**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Atributos biológicos como indicadores de qualidade do solo em Floresta de
Araucária nativa e reflorestada no Estado de São Paulo**

Jamil de Moraes Pereira

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Microbiologia Agrícola

**Piracicaba
2012**

Jamil de Moraes Pereira
Engenheiro Agrônomo

**Atributos biológicos como indicadores de qualidade do solo em Floresta de Araucária
nativa e reflorestada no Estado de São Paulo**

Orientadora:
Profa. Dra. **ELKE JURANDY BRAN NOGUEIRA CARDOSO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Microbiologia Agrícola

Piracicaba
2012

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Pereira, Jamil de Moraes

Atributos biológicos como indicadores de qualidade do solo em Floresta de
Araucária nativa e reflorestada no Estado de São Paulo / Jamil de Moraes Pereira. -
Piracicaba, 2012.

137 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Análise multivariada 2. Biologia do solo 3. Fauna edáfica 4. Física do solo
5. Fungos micorrízicos 6. Microbiologia do solo 7. Química do solo I. Título

CDD 634.9751
P436a

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

“Digno és, Senhor, de receber glória, e honra, e poder; porque tu criaste todas as coisas, e por tua vontade são e foram criadas.” Apoc. 4:11

“Bem aventuradas as micorrizas arbusculares (MAs) porque delas é o reino vegetal”

Jamil de Moraes Pereira (2012)

A **Deus**, pela criação e sustentação de toda forma de vida, que me tem assistido com misericórdia e graça.

Aos meus pais, Júlio e Osória, cujas mãos sustentaram meu corpo e cujas orientações de vida definiram meu caráter.

À Verônica, maravilhosa esposa, à Ana Carolina e ao Samuel, preciosos filhos, pela compreensão da minha ausência e companheirismo nesses últimos três anos.

Aos meus irmãos Jairo, Nelma, Josafá, Jardel, Jânio, Neli, José, Jorge e Jean pela consideração e apoio no aprendizado de vida com que a infância e juventude, com requintes de travessuras e desafios, nos enriqueceram.

AGRADEÇO

À Verônica, minha esposa, e aos filhos Ana Carolina e Samuel

DEDICO

AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus, pela graça de desfrutar de uma natureza maravilhosa, embora muito frágil e passageira, mesmo não compreendendo a grandeza e a generosidade de seus benefícios naturais no dia a dia.
- À minha orientadora, Dra. Elke Jurandy Bran Nogueira Cardoso, pela oportunidade de retornar aos estudos e sob cuja orientação, ensinamentos, apoio, compreensão, paciência, amizade e colaboração se desenvolveu essa pesquisa.
- Ao Dr. Dilmar Baretta pela confiança, co-orientação, amizade, companheirismo, leitura criteriosa e correção deste trabalho.
- Ao Coordenador do PPG-Microbiologia Agrícola, Dr. Marcio Rodrigues Lambais pela oportunidade, compreensão, apoio e amizade.
- Ao Dr. Sidney Stürmer (Universidade Regional de Blumenau) e Denise Mescolotti (ESALQ/USP), pela colaboração na identificação dos esporos de FMA.
- Aos Drs. George Gardner Brown (Embrapa/Floresta), Samuel W. James (University of Kansas), Antonio D. Brescovit (Instituto Butantan), Luiz Carlos Rocha (Instituto Federal de Ensino Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Campus Inconfidentes), Marie L.C. Bartz (UDESC-CEO-CHAPECO) pela colaboração na identificação dos grupos Oligochaeta, Aracnida e Artrópodes em geral.
- Aos técnicos da ESALQ, Denise Mescolotti, Luis Fernando Baldesin, Jair, Luis Silva e Wladimir Rosignolo pelo auxílio nas análises laboratoriais, companheirismo e amizade.
- Aos professores (as) Carlos E.P. Cerri, Siu Mui Tsai, Marli de F. Fiore, Brigitte J. Feigl, Godofredo C. Vitti e Fernando D. Andreote pelo ensino, colaboração, convívio e amizade.
- Aos professores (as) Kátia R. F. S. Estrada (UEM), Sueli S. Freitas (IAC), Daison O. Silva (UFV), José Cambraia (UFV) (em especial), Maria C. M. Kasuya (UFV), Rosa M.C.

Muchovej (UFV), entre outros não menos importantes, pelos ensinamentos, convívio agradável e amizade.

- Aos colegas Thiago Gumiere, Fábio Shiraishi, Sara Hirata, Leandro Mescolotti e Dorival Grisotto, pela colaboração na coleta de solo e fauna.

