influência do uso do solo na riqueza do FMA mesmo utilizando uma ampla gama de usos do solo no experimento (plantio convencional, pastagem, turfeiras) que continham vegetação diferenciada, apesar de estudos anteriores confirmarem que a comunidade vegetal afetava a distribuição dos FMA (FITZSIMONS et al., 2008; HAUSMANN & HAWKES, 2009).

Os teores de argila nos solos podem ser interpretados como um fator condicionante da comunidade de FMA, pois afeta diretamente o crescimento do micélio fúngico, pois quanto mais fina a textura do solo, maiores as implicações sobre o crescimento e alongamento da raiz da planta. As diferenças entre o tipo de crescimento da raiz foram observadas ao nível de família, entre a Gigasporaceae e a Glomeraceae (JAKOBSEN et al., 1992; SMITH & READ, 2008), onde Glomeraceae foram predominantes em solos argilosos e Gigasporaceae em solos mais arenosos (LEKBERG et al., 2007).

Porém nossos resultados partem do princípio de que todos os solos apresentam textura argilosa a médio-argilosa que contribuem para a maior ocorrência de *Acaulospora* que teve representatividade em todas as regiões do estudo. Porém as espécies *Kuklospora colombiana*, *Ambispora leptoticha* foram espécies essencialmente encontradas na Região Sul, enquanto *Acaulospora scrobiculata* foi observadas somente no Oeste. A região Oeste tem solos com textura altamente argilosa (Latossolo Vermelho), enquanto a região Sul possui um solo médio argiloso a arenoso (Argissolo Vermelho-amarelo).

A espécie *Gisgaspera giganteae* teve ocorrência significativa em sistemas com Eulipto no Sul o que concorda

com os estudos anteriores citados, pois é considerada parte de uma família que é indicativa de solos arenosos. Porém a espécie *Gigaspora decipiens* que pertence a mesma família é tem ocorrência específica (especialista) na região Oeste, com solos de textura altamente argilosa. Isto indica que a ecologia destas espécies é bem mais complexa.

Atualmente os estudos de biogeografia de FMA ainda são limitados, porém novos modelos teóricos e ferramentas estatísticas vem agregando aos conhecimentos de biogeografia microbiana transformando e auxiliando a compreensão dos processos ecológicos.

6.4. CONCLUSÃO

Foram observadas 23 espécies de FMA, sendo predominantes as pertencentes as famílias: Acaulosporaceae, Ambisporaceae, Archaeosporaceae, Denticutataceae, Gigasporaceae, Glomeraceae, Paraglomeraceae, Racocetraceae e Scutellosporaceae;

A distribuição espacial das espécies de FMA nas regiões estudadas não é aleatória e a dissimilaridade na estrutura das comunidades do interior para o litoral de Santa Catarina está correlacionada com a distância geográfica;

É confirma a hipótese de distância-dissimilaridade (*distance decay*) que prevê que a da similaridade entre duas comunidades pode ser ocasionado por eventos passados como limitação na dispersão espacial, especiação e extinção, mas nossos resultados não rejeitam a hipótese de Baas-Becking uma vez que foram observadas relações significativas entre o teor de argila, de carbono orgânico.

REFERÊNCIAS

ALEF, K.; NANNIPIERI, P. (Eds.) **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. London: Academic Press, p. 576, 1995.

ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. **A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils**. Soil Biology and Biochemistry, 10:215-221, 1978.

ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. **The metabolic quotient of CO₂ (q CO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental condition, such as pH, on the microbial of forest soil**. Soil Biology and Biochemistry, 25:393-395, 1993.

ANDERSON, T.H. **Physiological analysis of microbial communities in soil: applications and limitations**. In: RITZ, K.D.; GILLER, K.E. (Eds.). Beyond the biomass. London: British Society of Soil Science, p. 67-76, 1994.

AVERILL, C.; TURNER, B. L.; FINZI, A. C. **Mycorrhiza-mediated competition between plants and decomposers drives soil carbon storage**. Nature, 505: 543-545, 2014.

BAAS BECKING, L.G.M. **Geobiologie of inleiding tot de milieukunde Diligentia Wetensch**. Serie 18/19, van Stockum's Gravenhange, 1934, 263 p.

BAHRAM, M.; PEAY, K.G.; TEDERSOO, L. **Local-scale biogeography and spatiotemporal variability in communities of mycorrhizal fungi.** *New Phytologist*, 205: 1454–1463, 2015.

BALESTRINI, R., et al. **Cohorts of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in *Vitis vinifera*, a typical Mediterranean fruit crop.** *Environmental Microbiology Reports*, 2:594-604, 2010.

BARTZ, M.L.C., et al. **Earthworm richness in land-use systems in Santa Catarina, Brazil.** *Applied Soil Ecology*, 83:59–70, 2014.

BEVER, J. D., et al. **Arbuscular mycorrhizal fungi: More diverse than meets the eye, and the ecological tale of why.** *Bioscience*, 51: 923-931, 2001.

BRUNDRETT, M. C.; ABBOTT, L. K.; JASPER, D. A. **Glomalean mycorrhizal fungi from tropical Australia I. Comparison of the effectiveness and specificity of different isolation procedures.** *Mycorrhiza*, 8: 305-314, 1999.

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. **Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence.** *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 56:777-783, 1992.

CARUSO, T.; HEMPEL, S.; POWELL, J.R.; BARTO, E.K.; RILLIG, M.C. **Compositional divergence and convergence in arbuscular mycorrhizal fungal communities.** Ecology 93: 1115–1124, 2012.

CHAUDHARY, B.; LAU, M.K.; JOHNSON, N.C. **Macroecology of microbes – biogeography of the Glomeromycota.** In: Varma A, ed. Mycorrhiza: genetics and molecular biology, eco-function, biotechnology, eco-physiology, structure and systematics. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 529-562, 2008.

DRAY, S., et al. **Community ecology in the age of multivariate multiscale spatial analysis.** Ecological Monographs, 82: 257–275, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de Métodos de Análise de Solo. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212p.

FITZSIMONS, MS; MILLER, RM; JASTROW, JD. **Scale dependent niche axes of arbuscular mycorrhizal fungi.** Oecologia, 158: 117–127, 2008.

FULTHORPE, R.R., et al. **Distantly sampled soils carry few species in common.** ISME J 2: 901–910, 2008.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. **Particle-size analysis**. In: KLUTE, A., (Ed). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America,. 2:383-411. 1986 (Agronomy Series, 9)

GERDEMANN, J. W.; NICOLSON, T. H. **Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting**. *Transactions of the British Mycological Society*, 46:235-244, 1963.

HAUSMANN, NT; HAWKES, CV. **Plant neighborhood control of arbuscular mycorrhizal community composition**. *New Phytol* 183: 1188-1200, 2009.

HAZARD, C., et al. **The role of local environment and geographical distance in determining community composition of arbuscular mycorrhizal fungi at the landscape scale**. *The ISME Journal* 7:498–508, 2013.

HELGASON, T.; FITTER, A.H. **Natural selection and the evolutionary ecology of the arbuscular mycorrhizal fungi (Phylum Glomeromycota)**. *Journal of Experimental Botany*, 60: 2465–2480, 2009.

HUBBELL, S. P. **The unified neutral theory of biodiversity and biogeography**. Princeton University Press, New Jersey 396p, 2001.

INVAM International Collection of Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi. (Acesso 2012,2013,2014).

JAKOBSEN, I.; ABBOTT, L.K.; ROBSON, A.D. **External hyphae of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Trifolium subterraneum*. 1. Spread of hyphae and phosphorus inflow into roots.** New Phytologist, 120: 371-380, 1992.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. **Size distribution of aggregation.** In: BLACK, C.A. ed. Methods of soil analysis. Madison, American Society Agronomy, p.499-510, 1965. (Agronomy Monograph, 9).

LEKBERG, Y., et al. **Role of niche restrictions and dispersal in the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities.** Journal Ecology, 95:95-105, 2007.

MARTINY, J. B., et al. **Microbial biogeography: putting microorganisms on the map.** Nature Reviews. Microbiology 4:102- 112, 2006.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O.; BRUSSAARD, L. **Biodiversidade do Solo em Ecossistemas Brasileiros.** Ed. UFLA. 768p, 2008.

ODA, Y., et al. **Biogeography of the purple nonsulfur bacterium *Rhodopseudomonas palustris*.** Applied Environmental Microbiology, 69: 5186–5191, 2003.

OEHL, F., et al. **Soil type and land use intensity determines the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities.** Soil Biology Biochemistry, 42: 724-738, 2010.

OEHL, F.; SIEVERDING, E. ***Pacispora*, a new vesicular arbuscular mycorrhizal fungal genus in the glomeromycetes.** Journal of Applied Botany & Food Quality-Angewandte Botanik ,78: 72-82, 2004.

REDECKER, D., et al. **An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomeromycota*).** Mycorrhiza, 23:515-531, 2013.

SIKES, B.A.; COTTENIE, K.; KLIRONOMOS, J.N. **Plant and fungal identity determines pathogen protection of plant roots by arbuscular mycorrhizas.** Journal of Ecology, 97:1274-1280, 2009.

SMITH, S.E., READ, D.J. **Mycorrhizal Symbiosis.** Academic Press, New York. 2008.

SPARLING, G.P. & WEST, A.W. **A direct extraction method to estimate soil microbial C: Calibration in situ using microbial respiration and ^{14}C labeled cells.** Soil Biology Biochemistry, 20:337-343, 1988.

STHAL, P.D.; CHRISTENSEN, I. **Population variation in the myconhizal fungus *Glomus mosseae*: breadth of environmental tolerance**. Mycological Research, 95: 300-307, 1991.

STUTZ, J.C.; MORTON, J.B. **Successive pot cultures reveal high species richness of arbuscular endomycorrhizal fungi in arid ecosystems**. Canadian Journal of Botany, 74:1883-1889,1996.

TEDESCO, M. J.; VOLKWEISS, S. J.; BOHNEN, H. **Análises de solos, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: UFRGS, 1995.

TER BRAAK, C.J.F.; SMILAUER, P. **CANOCO Reference manual and CanoDraw for Windows user's guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5)**. Ithaca, Microcomputer Power, 500p, 2002.

TÓTOLA, M.R.; CHAER, G.M. **Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade do solo**. In: AVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2. p.195-276.

VAN DER GAST, C.J., et al. **Spatial scaling of arbuscular mycorrhizal fungal diversity is affected by farming practice**. Environ Microbiology, 13: 241–249, 2011.

VAN DER HEIJDEN, M.G.A.; SANDERS, I.R. **Different arbuscular mycorrhizal fungi alter coexistence and resource distribution between co-occurring plant.** New Phytologist 157:569–578, 2003.

VANCE, E.D.; BROOKS, P.C.; JENKINSON, D.S. **An extraction method for measuring soil microbial biomass C.** Soil Biology and Biochemistry, Oxford, 19:703-707, 1987.

VERBRUGGEN, E., et al. **Community assembly, species richness and nestedness of arbuscular mycorrhizal fungi in agricultural soils.** Molecular Ecology, 21, 2341-2353, 2012.

WANG, B.; QIU, Y.-L. **Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas in land plants.** Mycorrhiza, 16: 299–363, 2006.

WILSON, G.W., et al. **Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: results from long-term field experiments.** Ecology Letters, 12, 452-61, 2009.

7. CAPÍTULO II

INFLUENCIA DO USO DO SOLO NA COMPOSIÇÃO, DIVERSIDADE ESTRUTURAL DE COMUNIDADES DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES E ASPECTOS FUNCIONAIS DA SIMBIOSE.

RESUMO

Considerando a hipótese que os FMA são sensíveis às práticas de manejo e uso do solo apresentando mudança de padrão de ocorrência com a alteração de ecossistemas naturais, este estudo propôs-se a avaliar a influência de diferentes sistemas de uso do solo, comuns em diversas regiões no estado de Santa Catarina/Brasil, em diferentes tipos de solo subtropicais, na composição, e diversidade estrutural das comunidades de FMA, e aspectos funcionais da simbiose relacionados a formação de hifas no solo e capacidade infectiva. Foram realizadas coletas a campo em quatro regiões do Estado de Santa Catarina em cinco sistemas de uso do solo: floresta nativa (FN), reflorestamento com eucalipto (RE), pastagem (PA), integração lavoura-pecuária (ILP) e plantio direto (PD). Este estudo foi realizado nos anos de 2011-2012, no inverno e no verão, nas regiões do Planalto (P), Oeste (O), Leste (L) e Sul (S) do Estado de Santa Catarina. Em todas as regiões foram selecionados três municípios que constituíram as repetições verdadeiras. Em cada sistema de uso do solo foi estabelecida uma grade amostral com nove pontos, georeferenciados e distanciados em 30m, considerando 20m de bordadura, totalizando 100 m² de área. As espécies de FMAs foram identificadas através de esporos recuperados em culturas armadilhas (riqueza) e foram avaliados o potencial de inóculo e comprimento de micélio extrarradicular total. A riqueza e diversidade de espécies de FMA foram influenciadas pelos sistemas de uso de forma pontual e dependente da região. Não

foi possível estabelecer um padrão geral de efeito da mudança no uso do solo na composição das comunidades de FMA. As espécies *Acaulospora koskei* e *Glomus* sp. apresentaram-se com as principais espécies de caráter generalista (cosmopolita) nas áreas estudadas, o que revela sua capacidade de adaptação a diferentes condições de solo. O potencial de inoculo e a rede de hifas no solo foram influenciados pelos sistemas de uso do solo e regiões, sendo maior no sistema de ILP nas regiões do Planalto e Leste.

Palavras-chave: riqueza, usos do solo, potencial de inóculo, micélio fúngico.

ABSTRACT**LAND-USE INFLUENCE ON ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI COMPOSITION AND STRUCTURE DIVERSITY AND, SYMBIOSIS FUNCTIONAL ASPECTS.**

On the hypothesis that AMF are sensitive to management practices and land-use, presenting changes on occurrence patterns with natural ecosystems alteration, this study aimed to evaluate the influence of different of land-uses, common to several Santa Catarina State regions, Brazil, in different subtropical soil types, composition, and structural diversity of AMF communities, and functional aspects of symbiosis related to hyphae formation and infective capacity in soil. Field samples were collected in four regions of Santa Catarina State, in five land-uses: native forest (FN), pasture (PA), eucalyptus afforestation (RE), crop-livestock integration (ILP) and no-till cropping (PD). This study was conducted between 2011-2012, in winter and summer, on Highland Plateau (P), Western (O), Eastern (L) and Southern (S) regions of Santa Catarina State. True replicates consisted of three selected municipalities each region. A sampling geogrid, with nine points, georeferenced and spaced at 30m, considering a 20m border, totaling 100 m², was established for each land-use. AMF species were identified through recovered spores from trap-cultures (richness) and, inoculum potential inoculum and total extra-root mycelium length were evaluated. AMF species richness and diversity were influenced by land-use use of systems land-use in a timely and region dependent way. It was not possible to establish a general land-use change effect pattern on AMF communities' composition. The species *Acaulospora koskei* and *Glomus* sp. were found as the main generalist species

(cosmopolitan) in the studied areas, which demonstrates their ability to adapt to different soil conditions. The inoculum potential and soil hyphae network were influenced by land-use and region, being higher in ILP land-use on Highland Plateau and Eastern regions.