- Aos responsáveis pelos locais de coleta: José Roberto A. Suarez e Egnaldo Rocha (Estação ecológica de Bananal); Ananias de A. S. Pontinha e Soeli A.F. Gera (Estação experimental de Itapeva); Juarez Ferreira e Moacir G. dos Santos (Estação ecológica de Itaberá); Fábio L. Tomas e Francisco (Parque Estadual do Alto Ribeira); Pedrina D. Conceição (Área particular em Barra do Chapéu).

- À Comissão Técnico Científica (COTEC), Instituto Florestal e Secretaria de Meio Ambiente de São Paulo pela autorização para realização de coleta nas estações ecológicas.

- Aos colegas do laboratório de microbiologia do solo (ESALQ/USP): Ademir Adurrer, André Nakatani; Alexandre Martines, Aline Figueiredo, Alessandra Monteiro, Carlos Ribeiro, Cristiane Alcantara, Daniel Lammel, Daniela Ceconello, Daniela Gonçalves, Diogo Paes, Emiliana Romagnoli, Fabio Shiraishi, German Estrada, Gustavo Lanza, Joice Bonfim, Joshua Halsen, Júlia Wayego, Júlia Lima, Júlia Cassiano, Júlia Segat, Letícia Cabral, Marina Horta, Mylenne Silva, Paulo Roger, Patrícia Sanches, Pilar Mariane, Priscila Azevedo, Rafael Valadares, Simone Bertini, Thiago Gumiere, e, especialmente a Rafael Vasconcellos e Daniel Bini pela colaboração na análise estatística.

- Aos colegas do laboratório de Microbiologia Molecular (ESALQ/USP): Adriano Lucheta, Alice Cacetari, Elisa Matos, Éder Santos, Gisele Nunes, Gisele Monteiro, Kelly Justin, Rafael Armas, Sandra Montenegro, Silvia Berdugo, Vívian Carvalho e Winston Ruiz.

- Aos colegas Sérgio Homma, Oriel Kolln, Paulo Roger, Marina Gumiere, Felipe, André, Alexandre Martinez e Raphael Beirigo pelo apoio, consideração e convívio agradável.

- Aos irmãos da Igreja Presbiteriana Independente de Ouro Fino-MG pelo incentivo, compreensão e apoio espiritual, e, em especial a Vanda Batista Gomes pelas correções de português.
- Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais (Campus Inconfidentes) pelas condições oferecidas para realização do curso de doutorado.
- Ao Programa de Pós-Graduação em Microbiologia Agrícola da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo pela oportunidade de realização do curso de doutorado.
- À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pela aprovação do auxílio financeiro ao projeto “Biodiversidade da Macrofauna Edáfica e Outras Variáveis Explicativas como Indicadores de Qualidade do Solo em Florestas de Araucária” processo número 2007/06981-2.
- A todos os familiares, amigos e àqueles que, em quaisquer manifestações de companheirismo e apreço, auxiliaram na realização deste trabalho, meus agradecimentos.

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 A Floresta de Araucária: um bioma rico em biodiversidade	15
1.2 Macrofauna do solo.....	16
1.3 Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA).....	18
1.4 Indicadores de qualidade do solo	21
Referências	25
2 MACROFAUNA EDÁFICA COMO INDICADORA DE QUALIDADE DO SOLO EM FLORESTA DE <i>Araucaria angustifolia</i> NATIVA E REFLORESTADA NO ESTADO DE SÃO PAULO	33
Resumo.....	33
Abstract.....	34
2.1 Introdução	34
2.2 Desenvolvimento	36
2.2.1 Material e Métodos	36
2.2.1.1 Descrição das áreas de estudo	36
2.2.1.2 Descrição do solo nos locais de estudo.....	45
2.2.1.3 Avaliação da macrofauna do solo.....	46
2.2.1.4 Determinação da matéria seca da serapilheira e C, N e S	47
2.2.1.5 Determinação dos atributos físico-químicos do solo	47
2.2.1.6 Carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal do solo (C-CO ₂) e atividade da enzima desidrogenase (Desi).....	48
2.2.1.7 Análise estatística	49
2.2.2 Resultados e Discussão.....	50
2.2.2.1 Densidade total da macrofauna do solo	50
2.2.2.2 Riqueza de grupos da macrofauna do solo e índices de diversidade ..	52
2.2.2.3 Análise de Componentes Principais (ACP)	54
2.2.2.4 Análise Canônica Discriminante (ACD)	60
2.2.2.5 Diversidade de minhocas	65
2.3 Considerações Finais.....	68
Referências	69
3 DIVERSIDADE DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EM FLORESTA DE <i>Araucaria angustifolia</i> NATIVA E REFLORESTADA NO ESTADO DE SÃO PAULO	77
Resumo.....	77
Abstract.....	77