Keywords: fungal mycelium, inoculum potential, land-use, richness.

7.1. INTRODUÇÃO

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) são simbioses obrigatórios e formam associação com aproximadamente 90% das plantas vasculares. Nesta simbiose a planta supre o fungo com energia para seu crescimento e reprodução via compostos de carbono provenientes da fotossíntese, e o fungo fornece a planta e ao solo vários benefícios: as plantas colonizadas com FMA têm sua zona de depleção de nutrientes ampliada e podem ter aumentos na absorção de nutrientes inorgânicos como fósforo (GALVEZ et al., 2001). O fungo também auxilia na resistência da planta ao ataque de patógenos do sistema radicular e na capacidade de absorção de água (SMITH & READ, 2008; VAN DER HEIJDEN et al., 2015). Os FMA acumulam carbono (CARAVACA et al., 2006; WILSON et al., 2009) e contribuem para o aumento da biomassa microbiana no solo, favorecendo o processo de sequestro de carbono na atmosfera. Ainda no solo contribuem com a formação e estabilidade de agregados veiculados pela ação física do micélio fúngico (RILLIG & MUMMEY, 2006).

Os benefícios desta simbiose dependem do desempenho da planta, mas também da composição da comunidade local de FMA. As comunidades nativas de FMAs são bastante variadas no que diz respeito da composição das espécies e tem importante função na estruturação e funcionamento dos agrossistemas (OPIK et al., 2013). As práticas agrícolas podem determinar a formação das comunidades locais (VAN DER GAST et al., 2011) por influenciar a estrutura e função da simbiose, pois mudanças no tipo de uso do solo provocam forte impacto na biodiversidade (AVIO et al., 2013; KÖHL et al., 2014).

Determinados fungos são tolerantes em relação às práticas agrícolas com aumento da abundância, enquanto outras espécies tendem a diminuir (JANSA et al., 2002). Mesmo

assim, vários estudos apontam que a diversidade de FMA é geralmente reduzida em solos agrícolas em comparação com solos naturais (OEHL et al., 2004; LI et al., 2007) embora a abundância possa ser alta (TRESEDER & CRUZ, 2006). As diferenças na riqueza observadas entre sistemas naturais e cultivados geralmente é atribuída a pressão seletiva de práticas agrícolas, como aração, adubação e aplicação de fungicidas (EGERTON-WARBURTON et al., 2007; JANSÁ et al., 2002). Isto indica que o uso do solo pode ser um fator importante na ocorrência e atividade dos FMA em agrossistemas.

Os constantes ciclos de preparo, plantio e colheita mantêm o solo em permanente desequilíbrio, o que desencadeia a produção de propágulos para a garantia de sobrevivência pelos FMA (CARRENHO et al., 2010), além de influenciar a eficiência simbiótica que é a capacidade do fungo promover o crescimento ou benefício a planta e está relacionada com a capacidade de infecção e disseminação da associação micorrízica, bem como o potencial de inóculo natural do solo (que depende da quantidade de esporos, micélio e raízes colonizadas).

A rede de hifas dos FMA tem uma função importante sobre a estrutura do solo formando uma vasta rede. O seu comprimento é um parâmetro comumente utilizado na quantificação da biomassa fungica (DAI et al., 2012). A quantidade de hifas no solo varia com a fertilidade, precipitação e a produtividade vegetal (VAN DIEPEN et al., 2011). Isto porque a extensão do micélio extrarradicular afeta o fornecimento de nutrientes aos hospedeiros e as hifas externas produzem a glomalina que contribui significativamente para a estabilidade estrutural do solo e sequestro de carbono (BEDINI et al., 2009).

Considerando a hipótese de que os FMA são sensíveis aos diferentes tipos de uso do solo apresentando mudança no padrão de ocorrência em relação aos observados nos ecossistemas naturais, este estudo propôs-se a estudar a

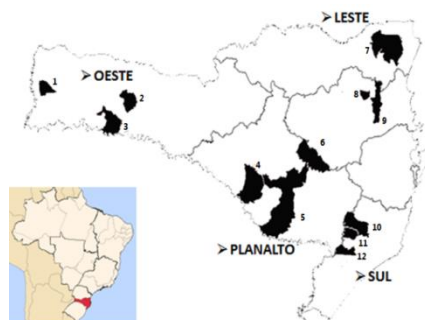
influência de diferentes sistemas de uso do solo, de ocorrência generalizada diversas regiões do estado de SC, na composição, e diversidade estrutural das comunidades de FMA e aspectos funcionais da simbiose relacionados a formação de hifas no solo e capacidade infectiva, em diferentes tipos de solo subtropicais do Sul do Brasil.

7.2. MATERIAL E MÉTODOS

Áreas

Este estudo foi realizado em quatro regiões do interior (Oeste) para o litoral (Sul) do Estado de Santa Catarina, no Sul do Brasil: Oeste (O), Planalto (P), Leste (L) e Sul (S). Em cada uma das regiões foram selecionados três municípios representativos que constituíram as repetições verdadeiras deste estudo. No Oeste: Xanxerê (XAN), São Miguel do Oeste (SMO) e Chapecó (XAP); no Planalto: Campo Belo do Sul (CBS), Santa Teresinha do Salto (STS) e Otacílio Costa (OCT); no Leste: Joinville (JOI), Blumenau (BLU) e Timbó (TIM), e no Sul: Orleans (ORL), Lauro Müller (LAU) e Siderópolis (SID) (Figura 1).

Figura 1 - Regiões geográficas, localidades de amostragem e suas classificações climáticas e de solo em Santa Catarina.



Região	Localidades	Nº Mapa	Latitude	Longitude	Altitude	Clima (Köppen)	Classe solo
Oeste	SMO	1	26° 43' 31" S	53° 31' 05" W	645m	Subtropical (Cfa)	Latossolo Vermelho
	XAN	2	26° 52' 37" S	52° 24' 15" W	800m	Subtropical (Cfa)	Latossolo Vermelho
	CHA	3	27° 05' 47" S	52° 37' 06" W	674m	Subtropical (Cfa)	Latossolo Vermelho
Planalto	CBS	4	27° 53' 57" S	50° 45' 39" W	1017m	Subtropical (Cfb)	Nitossolo Bruno
	STS	5	27° 48' 58" S	50° 19' 34" W	884m	Subtropical (Cfb)	Nitossolo Bruno
	OC	6	27° 28' 59" S	50° 07' 19" W	884m	Subtropical (Cfb)	Cambissolo Húmico
Leste	JOI	7	26° 18' 16" S	48° 50' 44" W	3m	Subtropical (Cfa)	Gleissolo Háplico
	TIM	8	26° 49' 24" S	49° 16' 18" W	68m	Subtropical (Cfa)	Cambissolo Háplico
	BLU	9	26° 55' 10" S	49° 03' 58" W	21m	Subtropical (Cfa)	Argissolo Vermelho Amarelo
Sul	ORL	10	28° 21' 32" S	49° 17' 29" W	132m	Subtropical (Cfa)	Argissolo Vermelho Amarelo
	LAU	11	28° 23' 34" S	49° 23' 48" W	220m	Subtropical (Cfa)	Argissolo Vermelho Amarelo
	SID	12	28° 35' 52" S	49° 25' 28" W	147m	Subtropical (Cfa)	Argissolo Vermelho Amarelo

Xanxerê (XAN), Chapecó (XAP) e São Miguel do Oeste (SMO), representado a região Oeste; Santa Teresinha do Salto (STS), Campo Belo do Sul (CBS) e Otacílio Costa (OCT), representando a região do Planalto; Blumenau (BLU), Joinville (JOI) e Timbó (TIM), representando a região Leste e Orleans (ORL), Siderópolis (SID) e Lauro Müller (LAU) representando a região Sul.

Fonte: Produção do autor, 2015.

O Planalto Catarinense segundo classificação de Köppen possui o clima tipo CMC, subtropical, caracterizado por ser chuvoso, com invernos e verões amenos. As demais regiões segundo a classificação de Köppen apresentam o clima tipo Cfa, subtropical com verão quente. Os solos são

predominantemente argilosos, com exceção da região Sul que possui solos médio-argilosos a arenosos.

Nos municípios foram selecionados cinco sistemas de uso do solo: Floresta nativa (FN), Reflorestamento de eucalipto (RE), Pastagem (PA), Integração lavoura-pecuária (ILP) e Plantio direto (PD) para estudo da diversidade estrutural (composição e estrutura das comunidades de FMAs) e funcional (biomassa e infectividade nos solos) (Tabela 1).

Tabela 1 - Histórico das áreas amostradas em solos subtropicais sob diferentes sistemas de uso do solo.

			Tempo de uso da área, extensão (hectare)	Descrição da área de estudo
Planalto	Santa Teresinha do Salto	FN	100ha	Fragmento de Floresta Atlântica.
		PA	100 ha	Pastagem nativa. Pisoteio animais de produção zootécnica.
		RE	7 anos/29 ha	Plantio de eucalipto (<i>Eucalyptus sp.</i>). Anteriormente era utilizado como área de pastagem.
		PD	7 anos/ 7 ha	No verão plantio de soja (<i>Glycine sp.</i>) e inverno de azevém (<i>Lolium multiflorum</i>) e aveia (<i>Avena sp.</i>).
		ILP	10 anos/ 10 ha	No verão plantio de soja e inverno de azevém e aveia.
	Campo Belo do Sul	FN	5 ha	Fragmento de Floresta Atlântica. Com entrada de animais.
		PA	30 ha	Pastagem nativa. Pisoteio de 0,4 animais por ha.
		RE	20 anos/ 1,2 ha	Plantio de eucalipto. Anteriormente era Campo Nativo.
		PD	11 anos/ 55 ha	No verão plantio de soja, no inverno com trigo em 2010 e pousio em 2011.
		ILP	25 anos/ 25 ha	No verão plantio de soja, inverno com pastagem em 2010 e trigo em 2011, lotação de 2 animais por ha.
	Otacílio Costa	FN	3 ha	Fragmento de Floresta Atlântica.
		PA	10 ha	Pastagem nativa. Pisoteio de animais de produção zootécnica.
		RE	21 anos/ 2,4 ha	Plantio de eucalipto. Anteriormente com plantio de pinus.
		PD	10 anos/ 80 ha	No verão plantio de soja 2011 e milho em 2012, no inverno a área fica em

			pousio.
		ILP 11 anos/ 22 ha	No verão plantio de soja e no inverno aveia e azevém.
Oeste	Xanxerê	FN 9 ha	Fragmento de Floresta Atlântica.
		PA 12 anos/ 60 ha	Resultado da derrubada de Floresta Atlântica. Atualmente é aplicado dejetos suíno.
		RE 4 anos/ 4 ha	Plantio de eucalipto. Anteriormente era Campo Nativo.
		PD 18 anos/ 50 ha	No verão com plantio de soja em 2010 e milho em 2011, e inverno com aveia em 2010 e trigo (<i>Triticum sp.</i>) em 2011.
		ILP 8 anos/ 50 ha	No verão cultivo mínimo de soja e milho e no inverno com aveia e azevém.
	Chapecó	FN Mais de 50 anos	-
		PA 50 anos/ 3 ha	Pastagem nativa. Pisoteio de animais de produção zootécnica.
		RE 15 anos/ 43 ha	Plantio de eucalipto. Anteriormente lavoura.
		PD 10 anos/ 9,6 ha	No verão plantio de soja e no inverno de trigo.
		ILP 10 anos/ 30 ha	No verão plantio direto de soja e milho; no inverno com aveia e azevém. Lotação de 3 animais por ha.
	São Miguel do Oeste	FN 3 ha	Fragmento de Floresta Atlântica.
		PA 50 anos/ 2 ha	Pastagem perene.
		RE 7 anos/ 2 ha	Plantio de eucalipto. Anteriormente era campo nativo.
		PD 4 anos/ 4 ha	No verão plantio de milho e no inverno pousio (2010 e 2011).
		ILP 18 anos/ 3 ha	No verão plantio de soja e milho, no inverno com aveia e azevém.
Leste	Blumenau	FN Mais 50 anos/ 10 ha	Fragmento de Floresta Atlântica.
		PA Mais 50 anos/ 2 ha	Pastagem. Entrada de animais de produção zootécnica.

Sul		RE	Mais de 50 anos/ 2 ha	Plantio de eucalipto.
		PD	20 anos	Verão: milho; Inverno: milho safrinha.
		ILP	20 anos	Verão: milho; Inverno: azevém. Entrada de 25 cabeças de gado.
	Joiville	FN	100 ha	Fragmento de Floresta Atlantica.
		PA	2 ha	Pastagem nativa. Entrada de 30 cabeças de gado
		RE	3 anos/1 ha	Plantio de eucalipto. Entrada de animais
		PD	8 anos/ 7,5 ha	Verão: milho; Inverno: azevém.
		ILP	50 anos/1 ha	Verão: milho; Inverno: Pastagem. Entrada de 30 cabeças de gado
	Timbó	FN	10 ha	Fragmento de Floresta Atlantica.
		PA	100 anos/3 ha	Pastagem nativa.
		RE	7 anos/1,5 ha	Plantio de eucalipto. Anteriormente era plantação de mandioca
		PD	5 anos/ 1ha	Verão: milho; Inverno: pousio
		ILP	15 anos/1 ha	Verão: milho; Inverno: aveia e azevém. Entrada de 20 cabeças de gado.
	Orleans	FN	2 anos/4 ha	Verão: fumo; Inverno: feijão. Entrada de 40 cabeças de gado.
		PA	80 anos/4 ha	Pastagem Nativa. Entrada de 15 cabeças de gado.
		RE	12 anos/1,5 ha	Plantio de eucalipto. Anteriormente mata nativa.
		PD	3 anos/2 ha	Verão: milho; Inverno: feijão.
		ILP	2 anos/4 ha	Verão: fumo; Inverno: feijão. Entrada de 40 cabeças de gado.
	Lauro	FN	4 ha	Fragmento de Floresta Atlantica. Entrada de 5 animais.

Müller	PA	3 ha	Pastagem Nativa. Entrada de 8 cabeças de gado.
	RE	20 anos/2 ha	Plantio de eucalipto. Anteriormente era pastagem.
	PD	3 anos/1 ha	Verão: milho; Inverno: aveia. Entrada de 30 cabeças de gado.
	ILP	3 anos/2 ha	Verão: milho; Inverno: aveia e azevém. Entrada de 30 cabeças de gado.
Siderópolis	FN	sempre/11 ha	Floresta Atlântica
	PA	30 anos/6 ha	Pastagem mista: jusuíta e manteiga. Entrada de 20 cabeças de gado
	RE	2 anos/9 ha	Anteriormente: plantação de milho. Entrada de 4 cabeças de gado.
	PD	3 anos/11 ha	Verão: milho, batata. Inverno: aveia
	ILP	3 anos/7 ha	Verão: milho; Inverno: aveia e azevém. Entrada de cabeças de gado.