3.1 Introdução	78
3.2 Desenvolvimento	80
3.2.1 Material e Métodos.....	80
3.2.1.1 Descrição das áreas de estudo.....	80
3.2.1.2 Avaliação dos atributos físico-químicos do solo, da serapilheira e FMA	83
3.2.1.3 Determinação da matéria seca da serapilheira e C, N e S	84
3.2.1.4 Determinação da percentagem de colonização radicular	84
3.2.1.4 Análise estatística	85
3.2.2 Resultados e Discussão	86
3.2.2.1 Análise de Componentes Principais (ACP)	94
3.3 Conclusões	96
Referências	97
4 RELAÇÃO ENTRE ATIVIDADE MICROBIANA E ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS DO SOLO EM FLORESTA DE <i>Araucaria angustifolia</i> NATIVA E REFLORESTADA NO ESTADO DE SÃO PAULO	103
Resumo	103
Abstract	104
4.1 Introdução	104
4.2 Desenvolvimento	107
4.2.1 Material e Métodos.....	107
4.2.1.1 Descrição das áreas de estudo.....	107
4.2.1.2 Avaliação dos atributos microbiológicos, químicos e físicos do solo	109
4.2.1.3 Carbono da biomassa microbiana, respiração basal do solo e atividade da desidrogenase (Desi)	110
4.2.1.4 Determinação da matéria seca da serapilheira e C, N e S	110
4.2.1.5 Determinação dos atributos físico-químicos do solo	110
4.2.1.6 Análise estatística	110
4.2.2 Resultados e Discussão	111
4.2.2.1 Atributos físicos, químicos e microbiológicos	111
4.2.2.2 Análise de Correlação Canônica (ACC)	118
4.2.2.3 Análise Canônica Discriminante (ACD)	121
4.3 Conclusões	126
Referências	127
ANEXOS	133

RESUMO

Atributos biológicos como indicadores de qualidade do solo em Floresta com Araucária nativa e reflorestada no Estado de São Paulo

A conservação da biodiversidade edáfica na Floresta Ombrófila Mista favorece os processos de decomposição e ciclagem de nutrientes, melhorando as propriedades físico-químicas e biológicas do solo. O objetivo deste trabalho foi verificar o potencial dos atributos da macrofauna edáfica, Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA) e de variáveis ambientais explicativas (físico-químicas e microbiológicas) como indicadores de qualidade do solo em duas épocas contrastantes (inverno e verão) em Floresta de Araucária do Estado de São Paulo. Foram avaliadas florestas com *Araucaria angustifolia* nativa (NF) e reflorestada (RF) em três regiões distintas do Estado de São Paulo. Cada floresta teve três repetições verdadeiras, nas quais, foram coletadas, ao acaso, quinze amostras de solo para avaliação dos atributos físicos (densidade, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e umidade), químicos [pH, teores de carbono orgânico (C-org), P, Ca, Mg, K, Al e H+Al] e biológicos [macrofauna, FMA, carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal, quociente metabólico (qCO_2) e atividade da desidrogenase (Desi)]. Nos mesmos pontos de amostragem, foram avaliadas a macrofauna edáfica, a densidade de FMA e a colonização micorrízica em raízes de araucária. Na serapilheira foi avaliada a massa seca (MSS) e foram determinados os teores de C, N e S. Os atributos físico-químicos e microbiológicos do solo e químicos da serapilheira foram submetidos à análise de variância (Two-way ANOVA). A abundância da macrofauna e de espécies de minhocas foram submetidas à Análise de Componentes Principais (ACP) e as variáveis microbiológicas, MSS, físico-químicas do solo e da serapilheira foram usadas como variáveis explicativas (VE). A abundância de espécies de FMA foi submetida à ACP e as variáveis físico-químicas do solo e da serapilheira foram usadas como VE. Adicionalmente, a abundância da macrofauna e as VE foram submetidas à Análise Canônica Discriminante (ACD) e a uma Análise de Correlação Canônica (ACC). A macrofauna apresentou maior riqueza de grupos no verão, sendo que a NF proporcionou a maior diversidade de grupos. A umidade, porosidade total, teor de S na serapilheira, pH, teor de K, CBM e respiração basal foram os atributos edáficos mais importantes para separar as áreas. O grupo Oligochaeta, principalmente as espécies *Ponchoscolex corethrurus* e *Amyntas* spp., foram boas indicadoras de qualidade do solo e/ou de distúrbio na Floresta de Araucária. Encontraram-se 36 táxons de FMA, sendo os gêneros *Glomus*, *Acaulospora* e *Scutellospora* os mais abundantes. A espécie *Ambispora appendicula* apresentou a maior abundância relativa. No inverno, observou-se alta correlação da Desi e C-CO₂ com pH e H+Al, enquanto que no verão, o C-org, umidade, Mg, pH e C da serapilheira se correlacionaram com a atividade da Desi e C-CO₂. Os atributos H+Al, P, porosidade total, S da serapilheira e umidade do solo foram os mais importantes na separação das áreas, independente de épocas de coleta.

Palavras-chave: Macrofauna edáfica; Fungos micorrízicos arbusculares; Atributos microbiológicos do solo; Bioindicadores; Análise multivariada; Biologia do solo; Floresta Ombrófila Mista; Atributos físicos do solo; Atributos químicos do solo

ABSTRACT

Biological attributes as soil quality indicators in Foresty with native *Araucaria* and reforestation in São Paulo State

The conservation of edaphic biodiversity in *Araucaria* Forests favors the processes of decomposition and nutrient cycling, improving the physico-chemical and biological soil properties. The objective of this study was to investigate the potential of the macrofauna, mycorrhizal fungi (AMF) and environmental explanatory variables (physico, chemical and microbiological) as indicators of soil quality in two different contrasting seasons (winter and summer) in *Araucaria* Forests. We evaluated forests with native *Araucaria angustifolia* (NF) and reforested areas (RF) in three different regions in the State of São Paulo. Each forest had three true replicates, in which we collected at random, fifteen soil samples for evaluation of physical attributes (density, macroporosity, microporosity, total porosity and moisture), chemical attributes [pH, organic carbon (org-C), P, Ca, Mg, K, Al and H+Al] and biological attributes [macrofauna, AMF, microbial biomass carbon (MBC), basal respiration (CO₂-C), metabolic quotient (*q*CO₂) and dehydrogenase activity (Desi)]. At the same sampling points we evaluated the edaphic macrofauna, the density of AMF and root colonization in *Araucaria*. We evaluated the litter dry matter (MSS) and analyzed the contents of C, N and S. The physico-chemical and microbiological soil attributes and the chemical litter attributes were submitted to analysis of variance (Two-way ANOVA). The abundance of macrofauna and of earthworm species were submitted to a Principal Components Analysis (PCA) and the microbiological variables, litter dry weight, physico-chemical attributes of soil and litter were used as explanatory variables (EV). The abundance of AMF species was submitted to the PCA and the physico-chemical variables of soil and litter were used as EV. Additionally, the abundance of macrofauna and EV were submitted to a Canonical Discriminant Analysis (CDA) and to one Canonical Correlation Analysis (CCA). The macrofauna showed greater richness of groups in the summer, and the NF provided the highest diversity. Moisture, total porosity, S litter content, pH, K, MBC and basal respiration were the edaphic attributes most important to separate the areas. The group Oligochaeta, especially the species *Ponthoscolex corethrurus* and *Amyntas* spp., were good indicators of soil quality and/or disturbance in these *Araucaria* forests. We found 35 AMF taxons, and the genera *Glomus*, *Acaulospora* and *Scutellospora* were the most abundant. The species *Ambispora appendicula* showed the highest relative abundance. In winter, a high correlation of the microbiological attributes Desi and CO₂-C with pH and H+Al was found, while in the summer, the org-C, moisture, Mg, pH and Carbon of the litter were more correlated with Desi activity and C-CO₂. The attributes H+Al, P, total porosity, S of the litter and soil moisture were the most important attributes to discriminate the areas, regardless of the season.

Keywords: Soil macrofauna; Arbuscular mycorrhizal fungi; Soil microbiological attributes; Bioindicators; Multivariate analysis; Soil biology; Soil physical attributes; Soil chemical attributes

1 INTRODUÇÃO

1.1 A Floresta de Araucária: um bioma rico em biodiversidade

A *Araucaria angustifolia* é uma espécie típica da Floresta Ombrófila Mista e predominante na paisagem das regiões sul e sudeste, principalmente nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, embora com formações esparsas dessa floresta no sudeste e nordeste de São Paulo, no sudoeste do Rio de Janeiro e no sudeste de Minas Gerais (REITZ et al., 1983; VELOSO et al., 1991; RIBEIRO et al., 2009).