Xanxerê (XAN), Chapecó (XAP) e São Miguel do Oeste (SMO), representando a região Oeste; Santa Teresinha do Salto (STS), Campo Belo do Sul (CBS) e Otacílio Costa (OCT), representando a região do Planalto; Blumenau (BLU), Joinville (JOI) e Timbó (TIM), representando a região Leste e Orleans (ORL), Siderópolis (SID) e Lauro Müller (LAU) representando a região Sul. Fonte: Produção do autor, 2015.

Amostragem

Para as análises de solo foram realizadas coletas no inverno que compreenderam os meses de Julho-Agosto 2011. Para FMA as coletas no inverno que compreenderam os meses de Julho-Agosto 2011 e verão nos meses de Dezembro/2011-Janeiro/2012.

Em cada sistema de uso do solo foi estabelecida uma grade amostral com nove pontos, georeferenciados e distanciados em 30m, considerando 20m de bordadura (BARTZ et al., 2014). Foram coletadas 12 sub-amostras ao redor de cada ponto amostral na camada de 0-10 cm com trado tipo holandês, para compor uma amostra composta representativa conforme recomendado por Moreira et al. (2008).

As amostras foram armazenadas em sacos plásticos e transportadas em caixas térmicas com gelo até o Laboratório de Ecologia do Solo, no Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV), Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em Santa Teresinha do Salto – SC, e mantidas em câmara fria à 4°C. Para as análises químicas as amostras foram peneiradas (peneira de 2 mm) e secas à 60 °C.

Riqueza

A diversidade de FMA foi avaliada através da riqueza das espécies, a extração dos esporos foi feita diretamente das amostras de solo de culturas armadilhas de acordo com a metodologia de Stutz & Morton (1996).

No estabelecimento das culturas-armadilhas, as amostras de solo do campo (amostras mistas da grade de amostragem) contendo propágulos de raízes, hifas e esporos foram misturadas com areia estéril (1:1, vol/vol), colocadas em vasos de 1,5 Kg e semeado (50-60 sementes) com milho (*Zea*

mays), trevo (*Trifolium repens* L.) e sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) conforme recomendado por Brundrett, (1999). As plantas foram mantidas em casa-de-vegetação e após 6 meses (Bever et al., 2001), os esporos foram recuperados pela técnica de peneiragem úmida (GERDEMANN & NICOLSON, 1963), seguida de gradiente de sacarose. No microscópio estereoscópio os esporos foram separados por morfotipos e contados. Lâminas permanentes foram montadas com os esporos, utilizando-se PVLG (Alcool polivinílico, glicerol e ácido láctico) e PVLG misturado ao Reagente de Melzer.

A identificação das espécies de FMA foi baseada no tamanho, cor e forma dos esporos determinados sob microscópio estereoscópio e pela análise das estruturas sub-celulares dos esporos sob microscópio (REDECKER et al., 2013) e com a descrição das espécies nas páginas da *International Culture Collection of Arbuscular and Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (INVAM) (<http://invam.caf.wvu.edu>). A identificação das espécies foi feita na Universidade Regional de Blumenau-FURB.

Potencial de inóculo micorrízico (PIM)

O potencial de inóculo micorrízico foi estimado pelo método descrito por Moorman & Reeves (1979). O solo de cada amostra foi diluído em areia (1:1), colocado em cone de 270 ml e semeado com *Sorghum bicolor*. Após a germinação, foi feito o desbaste para deixar apenas uma planta por cone. Após 21 dias as raízes foram separadas do solo e preparadas de acordo com o método de Koske & Gemma, (1989) e a porcentagem de colonização radicular estimada de acordo com Giovannetti & Mosse, (1980).

Comprimento de Micélio Total (CMET)

A quantificação do comprimento de micélio extra-radicular total no solo (CMET) foi realizada conforme descrito por Melloni, (1996). Duas sub-amostras de solo, com aproximadamente 10 g cada, foram usadas para a extração do CMET, sendo que uma terceira será reservada para determinação da umidade após secagem em estufa durante 24 horas. A extração do micélio foi realizada suspendendo-se as amostras de solo em 0,5 L de água e passando-se o sobrenadante em peneiras sobrepostas, com malhas de 1 e 0,25 mm. Esta operação foi realizada por três vezes e o filtrado será submetido à agitação em liquidificador durante 30 segundos na menor velocidade. Após um período de repouso de 2 minutos, depois retirados 500 mL de sobrenadante foi passado por uma peneira de 0,053 mm. E o material retido na peneira filtrado a vácuo em membrana quadriculada de triacetato de celulose, com diâmetro de 4,7 cm e porosidade de 0,47 μ m. Em seguida, a membrana foi colocada sob lâmina de vidro de 5 x 5 cm, lubrificada com uma gota de óleo de amêndoas para facilitar a visualização no microscópio óptico.

Foram avaliados 64 campos em cada membrana, determinando-se o número de intersecções de hifas com as linhas horizontais de uma grade (8 x 8 quadrículos de 1 mm) na ocular do microscópio no aumento de 162,5 vezes. Em uma das oculares foi acoplada uma lente com grade de 20 x 20 quadrículos. Foi determinado o número de intersecções das hifas com as linhas horizontais da grade da ocular. O comprimento do micélio extra-radicular total, expresso em centímetros de hifa por grama de solo seco, foi obtido pela seguinte relação:

$$C = [(0,0347 \cdot N) / (10 - U)] \cdot 100, \text{ onde:}$$

C = comprimento de micélio extra-radicular total, em centímetros de hifa por grama de solo seco;

N = soma do número de intersecções entre as hifas e linhas horizontais do gride;

U = umidade da amostra de solo, expressa em gramas de água.

Análise estatística

De forma a analisar a significância da Região, do Tipo de solo, e da interação entre ambos (variáveis independentes) na riqueza específica, no comprimento do micélio e no potencial de inóculo dos FMA (variáveis dependentes), recorreu-se a modelos mistos lineares generalizados (GLMM). As funções de distribuição utilizadas em cada GLMM foram selecionadas de acordo com a tipologia de dados e o melhor ajuste do modelo, tendo-se utilizado uma distribuição de Poisson com Log para a riqueza específica, uma distribuição Gamma com Log para o comprimento do micélio e uma distribuição Beta com Logit para o potencial de inoculação das micorrizas. Em todos os GLMM, a parcela foi considerada como “Random effect”, e no caso do comprimento do micélio e do potencial de inoculação das micorrizas, a época foi também adicionada como “Random effect”.

Em termos de índices de diversidade, além da riqueza específica e tendo como base os dados de ocorrência das espécies, foram calculados os seguintes índices: Índice de diversidade de Shannon (H'), que quanto maior o valor de H' , maior a diversidade da área em estudo (Ludwig & Reynolds, 1988); Índice de equitabilidade de Pielou (J'), que permite representar a uniformidade da distribuição dos indivíduos entre as espécies existentes (PIELOU, 1966). Seu valor apresenta uma amplitude de 0 (uniformidade mínima) a 1 (uniformidade máxima); e o Índice de Dominância Berger-Parker (D'), que expressa a importância relativa das espécies mais abundantes (MAGURRAN, 1988). Este índice estima a dominância dentro de uma comunidade, ou seja, verifica se há ou não dominância de uma determinada espécie numa comunidade. A influência da Região, do tipo de uso do solo, e da interação entre ambos nos diferentes índices de diversidade foi analisada utilizando

modelos mistos lineares (LMM), com a parcela como “Random effect”.

Em toda a análise estatística, valores de $P < 0,05$ foram considerados significativos. Sempre que se verificou a ocorrência de diferenças significativas, foi utilizado o teste de Tukey para comparações múltiplas com correção de Bonferroni. Os resultados estão apresentados sob a forma de média estimada $\pm$ erro padrão e intervalos de confiança. A análise estatística foi realizada em SPSS e R.

7.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

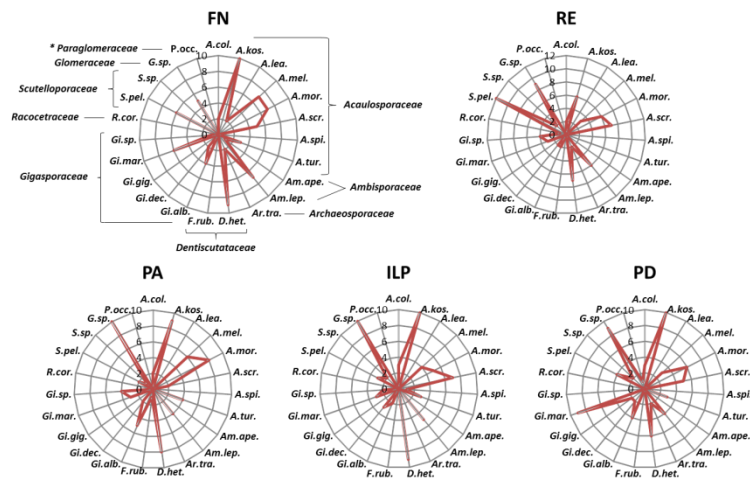
Resultados

Riqueza de FMA (presença/ausência) e Índices de diversidade

No total, 23 espécies de FMA, pertencentes a 9 famílias, foram identificadas no total das áreas amostradas no Estado de Santa Catarina, sendo 8 delas da família Acaulosporaceae ; 2 de Ambisporaceae; 1 de Archaeosporaceae ; 2 de Denticutataceae; 5 de Gigasporaceae ; 1 de Glomeraceae; 1 de Paraglomeraceae, 1 de Racocetraceae e 2 de Scutellosporaceae (Figura 2).

As espécies que apresentaram maior ocorrência na FN foram *Acaulospora koskei* e *Dentiscutata heterogama*; no RE *Scutellospora pellucida* e *Glomus* sp.; em PA *Glomus* sp., *A. koskei*, *D. heterogama* e *Acaulospora morrowiae*; no ILP predominou *Glomus* sp., *A. koskei* e *D. heterogama*.; e no PD *A. koskei*, *Glomus* sp. e *Gigaspora margarita* (Figura 2).

Figura 2 - Ocorrência de espécies de FMA nos diferentes sistemas de uso do solo em Santa Catarina-Brasil.

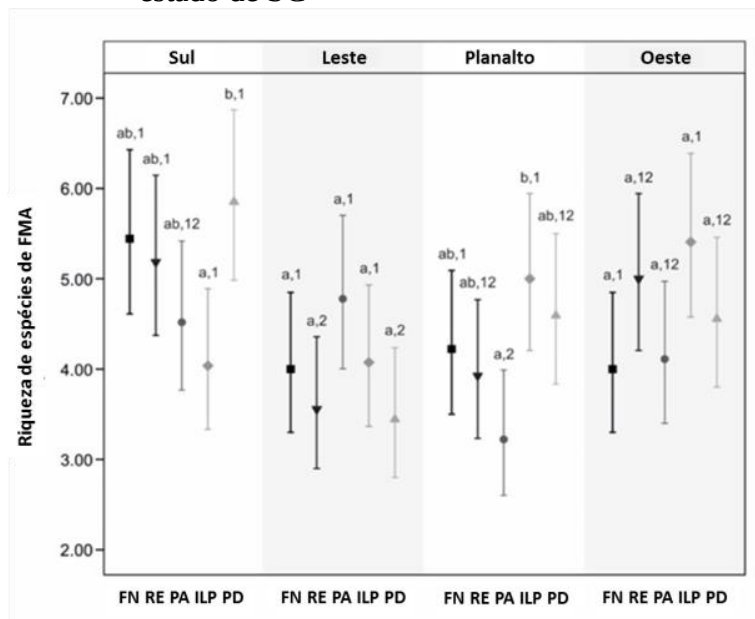


FN-floresta nativa; RE-reflorestamento de eucalipto; PA-pastagem; ILP-integração lavoura-pecuária; PD-plantio direto
Kuklospora colombiana (*A.col.*), *Acaulospora koskei* (*A.kos.*), *Acaulospora laevis* (*A.lea.*), *Acaulospora mellea* (*A.mel.*), *Acaulospora morrowiae* (*A.mor.*), *Acaulospora crobiculata* (*A.scr.*), *Acaulospora spinosa* (*A.spl.*), *Acaulospora tuberculata* (*A.tur.*), *Ambispora appendicula* (*Am.ape.*), *Ambispora leptoticha* (*Am.lep.*), *Archaeospora trappei* (*Ar.tra.*), *Denticutata heterogama* (*D.het.*), *Fuscutata rubra* (*F.rub.*), *Gigaspora albida* (*G.alb.*), *Gigaspora decipiens* (*G.dec.*), *Gigaspora gigantea* (*Gi.gig.*), *Gigaspora margarita* (*Gi.mar.*), *Gigaspora sp.* (*Gi.sp.*), *Racocetra coralloidea* (*R.cor.*), *Scutellospora pellucida* (*S.pel.*), *Scutellospora sp.* (*S.sp.*), *Glomus sp.* (*G.sp.*), *Paraglomus occultum* (*P.occ.*). Fonte: Produção do autor, 2015.

Quando comparado os sistemas de uso do solo dentro de cada região (representado por letras na Figura 3), os sistemas de uso nas regiões Leste e Oeste não apresentaram diferença na riqueza média estimada no GLMM ($P > 0,05$), enquanto que no Sul, ILP revelou-se significativamente diferente de PD ($t_{(520)} = -2,930$; $P = 0,035$), apresentando uma riqueza média estimada inferior (ILP = $4,04 \pm 0,39$; PD = $5,44 \pm 0,46$). No Planalto, PA apresentou uma riqueza média estimada significativamente inferior ao ILP ($t_{(520)} = 3,159$; $P = 0,017$ – PA = $3,22 \pm 0,35$; ILP = $5,00 \pm 0,44$).

Ao compararem-se as regiões por sistema de uso separadamente (representado por números na Figura 3), verificou-se diferenças significativas entre as regiões Leste e Planalto no que se refere a PA ($t_{(520)} = 2,804$; $P = 0,031$), e entre Leste e Sul no que se refere a PD ($t_{(520)} = -4,011$; $P < 0,001$) e a RE ($t_{(520)} = -2,805$; $P = 0,031$). Assim, no que se refere a PD, a região Sul apresenta uma maior riqueza média estimada ($5,85 \pm 0,48$) enquanto que no que se refere a PA, o Planalto apresenta a menor riqueza média estimada ($3,22 \pm 0,35$).

Figura 3 - Riqueza estimada de espécies de FMA com base em GLMM para tipo de uso do solo em cada região do estado de SC



FN-floresta nativa; RE-reflorestamento de eucalipto; PA-pastagem; ILP-integração lavoura-pecuária; PD-plantio direto. As diferenças significativas estão indicadas em cada barra. Letras representam diferenças significativas entre usos do solo em cada região e números representam diferenças significativas entre as regiões dentro de cada uso do solo.

Fonte: Produção do autor, 2015.

Para o índice de diversidade de Shannon, no Sul PD ($2,01 \pm 0,11$) teve a maior diversidade, para o Leste PA ($1,83 \pm 0,11$) e para o Planalto FN ($1,91 \pm 0,11$). Na região Oeste não se verificaram diferenças entre os sistemas ($P > 0,05$), sendo que nas demais regiões se verificaram diferenças entre ILP e PD na região Sul ($t_{(40)} = -2,952$; $P = 0,040$), PA e PD na região Leste ($t_{(40)} = 3,137$; $P = 0,025$) e FN e PD no Planalto ($t_{(40)} = 3,137$; $P = 0,025$). Relativamente ao índice de Pielou não se verificaram diferenças ao nível das regiões ($F_{(3,40)} = 1,548$; $P = 0,217$), dos

sistemas ($F_{(4,40)} = 1,184$; $P = 0,332$), nem uma interação entre ambos os fatores ($F_{(12,40)} = 0,378$; $P = 0,964$). Porém os resultados apresentaram uniformidade da distribuição dos indivíduos entre as espécies existentes.

Relativamente ao índice de Berger-Parker, verificou-se a existência de uma interação significativa entre região e sistema de uso ($F_{(12,40)} = 2,464$; $P = 0,016$). Esta interação evidência as diferenças verificadas entre ILP e PA na região do Planalto ($t_{(40)} = -3,221$; $P = 0,020$), e entre as regiões Leste e Planalto no que diz respeito ao sistema PA ($t_{(40)} = -3,038$; $P = 0,021$) e entre as regiões Sul e Leste para o sistema PD ($t_{(40)} = -3,477$; $P = 0,007$). Globalmente, o sistema PA no Planalto foi onde se registou a maior dominância ($0,32 \pm 0,03$), contrastando com o valor obtido para o sistema PD na região Sul ($0,17 \pm 0,03$) (Tabela 2).

Tabela 2 - Índices de diversidade dos fungos micorrízicos arbusculares estimados com base em Modelos Mistos Lineares Generalizados (GLMM) para os tipos de uso do solo em cada região de SC. (média $\pm$ 95% de intervalo de confiança).

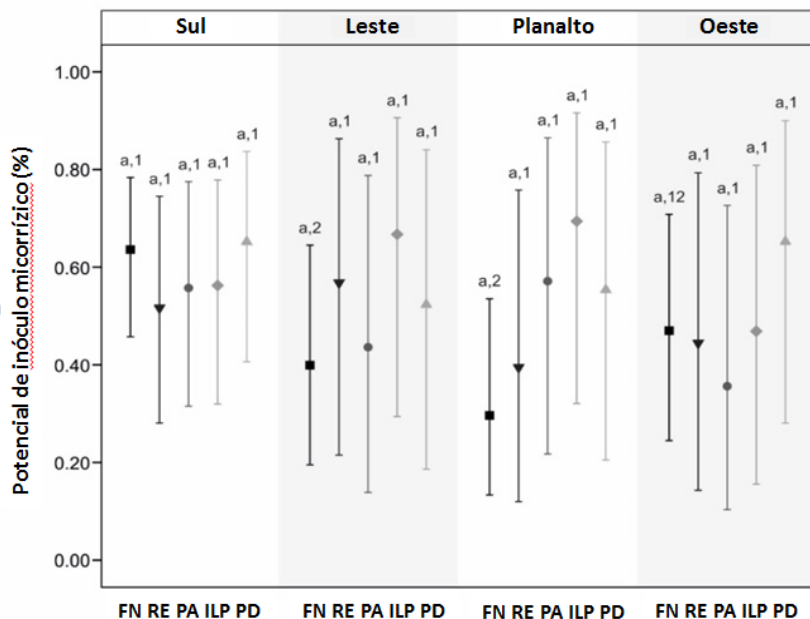
		Shannon		Pielou		Berger-Parker	
		Média	95% CI	Média	95% CI	Média	95% CI
Sul	FN	1.897 ^{ab1}	1.667 - 2.126	0.937 ^{a1}	0.900 - 0.973	0.184 ^{a1}	0.135 - 0.234
	RE	1.836 ^{ab1}	1.606 - 2.066	0.928 ^{a1}	0.891 - 0.964	0.194 ^{a1}	0.144 - 0.244
	PA	1.630 ^{ab1}	1.400 - 1.860	0.939 ^{a1}	0.903 - 0.975	0.233 ^{a12}	0.183 - 0.282
	ILP	1.538 ^{b1}	1.309 - 1.768	0.934 ^{a1}	0.898 - 0.970	0.248 ^{a1}	0.199 - 0.298
	PD	2.013 ^{a1}	1.783 - 2.243	0.937 ^{a1}	0.901 - 0.974	0.172 ^{a2}	0.122 - 0.222
Leste	FN	1.666 ^{ab1}	1.436 - 1.896	0.934 ^{a1}	0.898 - 0.970	0.261 ^{a1}	0.211 - 0.311
	RE	1.518 ^{ab1}	1.289 - 1.748	0.943 ^{a1}	0.907 - 0.980	0.283 ^{a1}	0.234 - 0.333
	PA	1.828 ^{a1}	1.598 - 2.058	0.943 ^{a1}	0.907 - 0.979	0.210 ^{a2}	0.161 - 0.260
	ILP	1.608 ^{ab1}	1.378 - 1.837	0.951 ^{a1}	0.914 - 0.987	0.252 ^{a1}	0.202 - 0.301
	PD	1.324 ^{b2}	1.094 - 1.553	0.974 ^{a1}	0.938 - 1.010	0.293 ^{a1}	0.243 - 0.343
Planalto	FN	1.912 ^{a1}	1.683 - 2.142	0.942 ^{a1}	0.906 - 0.978	0.243 ^{ab1}	0.193 - 0.293
	RE	1.625 ^{ab1}	1.395 - 1.855	0.918 ^{a1}	0.882 - 0.954	0.263 ^{ab1}	0.214 - 0.313
	PA	1.408 ^{b1}	1.178 - 1.638	0.945 ^{a1}	0.908 - 0.981	0.316 ^{a1}	0.266 - 0.366
	ILP	1.743 ^{ab1}	1.514 - 1.973	0.968 ^{a1}	0.932 - 1.004	0.204 ^{b1}	0.154 - 0.254
	PD	1.793 ^{ab1}	1.563 - 2.023	0.961 ^{a1}	0.925 - 0.998	0.221 ^{ab12}	0.171 - 0.271
Oeste	FN	1.520 ^{a1}	1.290 - 1.749	0.952 ^{a1}	0.916 - 0.988	0.259 ^{a1}	0.210 - 0.309
	RE	1.777 ^{a1}	1.547 - 2.007	0.964 ^{a1}	0.927 - 1.000	0.204 ^{a1}	0.154 - 0.254
	PA	1.729 ^{a1}	1.499 - 1.959	0.945 ^{a1}	0.909 - 0.981	0.257 ^{a12}	0.207 - 0.307
	ILP	1.824 ^{a1}	1.594 - 2.054	0.963 ^{a1}	0.927 - 0.999	0.185 ^{a112}	0.135 - 0.235
	PD	1.682 ^{a12}	1.452 - 1.911	0.973 ^{a1}	0.936 - 1.009	0.221 ^a	0.171 - 0.270

NF-floresta nativa; EP-reflorestamento de eucalipto; PA-pastagem; CL-integração lavoura-pecuária; NT-plantio direto. Letras representam diferenças significativas entre usos do solo em cada região e números representam diferenças significativas entre as regiões dentro de cada uso do solo. Fonte: Produção do autor, 2015.

Potencial de Inóculo

A capacidade infectiva dos propágulos dos FMA no solo apresentou uma interação significativa entre os fatores região e tipo de uso, resultantes das diferenças obtidas entre a região Sul e o Leste ($Z_{(1060)} = 2,729$; $P = 0,029$) e entre o Sul e Planalto ($Z_{(1060)} = 4,014$; $P < 0,001$), ambas no que concerne a FN. Globalmente, o potencial de inóculo é mais elevado em ILP nas regiões do Planalto (69 ± 17 %) e do Leste (67 ± 18 %) e no sistema de uso FN foi observado maior potencial na região Sul (63 ± 9 %) quando comparado aos demais sistemas (Figura 4).

Figura 4 - Potencial de inóculo micorrízico (%) com base em Modelos Mistos Lineares Generalizados (GLMM) para tipo de uso do solo em cada região do estado de SC.



FN-floresta nativa; RE-reflorestamento de eucalipto; PA-pastagem; ILP-integração lavoura-pecuária; PD-plantio direto. As diferenças significativas estão indicadas em cada barra. Letras representam diferenças significativas entre usos do solo em cada região e números representam diferenças significativas entre as regiões dentro de cada uso do solo.

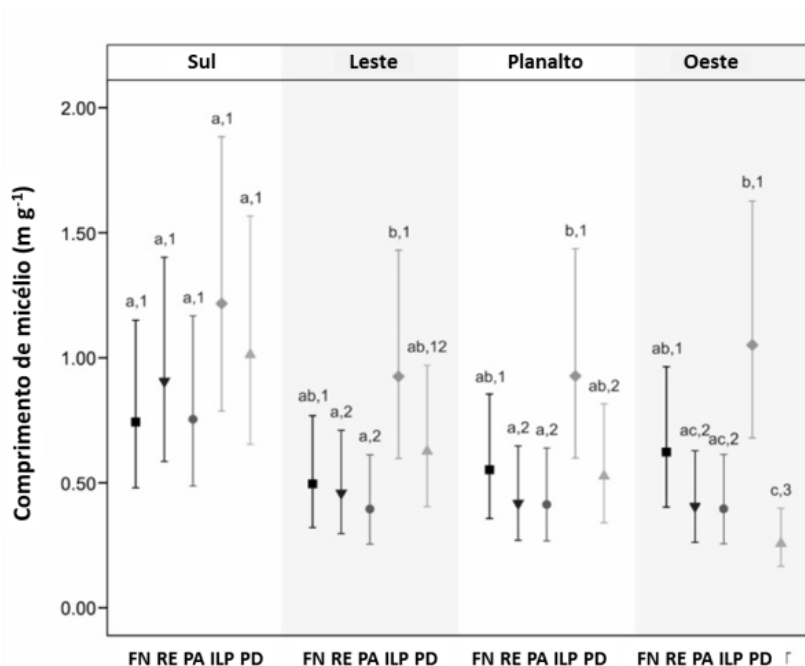
Fonte: Produção do autor, 2015.

Comprimento de micélio extrarradicular total

Neste ponto, importa salientar o fato de o sistema de uso ILP ter apresentado consistentemente um maior comprimento do micélio dentro de cada uma das regiões (Figura 5), bem como a ocorrência de diferenças na interação região e uso do

solo ($F_{(12,1060)} = 3,112$; $P < 0,001$). Em termos gerais, ILP apresenta comprimento de micélio significativamente superior a PA e RE em todas as regiões à exceção do Sul, e também comparativamente a PD e FN da região Oeste (representado por letras na Figura 5). Analisando os resultados dentro de cada sistema de uso, verificou-se que para ILP e FN não existem diferenças entre as regiões, enquanto que para PA e RE o comprimento do micélio é maior na região Sul ($PA = 0,754 \pm 0,168 \text{ m g}^{-1}$; $RE = 0,906 \pm 0,202 \text{ m g}^{-1}$) quando comparado com as regiões restantes, e para PD o Oeste apresenta valores significativamente inferiores ($0,257 \pm 0,057 \text{ m g}^{-1}$) em comparação com as demais regiões (representado por números na Figura 5).

Figura 5 - Comprimento de micélio extrarradicular total (m g^{-1}) FMA com base em GLMM para tipo de uso do solo em cada região do estado de SC..



FN-floresta nativa; RE-reflorestamento de eucalipto; PA-pastagem; ILP-integração lavoura-pecuária; PD-plantio direto. As diferenças significativas estão indicadas em cada barra. Letras representam diferenças significativas entre usos do solo em cada região e números representam diferenças significativas entre as regiões dentro de cada uso do solo.

Fonte: Produção do autor, 2015.

Discussão

Riqueza e Índices de diversidade

No presente estudo a composição das comunidades de FMA (riqueza) foi avaliada em 5 sistemas de usos do solo de comum ocorrência em quatro importantes regiões agrícolas de Santa Catarina-Brasil, utilizando três municípios como réplicas. Cabe ressaltar que os dados de riqueza de espécies e de diversidade advêm de amostragens em duas épocas contrastantes (inverno e verão). Trata-se do primeiro estudo relatado na literatura com abordagem desta magnitude, envolvendo ecossistemas do tipo natural (fragmento de floresta nativa-FN), florestal (reflorestamento com eucalipto-RE), e sistemas agropastoris (pastagem-PA, integração lavoura-pecuária-ILP, e sistemas de cultivo em plantio direto-PD), considerando um gradiente biogeográfico além do gradiente de intensidade de uso do solo. Estudos sobre a influência do uso e ou manejo do solo na composição e diversidade estrutural de FMA tem-se restringido a comparação de áreas agrícolas ou florestais submetidas a diversos manejos, de forma independente e limitada à pequenas variações espaciais (MIRÁS-AVALOS et al., 2011; OEHL et al., 2011; CARUSO et al., 2012; REDECKER et al., 2013; SOTERAS et al., 2015).

Espécies de FMA pertencentes a família *Acaulosporaceae* foram observadas em todos os sistemas de uso. A espécie *A. koskei* destacou-se por sua ampla ocorrência nos sistemas de uso e regiões estudadas com generalista. A presença de poucas espécies pertencentes às famílias *Diversisporaceae*, *Ambisporaceae* e *Paraglomeraceae*, como observado neste estudo, é corroborada pelos resultados de Alguacil et al. (2014) em agrossistemas do semi-árido mediterrânico.

As espécies *A. koskei* e *Glomus* sp apresentaram-se com espécies generalistas, indiferentes as diferenças que os usos ou características dos solos em cada região possam promover. As

demais espécies ou são preferentes, apresentando algum tipo de afinidade por determinados sistemas de uso como no caso da *S. pellucida* observada principalmente nos reflorestamentos e as espécies de *A. mellea*, que ocorreram preferencialmente em FN e PA, e *A. scrobiculata* com maior ocorrência em RE e ILP; ou ainda são espécies raras e restritas a determinados sistemas como *Paraglomus occultum* e *Gigaspora gigantea*, observadas apenas em PD, *Ambispora appendicula* apenas em FN, *Fuscutata rubra* apenas em PA e *Racocetra coralloidea* em RE. É muito importante identificar o impacto do uso do solo na diversidade de espécies e na estrutura da comunidade há visto que estes fungos desempenham função vital na manutenção de inúmeros serviços ecossistêmicos (ALGUACIL et al., 2014). A presença de espécies generalistas ou mesmos de espécies preferencias oferece plasticidade aos sistemas quando sujeitos a estresses ambientais e antropogênicos (Figura 6).

Figura 6 - Classificação das espécies de fungomicorrízicos arbusculares (FMA) em Generalistas (ocorrência em $\geq 66\%$ das áreas amostradas), Intermediárias (ocorrência entre 34% e 65% das áreas), Preferentes (ocorrência em $\leq 33\%$ das áreas) e Ausente (sem ocorrência).