A intensa exploração da *Araucaria angustifolia*, devido ao seu alto valor sócio-econômico (madeira e resina) e alimentar “pinhão”, resultou na redução de sua área que, originalmente, ocupou cerca de 253.000 km² e, atualmente, cobre apenas 12,6% (32.021 km²), sendo que 981 km² estão em área de preservação permanente, o que corresponde a 0,39% da área original da floresta (RIBEIRO et al., 2009).

A crescente demanda da indústria madeireira, por matéria prima, vem impulsionando as atividades florestais e, conseqüentemente, a conversão de florestas naturais em plantios de espécies exóticas, especialmente do gênero *Pinus*, que passaram a ocupar grande parte das áreas anteriormente cobertas com araucárias (GUERRA et al., 2002). Em 2007, apesar de a área de reflorestamento no Brasil ter alcançado seis milhões de hectares, apenas 17.500 hectares foram plantados com *Araucaria angustifolia* (SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA, 2008).

No Estado de São Paulo, a floresta com araucária se encontra bastante fragmentada, totalizando cerca de 174.000 ha, o que é inferior a 4 % de sua área original (MANTOVANI et al., 2004; KRONKA et al., 2005), tornando esse ecossistema crítico em termos de conservação de sua biodiversidade (BARETTA et al., 2007; RIBEIRO et al., 2009; SANTOS; IVANAUSKAS, 2010) e ocasionando a inclusão da *Araucaria angustifolia* em lista de espécies em extinção na categoria “vulnerável” (FARJON, 2006). Assim, atualmente, o que predomina são matas secundárias, já parcialmente exploradas, em relação às matas primárias encontradas apenas em formações esparsas em região de Mata Atlântica (SOUZA, 2008; RIBEIRO et al., 2009; SANTOS et al., 2009; SANTOS; IVANAUSKAS, 2010).

A Floresta de Araucária, por concentrar alta diversidade de organismos edáficos, tais como invertebrados de solo (MERLIM, 2005; BARETTA et al., 2010), fungos micorrízicos arbusculares (MOREIRA et al., 2009) e bactérias diazotróficas (NERONI; CARDOSO, 2007) representa uma importante reserva biológica para a conservação da biodiversidade (FONSECA

et al., 2009). No entanto, a intervenção antrópica, em Floresta de Araucária, provoca alterações nesse ecossistema, afetando a qualidade do solo, o que geralmente leva ao desaparecimento de espécies endêmicas e ao aparecimento de espécies invasoras (DUARTE, 2004; BARETTA, 2007). Ainda assim, são poucos os estudos envolvendo a biodiversidade de invertebrados, de fungos micorrízicos arbusculares e suas relações com os atributos físicos, químicos e microbiológicos do solo, no ambiente de Mata Atlântica, principalmente em áreas de floresta nativa e reflorestada com *Araucaria angustifolia* em diferentes regiões do estado de São Paulo.

1.2 Macrofauna do solo

O solo sob florestas tropicais, de maneira geral, é bastante intemperizado e de baixa fertilidade natural, destacando a matéria orgânica do solo (MOS) como a principal fonte de alimento para a fauna edáfica e de nutrientes para a produção primária (CORREIA; OLIVEIRA, 2000). Neste sentido, em Florestas de Araucária, a permanente cobertura vegetal do solo responde pela principal fonte de resíduos orgânicos utilizados no processo de formação da MOS, servindo também de alimento e habitat para a maioria dos organismos da fauna edáfica, além de permitir uma menor oscilação de temperatura, manter a umidade do solo e proteger os organismos do solo mais sensíveis à falta de umidade (CORREIA; ANDRADE 2008).

A decomposição dos resíduos orgânicos é um processo biológico dirigido principalmente pela ação de micro-organismos atuando em sinergismo com os organismos da fauna invertebrada do solo (LAVELLE; SPAIN 2001). Nesse processo, os diversos organismos da macrofauna atuam de forma dinâmica e conjunta, no qual trituram, ingerem e redistribuem a MOS na superfície e perfil do solo, criando melhores condições para uma decomposição mais eficiente pela comunidade microbiana do solo (MOREIRA et al., 2010).