	FN	RE	PA	ILP	PD	
A.kos.	10	6	9	10	10	
G.sp.	5	9	10	10	9	
D.het.	9	7	8	9	6	39
A.mor.	7	6	8	5	6	32
C.pel.	6	12	2	3	4	27
A.scr.	5	7	2	7	5	26
Am.lep.	7	6	4	5	4	26
Gi.mar.	6	3	3	3	9	
A.mel.	7	3	6	4	3	24
						23
Gi.alb.	4	2	5	2	4	17
A.tub.	3	0	4	3	3	13
K.col.	2	2	2	3	3	12
Gi.dec.	2	2	2	3	2	11
Gi.sp.	1	4	4	2	0	11
S.sp.	0	2	1	2	2	7
Ar.tra.	2	2	0	0	2	6
A.lea.	2	0	0	0	0	2
Gi.gig.	0	0	0	0	2	2
A.spi.	0	0	0	1	0	1
Am.ape.	1	0	0	0	0	1
F.rub.	0	0	1	0	0	1
P.occ.	0	0	0	0	1	1
R.cor.	0	1	0	0	0	1

Generalista

Intermediária

Preferente

Nula

FN-floresta nativa; RE-reflorestamento de eucalipto; PA-pastagem; ILP-integração lavoura-pecuária; PD-plantio direto com 15 áreas amostradas cada; Regiões (total para as regiões com 60 áreas amostradas). *Kuklospora colombiana* (A.col.), *Acaulospora koskei* (A.kos.), *Acaulospora laevis* (continuação Figura 6) (A.lea.), *Acaulospora mellea* (A.mel.), *Acaulospora*

morrowiae (A.mor.), *Acaulospora* *crobiculata* (A.scr.), *Acaulospora* *spinosa* (A.spi.), *Acaulospora* *tuberculata* (A.tur.), *Ambispora* *appendicula* (Am.app.), *Ambispora* *leptoticha* (Am.lep.), *Archaeospora* *trappei* (Ar.tra.), *Dentiscutata* *heterogama* (D.het.), *Fuscutata* *rubra* (F.rub.), *Gigaspora* *albida* (G.alb.), *Gigaspora* *decipiens* (G.dec.), *Gigaspora* *gigantea* (Gi.gig.), *Gigaspora* *margarita* (Gi.mar.), *Gigaspora* sp. (Gi.sp.), *Racocetra* *coralloidea* (R.cor.), *Scutellospora* *pellucida* (S.pel.), *Scutellospora* sp. (S.sp.), *Glomus* sp. (G.sp.), *Paraglomus* *occultum* (P.occ.).

Números dentro dos quadros representam a ocorrência das espécies dentro de cada área de amostragem, considerando os sistemas de usos do solo.

Fonte: Produção do autor, 2015.

Outra observação digna de nota em nosso estudo foi a presença de uma única espécie do gênero *Glomus* de forma generalizada nos diferentes usos, exceto na FN. Aguacil et al. (2014) também observaram o mesmo para *R. intraradices* ao estudar diferentes áreas agrícolas manejadas em região semi-árida do Mediterrâneo. Espécies da família Glomeraceae são amplamente distribuídas em diferentes localidades tanto em ecossistemas naturais como manejados como observado neste estudo e por Opik et al. (2006), entretanto, a baixa riqueza de espécies desta família é algo inesperado e difícil de explicar considerando que elas são consideradas espécies com modo de vida generalista e que produzem uma grande quantidade de hifas extrarradiculares e esporos (JANSA et al., 2002; OPIK et al., 2006)

O impacto nas mudanças de uso do solo nas comunidades de FMA ainda não são claras. Alguns estudos relatam uma relação negativa entre a intensidade de uso do solo e a diversidade de FMA (ALGUACIL et al., 2008; OEHL et al., 2010; SCHNOOR et al., 2011). Em geral o preparo do solo em efeitos negativos sobre a produção de propágulos (esporos e hifas) destes fungos no solo (GALVEZ et al., 2001) e altera a composição das comunidades de FMAs colonizando as raízes, com foi observado para milho por Jansa et al. (2002).

Nossos resultados indicam que o tipo de uso afeta a composição e diversidade das comunidades de FMA, entretanto, com variações muito pontuais, limitadas a determinadas regiões e usos. Os efeitos do tipo de uso do solo na composição das comunidades de FMA apresentaram padrões pontuais muito relacionados à região. Dentro da região Oeste e Leste a riqueza média estimada por GLMM para cada área não variou, indicando que a composição da comunidade não foi influenciada pelo tipo de uso do solo nestas duas regiões. Dentro das demais regiões a riqueza apresentou o seguinte comportamento: no Sul **PD > ILP**, no Planalto **ILP>PA**. Sob o ponto de vista dos usos observamos o seguinte comportamento na riqueza. No PD e no RE o Sul apresentou sempre maior riqueza que no Leste; na pastagem Planalto > Leste. Tais resultados não nos permitem, entretanto, estabelecer um padrão geral de efeito das mudanças no uso do solo sobre a composição e diversidade das comunidades de FMAs, o que reflete a complexidade do problema. O mesmo pode-se dizer quanto aos índices de diversidade utilizados. Diversos estudos têm relacionado a mudança no uso do solo com a perda de riqueza e diversidade em comunidades de FMA (KÖNIG et al., 2010, VERBRÜGGEN et al., 2010, SCHNOOR et al., 2011; XIANG et al., 2014), entretanto, existem inúmeros trabalhos que falharam em detectar grandes diferenças entre sistemas cultivados e não cultivados (GONZALEZ-CORTÉS et al., 2012; DAI et al., 2013)

A maior riqueza e diversidade nos sistemas agrícolas PD e ILP em algumas regiões pode estar relacionada a fatores como tipo de solo, seus atributos químicos e físicos e a práticas agrícolas como a rotação de culturas e calagem.

O sistema de integração lavoura pecuária tem como premissa diversificar culturas favorecendo a rotação, melhoria das condições físicas do solo com a pastagem nas áreas de lavoura e a recuperação da fertilidade. Este ambiente favorece a diversidade da comunidade de FMAs, estimulando a

micorrização e presença de propágulos viáveis, o que corroborou com os resultados obtidos, onde CL foi o sistema de uso que apresentou a maior diversidade de FMA na região Sul, que possui uma classe de solo médio-argilosa a arenosa (Figura 1), diferente das outras regiões. Esta característica pode conferir a este sistema maior capacidade de agregação do solo devido a rotatividade de plantas (gramíneas para pastejo e culturas agrícolas) o que matem a esporulação das espécies presentes no solo, favorecendo diferentes famílias de FMA devido a sua associação com diferentes grupos vegetais como gramíneas e leguminosas (BRUNDRETT et al., 1999).

Potencial de Inóculo micorrízico

Além da riqueza das espécies, uma importante tarefa em estudos ecológicos é estimar o número de propágulos infectivos, o que determina a capacidade do solo em formar micorrizas nas raízes de plantas. O preparo do solo para plantio é uma das práticas agrícolas que mais influencia a comunidade e o potencial de inóculo micorrízico. Os constantes ciclos de preparo, plantio e colheita mantêm o solo em permanente desequilíbrio, o que desencadeia a produção de propágulos para a garantia de sobrevivência pelos FMAs (CARRENHO et al., 2010). O potencial de inóculo neste estudo não apresentou diferença entre os diferentes sistemas de uso do solo o que sugere que as comunidades de FMA podem ser resilientes frente a alterações edáficas permitindo que estes organismos se restabeleçam após determinado distúrbio (JOHNSON et al., 2013), mantendo as suas funções. Leigh (1983); Nowak & Sigmund (2007) concluíram em seus estudos que várias espécies de fungos podem ocupar uma só raiz, mostrando a versatilidade deste grupo de organismos de ocupar nichos mais amplos até os mais específicos. Portanto apesar do presente estudo não indicar diferença entre os sistemas, é importante enfatizar que o potencial de inóculo aponta alta capacidade dos

FMA em manter sua eficiência simbiótica, indicando valores de 31,87% a 67,55%.

Comprimento de micélio extrarradicular total

Além de absorver os nutrientes do solo, o micélio também participa de um processo extremamente importante na conservação: a agregação (MILLER et al., 1995). A contribuição do micélio para este processo se dá pelo crescimento das hifas extra-radulares através do solo, criando uma espécie de estrutura de sustentação que mantém unidas as partículas através do efeito físico. As partículas minerais e orgânicas são mantidas fisicamente unidas pelas hifas de tal modo que os microagregados podem ser formados, estas partículas são cimentadas através da ação de agentes ligantes tais como polissacarídeos e cátions polivalentes, que formam complexos com a argila e a matéria orgânica (GUPTA & GERMIDA, 1988). Por fim, os microagregados são fisicamente unidos pelas hifas e raízes, criando uma estrutura macroagregada que poderá ainda ser estabilizada pela cimentação com polissacarídeos e outros componentes orgânicos.

Os tipos de uso de solo FN e RE tiveram valores superiores de comprimento de micélio nas regiões leste, oeste e planalto quando comparados aos demais sistemas de uso do solo, isto pode ser explicado pelo preparo do solo, pois o plantio é uma das práticas agrícolas que mais influencia o comportamento de hifas, o revolvimento do solo promove a fragmentação da rede de hifas extrarradiculares estabelecidas no solo, rompendo e extravasando o seu conteúdo citoplasmático. o que explica porque nf e re apresentaram valores superiores, por serem sistemas com pouca intervenção antrópica e sem revolvimento do solo, preservando a rede de hifas.

Os sistemas de uso do solo quando comparados isoladamente, indicaram que na região Sul RE, PA e PD tiveram maior comprimento de micélio quando comparados com as demais regiões. Nos solos arenosos, especialmente, a ação do micélio é importante para manter os macroagregados unidos, possibilitando sua imobilização e posterior ligação das partículas intermediada por componentes orgânicos (READ, 1989; FORSTER & NICOLSON, 1981). Entretanto, estes agregados podem ser degradados à medida que são criados, devido à rápida decomposição das hifas e do uso de práticas que reduzam o crescimento radicular e, conseqüentemente, o crescimento do micélio, justificando os resultados do presente estudo, pois a região Sul possui solo médio arenoso em comparação as demais regiões que possuem solos com características texturais argilosas.

As pesquisas realizadas com FMA em áreas agrícolas indicam que estes organismos tem uma função importante na produção de alimentos e equilíbrio no ecossistema. Dentre a ampla gama de resultados encontrados é importante enfatizar que cada sistema de produção agrícola tem uma função e que ao compararmos sistemas naturais com agrossistemas é preciso ter cuidado ao caracterizarmos estas áreas escolhidas como

benéficas ou maléficas para a comunidade de FMA e consequentemente sua funcionalidade.

Estudos em todo mundo já comprovaram a existência a alta atividade, além da contribuição em nível de nutrição vegetal e estrutura do solo dos FMA. Apesar da comunidade fúngica sofrer alterações, mesmo em um sistema agressivo onde há revolvimento do solo expondo as hifas e danificando os propágulos infectivos, os FMA, mesmo sofrendo consequências com a redução da sua diversidade, persistem e tem importância na dinâmica deste ambiente. É preciso caracterizar estas alterações, bem como o comportamento dos FMA para que o manejo das comunidades nativas seja eficiente, para que a conservação de recursos naturais seja aliada a com a produtividade.

7.4. CONCLUSÃO

A riqueza e diversidade de espécies de FMA foram influenciadas pelos sistemas de uso de forma pontual e dependente da região. Não foi possível estabelecer um padrão geral de efeito da mudança no uso do solo na composição das comunidades de FMA;

Acaulospora koskei e *Glomus* sp. apresentaram-se como espécies generalista (cosmopolita) nos solos subtropicais estudados, o que revela sua capacidade de adaptação a diferentes condições de solo;

O potencial de inoculo e a rede de hifas no solo foram influenciados pelos sistemas de uso do solo e regiões, sendo maior nos solos do sistema de ILP nas regiões do Planalto e Leste.

REFERÊNCIAS

ALGUACIL, M.M., et al. **The impact of tillage practices on arbuscular mycorrhizal fungal diversity in subtropical crops.** Ecological Applications, 18:527-536, 2008.

AVIO, L., et al. **Impact of nitrogen fertilization and soil tillage on arbuscular mycorrhizal fungal communities in a Mediterranean agroecosystem.** Soil Biology and Biochemistry, 67:285-294, 2013.

BARTZ, M.L., et al. **Earthworm richness in land-use systems in Santa Catarina, Brazil.** Applied Soil Ecology 83:59-70, 2014.

BEDINI, S., et al. **Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices*.** Soil Biology and Biochemistry, 41:1491-1496, 2009.

BEVER, J. D., et al. **Arbuscular mycorrhizal fungi: More diverse than meets the eye, and the ecological tale of why.** Bioscience, 51:923-931, 2001.

BRUNDRETT, M. C.; ABBOTT, L. K.; JASPER, D. A. **Glomalean mycorrhizal fungi from tropical Australia I. Comparison of the effectiveness and specificity of different isolation procedures.** Mycorrhiza, 8:305-314, 1999.

CARAVACA, F. et al., **Formation of stable aggregates in rhizosphere soil of *Juniperus oxycedrus*: effect of AM fungi and organic amendments.** *Applied Soil Ecology*, 33:30-38, 2006.

CARRENHO, R., et al. **Fungos micorrízicos arbusculares em agrossistemas brasileiros.** In: SIQUEIRA, J.O.; DE SOUZA, F.A.; CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M. *Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil*. Lavras: Editora UFLA, v. 1, p. 153-214, 2010.

CARUSO, T., et al. **Compositional diver-gence and convergence in arbuscular mycorrhizal fungal communities.** *Ecology*, 9:1115-1124, 2012.

DAI, M., et al. **Arbuscular mycorrhizal fungi assemblages in Chernozem great groups revealed by massively parallel pyrosequencing.** *Canadian Journal of Microbiology*, 58:81-92, 2012.

EGERTON-WARBURTON, L. M. ; QUEREJETA , J. I.; ALLEN M. F. **Common mycorrhizal networks provide a potential pathway for the transfer of hydraulically lifted water between plants.** *Journal of Experimental Botany*, 58:1473-1483, 2007.

FORSTER, S.M.; NICOLSON, T.H. **Aggregation of sand from a maritime embryo sand dune by microrganisms and higher plants.** *Soil Biology and Biochemistry*, 13:199-203,1981.

GALVEZ, L., et al. Effect of tillage and farming system upon VAM fungus populations and mycorrhizas and nutrient uptake of maize. Plant and Soil, 228:299-308, 2001.

GERDEMANN, J. W.; NICOLSON, T. H. Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. Transactions of the British Mycological Society, 46:235-244, 1963.

GIOVANNETTI, M.; MOSSE, B. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots. New Phytologist, 84:489-500, 1980.

GONZÁLEZ-CORTÉS, J.C., et al. Arbuscular mycorrhizal fungal (AMF) communities and land use change: the conversion of temperate forests to avocado plantations and maize field disturbance on endomycorrhizal populations. American Journal of Botany, 66:14-18, 1979.

GUPTA, V.V.S.R.; GERMIDA, J.J. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. Soil Biology and Biochemistry, 21: 777-786, 1988.

INVAM. International Collection of Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi. <http://invam.wvu.edu/>. Acesso 2011, 2012 e 2013.

JANSA, J., et al. **Diversity and structure of AMF communities as affected by tillage in a temperate soil.** *Mycorrhiza*, 12:225–34, 2002.

JOHNSON, N. C., et al. **Predicting community and ecosystem outcomes of mycorrhizal responses to global change.** *Ecology Letters*, 16:140-153, 2013.

KÖHL, L., OEHL, F., VAN DER HEIJDEN, M.G.A. **Agricultural practices indirectly influence plant productivity and ecosystem services through effects on soil biota.** *Ecological Applications*, 2014.

KONIG, S., et al. **TaqMan real-time PCR assays to assess arbuscular mycorrhizal responses to field manipulation of grassland biodiversity: effects of soil characteristics, plant species richness, and functional traits.** *Applied and Environmental Microbiology*, 76:3765–3775, 2010.

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

LEIGH, E.G. **When does the good of the group override the advantage of the individual.** *Proceedings of the National Academy of Sciences* , 80, 2985-2989, 1983.

LI, L.F.; LI, T.; ZHAO, Z.W. **Differences of arbuscular mycorrhizal fungal diversity and community between a cultivated land, an old field, and a never-cultivated field in a hot and arid ecosystem of southwest China.** *Mycorrhiza*, 17:655-665, 2007.

LUDWIG, J.A.; REYNOLDS, J.F. **Statistical ecology.** New York: John Wiley, 1988. 337p.

MAGURRAN, A. **Ecological diversity and its measurement.** Cambridge: British Library, 1988. 177p.

MELLONI, R. **Quantificação de micélio extrarradicular de fungos micorrízicos arbusculares em plantas cítricas.** Piracicaba, SP, ESALQ, Dissertação (Curso de Mestrado), 1996.

MILLER, R.M.; REINHARDT, D.R.; JASTROW, J.D. **External hyphal production of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in pasture and tallgrass prairie communities.** *Oecologia*, 103: 17-23, 1995.

MIRÁS-AVALOS, J., et al. **The influence of tillage on the structure of the rhizosphere and root-associated arbuscular mycorrhizal fungal communities.** *Pedobiologia*, 54:235–241, 2011.

MOORMAN, T.; REEVES, F. B. **The role of endomycorrhizae in revegetation practices in the semi-arid West. II. A bioassay to determine the effect of land disturbance on endomycorrhizal populations.** American Journal Botany, 66:14-18, 1979.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O.; BRUSSAARD, L. **Biodiversidade do Solo em Ecossistemas Brasileiros.** Ed. UFLA. 768p, 2008.

NOWAK, M.A., SIGMUND, K. **How populations cohere: five rules for cooperation.** In: May, R., McLean, A. (Eds.), **Theoretical Ecology Principles and Applications.** , 3 ed. Oxford University Press, Oxford, UK, 2007.

OEHL, F., et al. **Advances in Glomeromycota taxonomy and classification.** IMA Fungus 2:191-199, 2011.

OEHL, F., et al. **Soil type and land use intensity determines the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities.** Soil Biology Biochemistry, 42: 724-738, 2010.

OEHL, F.; SIEVERDING, E. ***Pacispora*, a new vesicular arbuscular mycorrhizal fungal genus in the glomeromycetes.** Journal of Applied Botany & Food Quality-Angewandte Botanik, 78:72-82, 2004.

ÖPIK, M., et al. **The online database Maarj AM reveals global and ecosystemic distribution patterns in arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomeromycota*)**. *New Phytologist*, 188:233-241, 2010.

PIELOU, E.C. **The measurement of diversity in different types of biological collections**. *Journal of Theoretical Biology*, 13:131-144, 1966.

READ, D.J. **Mycorrhizas and nutrient cycling in sand dune ecosystems**. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, p 89-110, 1989.

REDECKER, D., et al. **An evidence-based consensus for the classification of arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomeromycota*)**. *Mycorrhiza*, 23:515-531, 2013.

RILLIG, M.C.; MUMMEY, D.L. **Mycorrhizas and soil structure**. *New Phytologist*, 171:41-53, 2006

SCHNOOR, T.K., et al. **Mechanical soil disturbance as a determinant of arbuscular mycorrhizal fungal communities in semi-natural grassland**. *Mycorrhiza*, 21: 211-220, 2011.

SMITH, S.E., READ, D.J. **Mycorrhizal Symbiosis**. Academic Press, New York. 2008.

SOTERAS, F., et al. **Arbuscular mycorrhizal fungal composition in high montane forests with different disturbance histories in central Argentina.** *Applied Soil Ecology*, 85: 30-37, 2015.

STUTZ, J.C.; MORTON, J.B. **Successive pot cultures reveal high species richness of arbuscular endomycorrhizal fungi in arid ecosystems.** *Canadian Journal of Botany*, 74:1883-1889, 1996.

TRESEDER, K.; CROSS, A. **global distribution of arbuscular mycorrhizal fungi.** *Ecosystems*, 9:305-316, 2006

VAN DER GAST, C.J., et al. **Spatial scaling of arbuscular mycorrhizal fungal diversity is affected by farming practice.** *Environmental Microbiology*, 13: 241-249, 2011.

VAN DER HEIJDEN, M.G.A. **Mycorrhizal fungi reduce nutrient loss from model grassland ecosystems.** *Ecology*, 91:1163-1171, 2010.

VAN DIEPEN, L.T.A.; LILLESKOV, E.A.; PREGITZER, K.S. **Simulated nitrogen deposition affects community structure of arbuscular mycorrhizal fungi in northern hardwood forests.** *Molecular Ecology*, 20:799-811, 2011.

VERBRUGGEN, E., et al. **Community assembly, species richness and nestedness of arbuscular mycorrhizal fungi in agricultural soils.** *Molecular Ecology*, 21, 2341-2353, 2012.

WILSON, G.W., et al. **Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: results from long-term field experiments.** Ecology Letters, 12, 452-61, 2009.

XIANG, D., et al. **Land use influences arbuscular mycorrhizal fungal communities in the farming–pastoral ecotone of northern China.** New Phytologist 204: 968-978, 2014.

8. CAPÍTULO III

RESISTÊNCIA E RESILIÊNCIA DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES À MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DE MANEJO DO SOLO

RESUMO

Consideramos as hipóteses de que os manejos sustentáveis suportam uma maior diversidade de fungos micorrízicos arbusculares (FMA) no solo quando comparados com manejos mais impactados, o que pode conferir maior resistência e/ou resiliência a eventos climáticos extremos como seca e excesso de chuva. O objetivo deste estudo foi avaliar a resistência e resiliência das comunidades de FMA de dois sistemas contrastantes de uso do solo em ecossistemas de sobreiros (*Quercus suber*), após eventos climáticos extremos e como elas operam em termos de processos nos solos e serviços associados. Foram realizadas coletas nos sistemas de manejo sustentável (MS) e manejo convencional (MC) em áreas de Montado e a partir de experimentos de semi-campo em unidades denominadas “modelos terrestres de ecossistemas” (*terrestrial model ecosystems* – TMEs) foi feita a avaliação das alterações na estrutura e função das comunidades de FMA identificadas no campo e sujeitas a diferentes eventos de pluviosidade extrema. Os FMA foram influenciados pelas alterações climáticas de regimes de chuva em diferentes manejos de produção. O comprimento de micélio não foi alterado no sistema sustentável (MS), sugerindo a capacidade dos FMA em manter a colonização e consequentemente a produção de hifas sob diferentes condições climáticas e no manejo convencional (MC) os tratamentos extremos influenciaram a produções de hifas fúngicas.

Palavras-chave: regime hídrico, *terrestrial model ecosystems*, micorrizas, manejo do solo

ABSTRACT

RESISTANCE AND RESILIENCE OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGI TO CLIMATE CHANGE AND SOIL MANAGEMENT

The considered hypothesis was that sustainable management supports a greater diversity of soil arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), compared with most impacted managements, which can provide greater resistance and/or resilience in relation to climatic events. The aim of this study was to evaluate the resistance and resilience of AMF communities of two contrasting land-uses in cork oak (*Quercus suber*) ecosystems, after extreme climatic events and, how they operate in terms of selected soil processes and associated services. Sampling was carried out in sustainable management system (MS) and conventional management (CM) in cork oak (*Quercus suber* L) areas and, from semi-field experimental units called "terrestrial model ecosystems" (TMEs). It was performed the evaluation of communities' structure and functions alteration from field-identified AMF, subjected to different extreme pluviosity events. AMF were influenced by climatic alterations of water regime in different production managements. Mycelium length was not altered in the sustainable system (MS), suggesting AMF's ability to maintain colonization and, consequently, hyphae production under different climatic conditions and, extreme treatments influenced the fungal hyphae production on conventional management (CM).

Keywords: mycorrhiza, soil management, terrestrial model ecosystems, water regime.

8.1. INTRODUÇÃO

Estudos sobre os efeitos da alteração ou perda da biodiversidade do solo como consequência de fatores externos, tais como as alterações climáticas (Bokhorst et al., 2011), podem fornecer informações importantes sobre o impacto dos organismos edáficos em processos ecológicos e sobre a prestação dos serviços dos ecossistemas associados ao solo (CARDINALE et al., 2006). Porém a influência e a ligação destes fatores tornam-se difícil de avaliar devido à escassez de conhecimento e clareza sobre as relações ecológicas que constituem essas interações (CHAKRABORTY et al., 2012).

Dentre os inúmeros componentes microbiológicos do solo, um dos de maior destaque são os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) - Filo Glomeromycota, classe Glomeromycetes (glomeromicetos) – que tem sido foco da maioria das pesquisas ecológicas e eco-fisiológicas (KAPULNIK & Douds, 2000; VAN DER HEIJDEN & SANDERS, 2003) por apresentarem ocorrência universal e formarem relações simbióticas com as mais variadas categorias taxonômicas de plantas.

A produção agrícola e florestal é determinada pelas condições ambientais e práticas de uso do solo. Com o aumento áreas cultivadas em todo o mundo, sistemas de produção dependem de recursos hídricos, sendo assim, a água pode ser um fator chave limitante restringindo a sustentabilidade e desenvolvimento agrícola (LAMBIN et al., 2013). A simbiose entre os FMA e as plantas melhora a capacidade do hospedeiro para sobreviver a estresse nutricional e hídrico (BLANKE et al, 2011; CAVAGNARO et al.; 2012), além disso o micélio extrarradicular transfere através dos fungos água para as plantas hospedeiras sob condições de baixa umidade do solo (KHALVATI et al., 2005; MARULANDA et al., 2003). Portanto os estresses edáficos, com déficit de água e desequilíbrio do solo em nutrientes, afetam abundância e

aspectos funcionais dos FMA (CARTMILL et al., 2008; SIMPSON & DAFT, 1990)

Em Portugal, o sobreiro (*Quercus suber* L.) destaca-se como uma das espécies florestais mais importantes. Povoamentos puros e mistos representam 23 % do total da área de floresta no país (AFN, 2010). Portugal é o maior produtor mundial de cortiça e exportador sendo responsável por 52,5% da produção total mundial (PEREIRA et al., 2008). As árvores tradicionais são cultivadas em sistemas agrosilvipastoris chamados “Montados”, oriundos principalmente da regeneração natural ou cultivo. Essas plantações são importantes não só para a produção de cortiça, mas também para o sequestro de carbono nas florestas mais antigas que são destinadas para a produção de madeira (COELHO et al., 2012).

O sobreiro é uma espécie de crescimento lento, bem adaptado a condições climáticas adversas, incluindo verões quentes e secos em solos rasos e de baixa fertilidade. Além do seu valor econômico e social o sobreiro desempenha um papel importante na proteção ecológica, retenção de água e conservação do solo das grandes áreas do Sul de Portugal além de serem importantes reservatórios de biodiversidade (PEREIRA, 2007; ARONSON et al., 2009; DA SILVA et al., 2009). O sobreiro pode desempenhar um papel importante como um sistema agro-florestal tampão que evita o processo de desertificação potencial (COELHO et al., 2012), uma vez que estes são distribuídos entre as áreas suscetíveis a este processo.

Os efeitos antrópicos podem tornar estes ecossistemas mais vulneráveis às mudanças que antes poderiam ser absorvidas pelo sistema natural (FOLK et al., 2004). Lumini et al. (2010), através de estudos utilizando a técnica de pirosequenciamento em solos a Sardenha Itália identificou que o sistema de sobreiro cultivado em sistema agrícola teve menor diversidade de FMA com relação às áreas de pastagem e cultivo de videira. JEFFRIES et al.(2003) realizou estudos em Portugal com FMA comprovando a eficiência dos FMA para a

recuperação de áreas desertificadas, biorremediação de solo contaminados e aumento da fertilidade. Portanto o estudo da diversidade estrutura e funcionalidade das populações de FMA em Montados torna-se importante para conservação neste ecossistema economicamente e ambientalmente importante em Portugal.

O objetivo deste estudo foi avaliar a resistência e resiliência das comunidades de FMA de dois sistemas contrastantes de uso do solo em ecossistemas de sobreiros (*Quercus suber*), após eventos climáticos extremos e como eles operam em termos de processos do solos e serviços associados. Consideramos as seguintes hipóteses: de que os manejos sustentáveis suportam uma maior diversidade de FMA do solo quando comparados com manejos mais impactados que vai conferir maior resistência e/ou resiliência em relação aos eventos climáticos.

8.2. MATERIAL E MÉTODOS

Áreas

Este estudo foi realizado em duas áreas com sobreiros (*Quercus suber* L.): em propriedades sob manejo sustentável com baixa intervenção antrópica na Região do Freixo-do-Meio (MS) e manejo convencional com uso de maquinário agrícola e atividade pecuária na região do Freixo-de-Baixo (MC) em Portugal durante o mês de maio (primavera) de 2014.

Experimento/Mesocosmos

Para a simulação de eventos climáticos extremos, núcleos de solo com 17,5 cm de diâmetro e 40 cm de profundidade foram coletados em A1 e A2 para ensaio de mesocosmos simulando ecossistemas terrestres. A amostragem dos TMEs (*terrestrial model ecosystems*) foi feita de acordo

com Knacker et al. (2004). Um total de 84 TMEs foram coletados.

Para simular os diferentes regimes hídricos, foi utilizada uma solução de chuva. O protocolo original para a preparação de água da chuva artificial foi ajustado devido à sua alta toxicidade dada no protocolo original de Velthorst (1993), o NaF foi omitido da água da chuva artificial.

Como o alumínio não ocorre na água da chuva, provavelmente foi adicionado a solução da chuva artificial devido aos seus elevados níveis na solução do solo, o $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ dado por Velthorst (1993) foi substituído por NaNO_3 . (isto não afeta a força iônica final da água da chuva artificial resultante).

No laboratório, os TMEs foram submetidos a manipulações em condições controladas: regime de luz, temperatura e umidade. A simulação dos regimes de chuva e condições de inundação e seca para criar cenários foi feita com base na análise de dados climáticos para a região ao longo dos últimos 5 anos, e com base na previsão do IPCC para as próximas décadas.