Neste sentido, uma comunidade de invertebrados edáficos mais abundante e diversa pode melhor contribuir em processos importantes que aumentam a fertilidade do solo, nos ecossistemas florestais, porque a sua atividade no solo e na serapilheira, além de acelerar o processo de decomposição da MOS e ciclagem de nutrientes, altera as propriedades físico-químicas do solo, proporcionando melhores condições de aeração e infiltração de água, favorecendo o crescimento radicular e a absorção de nutrientes pelas plantas, fundamentais à manutenção da produtividade primária (LAVELLE; SPAIN, 2001; BARETTA et al., 2011).

Os organismos da macrofauna do solo consistem de invertebrados que são visíveis a olho nu, cujo diâmetro do corpo geralmente é maior que 2 mm ou 1 cm de comprimento e que

vivem dentro do solo ou na sua superfície (serapilheira, troncos podres) ou que passam uma importante fase de seu ciclo de vida sobre ou dentro do solo (CORREIA; OLIVEIRA, 2000; BROWN et al., 2009; BARETTA et al., 2011).

Os macroinvertebrados edáficos são os mais conhecidos e estudados, sendo encontrados mais de 20 grupos taxonômicos, tais como: formigas (Hymenoptera: Formicidae), cupins (Isoptera), besouros (Coleoptera), minhocas (Oligochaeta), aranhas (Araneae), piolhos-de-cobra ou milipeias (Diplopoda), centopeias ou lacraias (Chilopoda), grilos (Orthoptera), opiliões (Opiliones), baratas (Blattodea), tatuzinhos (Isopoda), larvas de dípteros (Diptera), percevejos (Hemiptera), cigarras (Homoptera), pseudo-escorpiões (Pseudoscorpiones), escorpiões (Scorpiones), caracóis e lesmas (Gastropoda), entre outros (LAVELLE; SPAIN, 2001; BROWN et al., 2009; MOREIRA et al., 2010; BARETTA et al., 2011).

De acordo com a função que desempenham nos ecossistemas terrestres, os macroinvertebrados edáficos podem ser divididos em: **detritívoros** (transformadores de serapilheira) que fragmentam o material vegetal ou animal e podem regular a ação de micro-organismos, sendo representados por milipeias (Diplopoda), tatuzinhos (Isopoda) e minhocas anécicas e endogeicas (Oligochaeta), entre outros; **geófagos**, aqueles que se alimentam de quantidades de húmus e de solo mineral, como é o caso de cupins humívoros (Isoptera), e minhocas endogeicas (Oligochaeta), entre outros grupos como colêmbolos (Collembola) e enquitreídeos (Enchytraeidae), pertencentes à mesofauna do solo; **predadores**, aqueles que se alimentam de indivíduos vivos (presas) e mantêm o equilíbrio biológico, sendo os mais comuns as aranhas (Araneae), os escorpiões (Scorpiones), os pseudo-escorpiões (Pseudoscorpiones) e as centopeias (Chilopoda). Finalmente os **onívoros**, que se alimentam de fonte variada de alimento, representados por grilos (Orthoptera), larvas de insetos (Diptera), formigas (Hymenoptera: Formicidae), cupins (Isoptera), besouros (Coleoptera) e cigarras (Homoptera) todos muito importantes em processos ecológicos do solo (CORREIA; OLIVEIRA, 2000; LAVELLE; SPAIN, 2001; BROWN et al., 2009).

Admite-se que alterações nos ecossistemas florestais, seja por meio de intervenções naturais e/ou antrópicas, podem provocar desequilíbrio na comunidade de macroinvertebrados edáficos, inclusive em florestas com araucárias, influenciando sua abundância e diversidade, causando, até mesmo, o desaparecimento de espécies endêmicas (DECAËNS et al., 2004; MERLIM, 2005; BARETTA et al., 2007).

Neste sentido, a abundância e diversidade da comunidade de macroinvertebrados edáficos e/ou a presença de grupos específicos, como as minhocas, por exemplo, podem ser utilizadas para caracterizar um determinado ecossistema, como é o caso de florestas naturais

com araucária e reflorestamento dessa espécie, bem como monitorar sua resposta às mudanças impostas pela intervenção antrópica (BARETTA et al., 2007; BROWN et al., 2009).

A utilização de grupos de macroinvertebrados edáficos na caracterização de diferentes ecossistemas naturais e agroecossistemas, bem como sua separação de acordo com o tipo de manejo e estado de conservação, indicando qualidade do solo e/ou ambiental, vem se consolidando, aos poucos, nos trabalhos de pesquisa (PAOLETTI et al., 1999; MOÇO et al., 2005; ANTUNES et al., 2008; AQUINO et al., 2008; BROWN et al., 2009; BARETTA et al., 2010).

1.3 Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA)

Nas áreas de Mata Atlântica, onde já ocorreu uma intensa exploração da araucária e, mesmo após a implantação de reflorestamentos dessa espécie, fica evidente a redução da cobertura do solo e o desequilíbrio entre o uso de seus recursos e a reposição dos mesmos, limitando a capacidade produtiva do solo. No entanto, à medida que ocorre a revegetação do solo e, conseqüentemente, o aumento de aporte de resíduos orgânicos à superfície, incorporação de carbono e ciclagem de nutrientes, atinge-se um novo equilíbrio, além da reorganização da cadeia trófica, da regulação térmica e hídrica e do estabelecimento de um novo habitat para animais e micro-organismos do solo.

Nesse contexto, a recuperação da cobertura vegetal em geral e, especificamente, o desenvolvimento das araucárias em reflorestamento, vão tornando o ecossistema mais sustentável, embora exija, entre outros aspectos, a utilização mais eficiente dos nutrientes minerais do solo pelas plantas, principalmente as emergentes, o que pode ser facilitado pela presença, no solo, de espécies de fungos micorrízicos associados às suas raízes formando as “bem aventuradas” associações micorrízicas.

Dentre as associações micorrízicas existentes, a simbiótica mutualística denominada de micorriza arbuscular (MA) é a mais frequente nos ecossistemas naturais e agroecossistemas (STÜRMER; SIQUEIRA, 2008; CARRENHO et al., 2010; ZANGARO; MOREIRA, 2010) e, praticamente mais de 80% das famílias de plantas vasculares são capazes de desenvolver essas estruturas quando associadas a fungos micorrízicos arbusculares (FMA) (SIQUEIRA, 1994; SMITH; READ, 2008), inclusive com *Araucaria angustifolia* (MUCHOVEJ et al., 1992; BREUNINGER et al., 2000; MOREIRA-SOUZA; CARDOSO, 2002; MOREIRA-SOUZA et al., 2003; MOREIRA et al., 2007, 2009; ZANGARO; MOREIRA, 2010).

Os FMA apresentam baixa especificidade de hospedeiros, ou seja, são capazes de colonizar diferentes espécies de plantas (McGONIGLE; FILTER, 1990) e podem influenciar sua diversidade e produtividade (VAN der HEIJDEN et al., 1998, 2008), principalmente porque aumentam sua absorção de nutrientes do solo tornando-as mais competitivas, especialmente em ambiente sob estresse de natureza biótica e abiótica (SMITH; BARKER, 2002; CHEN et al., 2005; CARDOSO et al., 2010). A maior facilidade de absorção de nutrientes do solo pelas plantas colonizadas por FMA, principalmente os pouco móveis, deve-se especialmente ao maior volume de solo explorado pela rede de hifas associadas ao sistema radicular, além do incremento de sítios de absorção, principalmente para o P, um elemento bastante crítico em solos de ecossistemas florestais tropicais e limitante para as plantas (SILVEIRA, 1992; SMITH; READ 2008; CARDOSO et al., 2010).

Outra importante contribuição da associação micorrízica para o solo de ecossistemas florestais está relacionada à melhoria de sua propriedade física, uma vez que o micélio extraradicular promove a agregação de partículas do solo (CARDOSO; KUYPER, 2006), além da síntese e exsudação de glicoproteínas hidrofóbicas (Glomalinas) envolvidas na cimentação dessas partículas (RILLIG, 2004; RILLIG et al., 2010), aumento do estoque de carbono (alta estabilidade) e, conseqüentemente, melhoria da qualidade do solo e produtividade biológica (RILLIG et al., 2001; PURIN; RILLIG, 2007).

A capacidade de formar MA é restrita a um grupo diverso de fungos denominados de glomeromicetos (GOTO; MAIA, 2006), os quais são biotróficos obrigatórios e pertencentes ao filo Glomeromycota, que consiste em 4 ordens, 13 famílias, 19 gêneros e apenas pouco mais de 217 espécies descritas (Tabela 1.1). A baixa riqueza de espécies de glomeromicetos tem intrigado os pesquisadores que, por hora, é explicada pela aparente ausência de especificidade hospedeira destes fungos, além do seu modo de reprodução clonal, indicando que os mesmos possam apresentar elevada redundância funcional nos ecossistemas.