Foram utilizados os seguintes tratamentos de chuva:

- Chuva normal (CN): aplicação de 100 ml de solução se chuva três vezes por semana (segunda-feira, quarta-feira e sexta-feira);

- Seca (SE): aplicação de 20 ml de solução se chuva três vezes por semana (segunda-feira, quarta-feira e sexta-feira);

- Chuva intensa (CI): aplicação de 300 ml de solução se chuva três vezes por semana (segunda-feira, quarta-feira e sexta-feira);

- Seca intercalada (SI): aplicação de 0-100 ml, intercalado entre uma semana e outra, de solução se chuva três vezes por semana (segunda-feira, quarta-feira e sexta-feira);

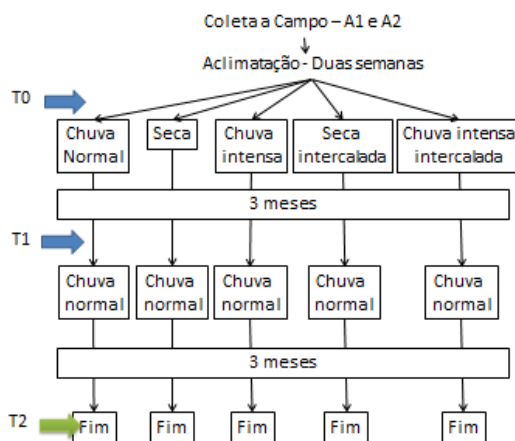
- Chuva intensa intercalada (CII): aplicação de 100-500 ml, intercalado entre uma semana e outra, de solução se chuva

três vezes por semana (segunda-feira, quarta-feira e sexta-feira);

O experimento foi realizado durante seis meses com três diferentes períodos de análise: Tempo 0/T0 (2 semanas): Depois de aclimação na câmara sob o regime normal de chuvas; (uso de 4 TMEs para análises); Tempo 1/ T1 (3 meses após o início da experiência): sob diferentes regimes de chuva (uso de 40 TMEs para análises); e Tempo 2/ T2 (6 meses após o início) sob um regime normal de chuva (uso de 40 TMEs para análises).

Figura 1 - Ilustração dos tratamentos e tempo de experimento.

Manejo sustentável com baixa intervenção antrópica (MS) e manejo convencional com uso de maquinário agrícola e atividade pecuária (MC). Tempo zero (T0), Tempo 1(T1) e Tempo 2 (T2); Chuva Normal (100 ml), seca (20 ml), chuva intensa (300 ml), seca intercalada (0-100 ml), chuva intensa intercalada (300-500 ml).



Fonte: Produção do autor, 2015.

Em cada período de amostragem foram medidos os seguintes parâmetros: abundância de esporos e comprimento de micélio com o intuito de avaliar a evolução dos possíveis efeitos após os eventos climáticos.

Riqueza de FMA

Os esporos de FMAs foram extraídos do solo pela técnica de peneiragem úmida (GERDEMANN & NICOLSON, 1963), seguida de gradiente de sacarose. No microscópio estereoscópio os esporos serão separados por morfotipos e contados. Lâminas permanentes foram montadas com os esporos, utilizando-se PVLG (Alcool polivinílico, glicerol e ácido láctico) e PVLG misturado ao Reagente de Melzer. A identificação das espécies de FMA foi baseada no tamanho, cor e forma dos esporos determinados sob microscópio estereoscópio e pela análise das estruturas sub-celulares dos esporos sob microscópio de luz, bem como por comparação com o manual de Schenck & Perez (1988) e com a descrição das espécies nas páginas da International Culture Collection of Arbuscular and Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi (INVAM) (<http://invam.caf.wvu.edu>). O número de esporos foi utilizado para calcular a riqueza das espécies.

Comprimento de micélio extrarradicular total

A quantificação do comprimento de micélio extrarradicular total no solo (CMET) foi realizada conforme descrito por Melloni (1996).

No fim do experimento, foi possível determinar qual o agroecossistema (MC ou MC) foi mais afetado pelos diferentes cenários de chuva (especialmente o extremo de seca e regimes de chuva intensiva).

Análises estatísticas

O efeito do manejo e do regime de chuvas, e da interação entre ambos (variáveis independentes) na abundância de micorrizas e comprimento do micélio (variáveis dependentes), recorreu-se a modelos generalizados lineares mistos (GLMM) ou modelos lineares mistos (LMM). À exceção da abundância, todas as variáveis foram transformadas para LOGIT de forma a lidar com o fato de serem dados percentuais. As funções de distribuição utilizadas em cada GLMM foram selecionadas de acordo com a tipologia de dados e o melhor ajuste do modelo, tendo-se utilizado uma distribuição de Poisson com Log para a abundância, uma distribuição Gamma com Log para o comprimento do micélio e distribuições lineares para as restantes variáveis. Em todos os GLMM e LMM, o *cart* foi considerado como “Random effect”.

Sempre que se verificou a ocorrência de diferenças significativas, foi utilizado o teste de Dunnett para comparações múltiplas com correção de Bonferroni. Os resultados estão apresentados sob a forma de média estimada $\pm$ erro padrão. Atendendo ao desenho experimental e objetivo, a análise foi efectuada de forma independente para cada tempo de amostragem (i.e. T1, T2). Em toda a análise estatística, valores de $P < 0,05$ foram considerados significativos. A análise estatística foi realizada em SPSS e R.

8.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados

Para T1, quando comparamos os tratamentos isoladamente dentro dos manejos podemos observar que houve diferenças significativas ($F=6,172$; $P<0,001$), dado pelo tratamento SI que apresentou abundancia media diferente entre os manejos: maior para MC ($4,808\pm 7,390$) e menor para FM

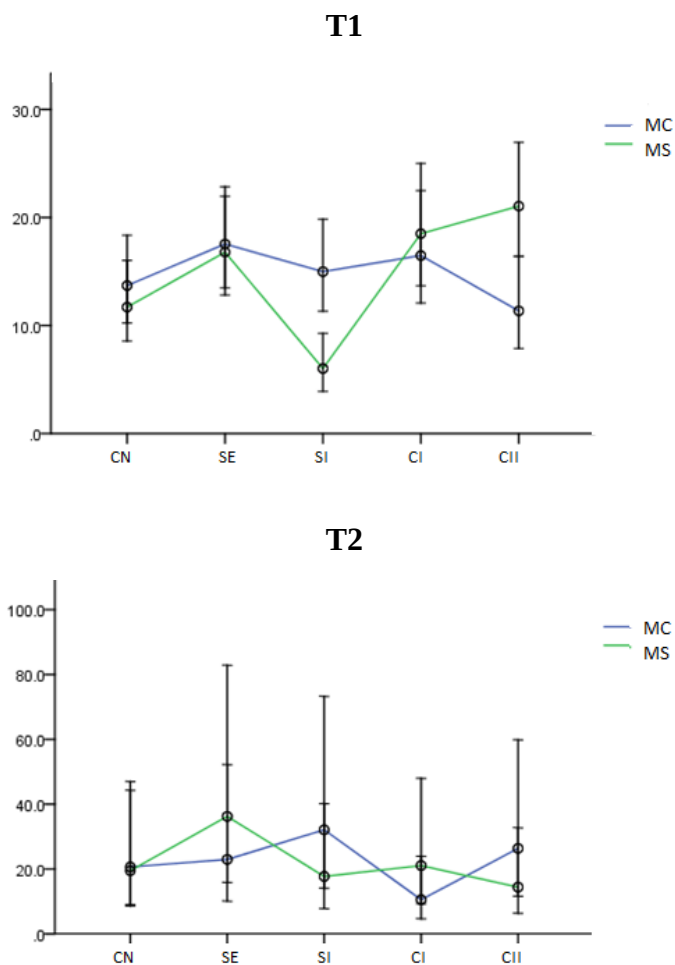
(11,111 $\pm$ 0,262). Os outros tratamentos foram semelhantes entre si não diferiram entre os manejos ($P>0,05$).

Foram observadas diferenças significativas no T1 entre os tratamentos de chuva ($F=5,260$; $P<0,001$). No, manejo convencional, MC não apresentou diferença estatística. Para FM, manejo conservacionista, o tratamento SI e CII foram estatisticamente diferente de CN. Considerando que SI obteve a menor abundancia media (11,111 $\pm$ 0,262) e CII a maior (1,497 $\pm$ 17,186). Os demais tratamentos foram semelhantes entre si.

Para o T2 também foi observada diferença significativa entre os tratamentos de chuva ($F=8,471$; $P<0,001$) e entre tratamentos x manejo ($F=12,611$; $P>0,001$). Quando comparamos os tratamentos isoladamente dentro de cada sistema podemos observar que todos diferiram estatisticamente entre MC e MS, com exceção de CN. Porém é interessante ressaltar que houve um efeito contrário entre os tratamentos: SI (9,268 $\pm$ 5,717) e CII (4,836 $\pm$ 16,262) apresentaram abundancia media menor para MC e maior para FM (SI=2,423 $\pm$ 25,322 e CII=13,501 $\pm$ 3,361) e SE (5,352 $\pm$ 9,997) e CI (5,512 $\pm$ 8,692) foi estatisticamente maiores para MS e menores para MC (SE=2,252 $\pm$ 36,062 e CI=22,145 $\pm$ 1,964).

Quando comparamos os tratamentos dentro de cada sistema em FM, SE apresentou a abundancia media diferente de CN, com o maior valor (2,252 $\pm$ 36,062), os demais tratamentos, assim como os tratamentos de MC não apresentaram diferenças estatísticas em relação a abundancia media ($P>0,05$) (Figura 2).

Figura 2 - Abundancia de esporos FMA em diferentes sistemas de usos do solo.



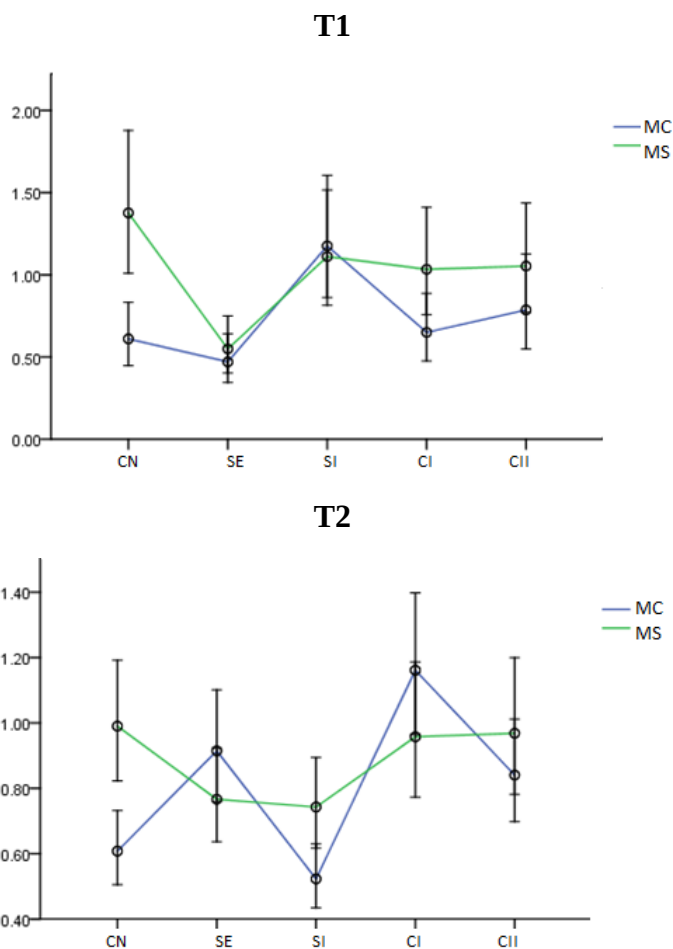
Manejo sustentável com baixa intervenção antrópica (MS) e manejo convencional com uso de maquinário agrícola e atividade pecuária (MC); Tempo 1(T1), Tempo 2(T2); Chuva Normal (CN), seca (SE), chuva intensa (CI), seca intercalada (SI), chuva intensa intercalada (CII).

Fonte: Produção do autor, 2015.

Para T1 o comprimento de micélio extrarradicular apresentou diferenças entre os tratamentos de chuva ($F=8,587$; $P<0,001$). Para FM não houve diferenças significativas na abundancia media entre os tratamentos ($P>0,05$). Para MC SE e CI aprsentaram-se diferentes de CN, SE com o menor valor ($0,437\pm0,157$) e CI como a maior quantidade de micélio ($0,237\pm0,316$). Os demais tratamentos foram semelhantes entre si ($P>0,05$).

Para T2 o comprimento de micélio extrarradicular apresentou diferenças entre os tratamentos de chuva ($F=8,587$; $P<0,001$). Para FM não houve diferenças significativas na abundancia media entre os tratamentos ($P>0,05$). Para MC SE e CI aprsentaram-se diferentes de CN, SE com o menor valor ($0,053\pm0,560$) e CI como a maior quantidade de micélio ($0,236\pm0,870$). Os demais tratamentos foram semelhantes entre si ($P>0,05$). (Figura 3).

Figura 3 - Comprimento de micélio extrarradicular total (m g^{-1}) em diferentes sistemas de usos do solo.



Manejo sustentável com baixa intervenção antrópica (MS) e manejo convencional com uso de maquinário agrícola e atividade pecuária (MC); Tempo 1(T1), Tempo 2(T2); Chuva Normal (CN), seca (SE), chuva intensa (CI), seca intercalada (SI), chuva intensa intercalada (CII).

Fonte: Produção do autor, 2015.

Discussão

Abundancia de esporos

As práticas de manejo de solo que estimulam a propagação de FMA são importantes para promover a produtividade das culturas e a própria inoculação dos fungos (KASCHUK et al., 2010), no entanto estudos sobre este organismos frente a alterações climáticas ligadas ao regime hídrico ainda são escassas, principalmente experimentos que considerem uma continuidade de eventos e o comportamento dos FMA.

Os fungos micorrízicos arbusculares são sensíveis às práticas de manejo do solo apresentando mudança de padrão de ocorrência com a alteração de ecossistemas naturais, por isso medir sua resistência frente as alterações e sua resiliência podem fornecer dados importantes sobre a ecologia destes fungos. Este estudo ainda leva em consideração dois diferentes manejos do solo um convencional, com pastejo e ação antrópica intensa e um conservacionista, tomando como premissa que o manejo sustentável do solo pode suportar os estresses gerados aos FMA com maior sucesso em relação ao convencional.

Mas é preciso considerar que mesmo assim em estudos de modo geral, observa-se maior número de esporos em áreas cultivadas quando comparadas com solos sob vegetação natural, mas a diversidade de espécies também é menor (MIRANDA et al., 2005), além do mais os constantes ciclos de preparo, plantio e colheita mantêm o solo em permanente desequilíbrio, o que desencadeia a produção de propágulos para a garantia de sobrevivência pelos FMA (CARRENHO et al., 2010) o que explica os resultados obtidos no T1, pois o manejo convencional apresentou maior abundancia de esporos em relação ao conservacionista para o tratamento de SI, que intercalava regas de 0-100 ml de solução de chuva

semanalmente, provocando constante desequilíbrio hídrico no solo.

Porém quando comparados os manejos isoladamente no T1 que submete os FMA a diferentes regimes de chuva, o manejo convencional (MC) não apresentou diferenças, indicando que os diferentes tratamentos não tiveram efeito sobre a abundancia. O manejo MC continha naturalmente menos vegetação em comparação ao FM, por isso acredita-se que devido a pouca ou ausência da comunidade vegetal, a esporulação não teve distinção entre os diferentes tratamentos, pois a simbiose foi comprometida neste caso.

No manejo conservacionista (MS) a seca intercalada (SI) apresentou menor abundancia de esporos e a chuva intensa intercalada (CII) apresentou o a maior abundancia média de esporos de FMA. Ambos os tratamentos consistiam em revezamentos semanais de quantidade de chuva artificial aplicada, o que pode sugerir que diferentes ciclos pluviométricos podem alterar a esporulação dos FMA significativamente. Considerando que MS (faltam as análises físicas, química e biológicas para confirmar) tem um solo com melhor aporte para a comunidade biológica, sugere-se que o escoamento da agua da chuva para CII foi eficiente garantindo a esporulação dos FMA, além do mais o aporte vegetal destes tratamentos pode ter contribuído para o gerenciamento hídrico. No entanto o tratamento SI obteve a menor esporulação, acredita-se o estresse hídrico provocado durante a semana que não havia rega, pode ter comprometido a comunidade vegetal e consequentemente os FMA.

No T1 foi possível observar a resistência dos FMA frente aos diferentes regimes de chuva aplicada. Os tratamentos que intercalavam chuvas com regimes extremos provocaram maior alteração nos FMA. O manejo conservacionista (MS) por ter maior aporte vegetal forneceu maior suporte aos fungos. Porém o constante estresse provocado sobre manejo convencional implicou na esporulação dos FMA, como um

fator de sobrevivência para estes organismos, pois a simbiose entre os FMA e as plantas melhora a capacidade do hospedeiro para sobreviver a estresse nutricional e hídrico (BLANKE et al., 2011; CAVAGNARO et al., 2012). Os FMA são importantes na promoção de crescimento radicular e sobrevivência da planta.

No T2 quando as condições foram normalizadas foi possível observar a resiliência do FMA, que foram contrários nos diferentes manejos. Os tratamentos que intercalavam os regimes de chuva (SI e CII) apresentaram maiores abundância para FM, enquanto que os tratamentos de seca e chuva intensa (SE e CI), com eventos climáticos extremos favoreceram a abundância em MC. É possível observar um comportamento em relação ao sistema conservacionista que fornece aos FMA melhores condições quando expostos a condições intercaladas e ao sistema convencional melhores condições sobre eventos extremos.

Como as comunidades de FMA presentes naturalmente no solo (dados ainda em fase de análise) são resistentes a estresses edáficos como os ciclos de plantio, colheita e pastejo apresentaram melhor desempenho as alterações climáticas, quando comparados o manejo conservacionista que foi mais eficiente sob condições adversas, porém inconstantes.

Comprimento de micélio

Estudos têm mostrado que o micélio extrarradicular transfere fungos água para as plantas hospedeiras sob condições de baixa umidade do solo (KHALVATI et al., 2005; LIU & CHEN, 2007; MARULANDA et al., 2003).

Não foram observadas diferenças entre os manejos em ambos os tempos de análises. O mesmo ocorreu entre os tratamentos para o manejo conservacionista (MS), o que sugere que as comunidades de FMA podem ser resistentes em relação a sua produção de hifas frente a alterações edáficas permitindo

a estes organismos se restabelecerem após determinado distúrbio (JOHNSON et al., 2013), mantendo a capacidade de colonização e consequentemente de produção de hifas fungicas. Leigh (1983); Nowak & Sigmund (2007) concluíram em seus estudos que várias espécies de fungos podem ocupar uma só raiz, mostrando a versatilidade deste grupo de organismos mesmo frente a alterações ambientais e em alguns casos baixa abundância de esporos.

O manejo convencional em ambos os tempos de análise (T1 e T2) os tratamentos extremos apresentaram maior destaque, sendo que SE como comportamento de maior produção de hifas e CI com a menor. A irrigação também tem um impacto sobre a colonização e densidade de esporos na rizosfera, demonstrando que o aumento da oferta de água teve um efeito negativo na colonização micorrízica (SCHREINER & LINDERMAN, 2005; NDIAYE et al., 2011; GARCÍA et al., 2008) , ainda é preciso considerar que os FMA são aeróbios obrigatórios e que ambientes sob condições de alagamento não favorecem o desenvolvimento destes organismos.

8.4. CONCLUSÃO

No T1 o manejo conservacionista (MS) apresentou maior esporulação dos fungos micorrízicos arbusculares;

No T2 no manejo convencional (MC) ofereceu maiores condições de produção de esporos;

O comprimento de micélio não foi alterado no sistema conservacionista (MS), sugerindo a capacidade dos FMA em manter a colonização e consequentemente a produção de hifas sob diferentes condições climáticas;

No manejo convencional (MC) os tratamentos extremos influenciaram a produções de hifas fúngicas.

REFERENCIAS

- ARONSON, J.; PEREIRA, J.S.; PAUSAS, J.G. **Cork Oak Woodlands on the Edge: Conservation, Adaptive Management and Restoration**. Island Press, New York. P 315, 2009.
- BLANKE, V., et al. **Arbuscular mycorrhizas in phosphate-polluted soil: interrelations between root colonization and nitrogen**. Plant and Soil, 343:379-392, 2011.
- BOKHORST, S., et al. **Extreme winter warming events more negatively impact small rather than large soil fauna: shift in community composition explained by traits not taxa**. Global Change Biology, 18:1152-1162, 2011.
- CARDINALE, B. J. **Effects of biodiversity on the functioning of trophic groups and ecosystems**. Nature, 443: 989–992, 2006.
- CARRENHO, R, et al. **Fungos micorrízicos arbusculares em agrossistemas brasileiros**. In: SIQUEIRA, J.O.; DE SOUZA, F.A.; CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M. Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil. Lavras: Editora UFLA, v. 1, p. 153-214, 2010.
- CARTMILL, A.D. ALARCON, A.; VALDEZ, D. **Arbuscular mycorrhizal fungi enhance tolerance of Rosa multiflora cv. Burrto bicarbonate in irrigation water**. Journal of plant Nutrition, 30:1517-1540, 2008.

CAVAGNARO, T.R.; BARRIOS-MASIAS, F.H.; JACKSON, L.E. **Arbuscular mycorrhizas and their role in plant growth, nitrogen interception and soil gas efflux in an organic production system.** *Plant and Soil*, 353:181-194, 2012.

CHAKRABORTY, S.; PANGGA, I.B.; ROPER, M.M. **Climate change and multitrophic interactions in soil: the primacy of plants and functional domains.** *Global Change Biology*, 18: 2111-2125, 2012.

COELHO, M.B., et al. **Contribution of cork oak plantations installed after 1990 in Portugal to the Kyoto commitments and to the landowners economy.** *Forest Policy and Economics*, 17:59–68, 2012.

DA SILVA, P.M., et al. **Cork oak woodlands as key-habitats for biodiversity conservation in Mediterranean landscapes: a case study using rove and ground beetles (Coleoptera: Staphylinidae, Carabidae).** *Biodiversity Conservation*, 18: 605–619, 2009.

FOLKE, C., et al. **Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management.** *Ecology, Evolution, and Systematics*. 35: 557–581, 2004.

GERDEMANN, J. W.; NICOLSON, T. H. **Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet**

sieving and decanting. Transactions of the British Mycological Society, 46:235-244, 1963.

INVAM International Collection of Vesicular-Arbuscular Mycorrhizal Fungi (Acesso 2014, 2015).

JEFFRIES, P., et al. **The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility.** Biology and Fertility of Soils, 37:1-16, 2003.

JOHNSON, N. C., et al. **Predicting community and ecosystem outcomes of mycorrhizal responses to global change.** Ecology Letters, 16:140–153, 2013.

KAPULNIK , Y.;DOUDS JR , D. D. **Root exudate of pmi tomato mutant M161 reduces AM fungal proliferation in vitro.** FEMS Microbiology Letters, 223:193-198, 2006.

KHALVATI, M.A., et al. **Quantification of water uptake by arbuscular mycorrhizal hyphae and its significance for leaf growth, water relations, and gas exchange of barley subjected to drought stress.** Plant Biology, 7:706-712, 2005.

KNACKER, T., et al. **Ring-testing and field validation of a Terrestrial Model Ecosystem (TME) - an instrument for testing potentially harmful substances: conceptual approach and studies design.** Ecotoxicology, 13:5-23, 2004.

LAMBIN, E.F.; GEIST, H.J.; LEPEERS, E. **Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions.** Annual Review of Environment and Resources. 28:205-241, 2003.

LEIGH, E.G. **When does the good of the group override the advantage of the individual.** Proceedings of the National Academy of Sciences of U. S. A. 80, 2985–2989, 1983.

LIU, R.J.; CHEN, Y.L. **Mycorrhizology** (China). Science Press, Beijing, 2007.

LUMINI, E., et al. **Disclosing arbuscular mycorrhizal fungal biodiversity in soil through a land-use gradient using a pyrosequencing approach.** Environmental Microbiology 12: 2165–2179, 2010.

MARULANDA, A.; AZCÓN, R.; RUIZ-LOZANO, J.M. **Contribution of six arbuscular mycorrhizal fungal isolates to water uptake by *Lactuca sativa* plants under drought stress.** Physiologia Plantarum, 119: 526–533, 2003.

MELLONI, R. **Quantificação de micélio extrarradicular de fungos micorrízicos arbusculares em plantas cítricas.** Piracicaba, SP, ESALQ, Dissertação (Curso de Mestrado), 1996.

MIRANDA, J. C. C.; VILELA L.; MIRANDA, L. N.

Dinâmica e contribuição da micorriza arbuscular em sistemas de produção com rotação de culturas. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 40:1005-1014, 2005.

NOWAK, M.A.; SIGMUND, K. **How populations cohere: five rules for cooperation.** In: May, R., McLean, A. (Eds.), Theoretical Ecology Principles and Applications. , 3rd ed. Oxford University Press, Oxford, UK, 2007.

PEREIRA H. **Cork: Biology, Production and Uses.** Elsevier, Lisboa. P 336, 2007.

PEREIRA, H.; BUGALHO M.N. CALDEIRA M.C. **Do sobreiro à cortiça: Um sistema sustentável.** APCOR (Associação Portuguesa de Cortiça), Lisboa. P 40, 2008.

SCHENCK, N.C.; PEREZ, Y. **Manual for identification of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi.** Gainesville, INVAM, 1998.

SIMPSON, D.; DAFT, M.J. **Spore production and mycorrhizal development in various tropical crop host infected with Glomus clarum.** Plant and Soil, Netherlands, 121:117-178, 1990.

VAN DER HEIJDEN, M.G.A.; SANDERS, I.R. **Different arbuscular mycorrhizal fungi alter coexistence and**

resource distribution between co-occurring plant. New
Phytologist, 157:569–578, 2003

VELTHORST, E.J. **Manual for chemical water analysis.**
Department of Soil Science and Geology, Agricultural
University, Wageningen, The Netherlands, 2014

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este projeto foi aprovado pela chamada pública (MCT/CNPq/MMA/MEC/CAPES/FNDCT – *Ação Transversal/FAPs Nº 47/2010*). Hoje os dados de todos trabalhos vinculados ao projeto estão disponíveis no site: <http://biotasc.com>

O projeto SISBIOTA foi desenvolvido em parceria com diversas instituições, dentre elas universidades através dos cursos de pós-graduação *strictu sensu* e unidades de pesquisa, as parcerias incluem a EMBRAPA Florestas do Paraná, Universidade Federal do Paraná, Universidade Regional de Blumenau (FURB), Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) envolvendo os campi de Chapecó (UDESC/CEO) e Santa Teresinha do Salto (UDESC/CAV), a Universidade de Coimbra através do Prof. José Paulo de Sousa, Université de Rouen, através do Prof. Thibaud Decaens, Iowa University através do Prof. Samuel W. James, Universidade de São Paulo (USP/CENA) através da Prof. Siu Mui Tsai e contou com o apoio financeiro da Fundação de Amparo a Pesquisa de Santa Catarina (FAPESC), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

De modo geral o Projeto SISBIOTA incursionou as pesquisas abordando de uma forma holística o levantamento da biodiversidade em todo o Estado de Santa Catarina em regiões estrategicamente selecionadas a fim de trazer um levantamento geral e completo dos atributos químicos, físicos e biológicos em cinco sistemas de uso do solo.

Para os atributos biológicos procedeu-se o levantamento da Macro e Mesofauna edáfica, análise qualitativa de Oligochaetas terrestres, fungos micorrízicos arbusculares (FMA) e indicadores de atividade microbiológica (Carbono da Biomassa Microbiana, Respiração Basal) em 12 cidades compreendendo as regiões Oeste (Chapecó, Xanxerê e São

Miguel do Oeste) Planalto Catarinense (Santa Terezinha do Salto, Campo Belo do Sul e Otacílio Costa) Sul (Orleans, Lauro Muller e Siderópolis) Leste (Joinville, Blumenau e Timbó) em 5 Sistemas de Uso do Solo distintos, Floresta Nativa (FN); Reflorestamento de Eucalipto (RE); Pastagem (PA); Integração Lavoura-Pecuária (ILP) e Plantio Direto (PD).

Incluindo a parceria deste projeto com a Universidade de Coimbra-Portugal. Os estudos com alterações climáticas e FMA foram realizados através do doutoramento sanduiche (2014/2015) PDSE/CAPES (Portaria 69/ Processo 99999.014610/2013-02): Diversidade estrutural e funcional de fungos micorrizicos arbusculares em cenários contrastantes de uso do solo e clima.

A mais de 70 anos os FMA são instrumento de estudos acadêmicos e sua importância ecológica vem sendo confirmada ano após ano em diferentes ecossistemas, áreas agrícolas, degradadas e preservadas. Apesar da ecologia destes fungos serem amplamente exploradas, existem muitas lacunas a serem preenchidas, junto com isto ainda existe a ação antrópica que vem alterando bruscamente a paisagem e os ciclos ecológicos de todo o planeta, tornando estudos de ecologia, funcionalidade e preservação da biota mais urgentes. A biota do solo ainda constitui uma caixa preta perto da diversidade e funcionalidade real, mas a importância para o equilíbrio, manutenção e funcionamento do ecossistema não é mais motivo de dúvidas. Por isso entender a distribuição e os fatores ambientais que afetam as comunidades de FMA é de extrema importância para manejo ecológico das espécies.

Estudos em todo mundo já comprovaram a existência de alta atividade, além da contribuição em nível de nutrição vegetal e estrutura do solo dos FMA. Portanto apesar da comunidade fúngica sofrer alterações, mesmo em um sistema agressivo onde há revolvimento do solo, expondo as hifas e danificando os propágulos infectivos, por exemplo. Os FMA, mesmo sofrendo consequências com a redução da sua

diversidade, persistem e tem importância na dinâmica deste ambiente.

Ainda que muitos estudos que cobrem pequenas áreas e não levam em consideração a distribuição geográfica tem provado intensivamente que os diferentes sistemas agrícolas, florestais, pastoris e extrativistas influenciam de forma significativa a riqueza e a atividade da comunidade de FMA. Porém devido a ampla gama de fatores envolvidos, muitas vezes é difícil encontrar um padrão em nível de família, espécie de FMA e espécies vegetais. Por isso os estudos biogeográficos podem preencher uma importante lacuna na ecologia dos FMA. Além do mais, no cenário atual a preocupação com a escassez e administração de recursos ambientais exige que áreas a serem exploradas, protegidas e recuperadas, por exemplo, sejam cuidadosamente escolhidas para a busca de um desenvolvimento sustentável.

É preciso caracterizar estas alterações, bem como o comportamento dos FMA para que o manejo das comunidades nativas seja eficiente, para que a conservação de recursos naturais seja aliada a com a produtividade.