Por outro lado, Bever et al. (2001) relataram que foi possível identificar apenas 11 espécies de FMA em amostras de solo proveniente de campo agrícola, mantido como pastagem por 60 anos. Entretanto, após um período de cinco anos de amostragens e tentativas de isolamento de FMA em culturas armadilhas, o número de espécies aumentou para 37. Este resultado sugere que, em estudos envolvendo diversidade de FMA, é evidente a necessidade de amostragens de solo, em mais de uma época, além do uso de repetições verdadeiras do sistema avaliado, o que aumenta a possibilidade do isolamento de maior riqueza de FMA.

Tabela 1.1 - Classificação taxonômica atual do filo Glomeromycota segundo ordens, famílias, gêneros e número de espécies descritas por gênero e reportadas no Brasil (Adaptado de DE SOUZA et al., 2010)

Ordem	Família	Gênero ¹	Número de Espécies Descritas	Nomenclatura Anterior
<i>Archaeosporales</i>	<i>Archaeosporaceae</i>	<i>Archaeospora</i>	1 / 1*	<i>Acaulospora</i>
		<i>Intraspora</i>	1 / 1	<i>Entrophospora</i>
	<i>Ambisporaceae</i>	<i>Ambispora</i>	8 / 5	<i>Acaulospora</i> , <i>Archaeospora</i> e <i>Appendicispora</i>
	<i>Geosiphonaceae</i>	<i>Geosiphon</i>	1 / 0	
<i>Diversisporales</i>	<i>Acaulosporaceae</i>	<i>Acaulospora</i>	34 / 22	
		<i>Kuklospora</i>	2 / 2	<i>Entrophospora</i>
	<i>Diversisporaceae</i>	<i>Diversispora</i>	2 / 1	<i>Glomus</i>
		<i>Otopora</i>	1 / 0	
	<i>Entrophosporaceae</i>	<i>Entrophospora</i>	2 / 1	
	<i>Gigasporaceae</i>	<i>Gigaspora</i>	8 / 6	
	<i>Scutellosporaceae</i>	<i>Scutellospora</i>	10 / 6	
	<i>Dentiscutataceae</i>	<i>Dentiscutata</i>	7 / 6	<i>Scutellospora</i>
		<i>Fuscutata</i>	4 / 2	<i>Scutellospora</i>
		<i>Quatunica</i>	1 / 1	<i>Scutellospora</i>
	<i>Racocetraceae</i>	<i>Cetraspora</i>	5 / 2	<i>Scutellospora</i>
		<i>Racocetra</i>	9 / 8	<i>Scutellospora</i>
	<i>Pacisporaceae</i>	<i>Pacispora</i>	7 / 1	<i>Glomus</i>
<i>Glomerales</i>	<i>Glomeraceae</i>	<i>Glomus</i>	111 / 52	
<i>Paraglomerales</i>	<i>Paraglomeraceae</i>	<i>Paraglomus</i>	3 / 2	<i>Glomus</i>
Total	4	13	19	217 / 119

¹ Gêneros encontrados na atual classificação filogenética do filo Glomeromycota * Espécies descritas no Brasil

No Brasil, alguns trabalhos realizados mostram a ocorrência dos FMA em solo sob Floresta de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. No Estado de São Paulo Bononi et al. (1990) encontraram um total de 15 espécies de FMA, enquanto que Moreira-Souza et al. (2003) 17 e 16 espécies na floresta nativa e 9 e 8 espécies no reflorestamento, em fevereiro e setembro, respectivamente. Moreira et al. (2009) relataram a ocorrência de 15 e 15 espécies de FMA na floresta nativa e 13 e 16 no reflorestamento, em maio e outubro respectivamente.

No Rio Grande do Sul Breuninger et al. (2000) encontraram um total de 14 espécies de FMA na rizosfera de Araucária, enquanto que Zandavalli et al. (2008) relatam a ocorrência de 16 espécies em área de reflorestamento com araucária e apenas 8 espécies em área de mata nativa. No Estado de Santa Catarina, em Floresta de Araucária, foram encontradas 13 espécies de FMA em comparação a 6 espécies identificadas no campo (ANDRADE et al., 2000).

Em geral, a maior densidade de glomerosporos tem sido encontrada em solos sob Floresta de Araucária nativa (ZANGARO; MOREIRA, 2010), com exceção de dois trabalhos no sul do país onde a maior densidade de esporos ocorreu em solo sob reflorestamento de araucária (ALBUQUERQUE, 2003; ZANNAVALLI et al., 2008). Já, em relação à

colonização radicular de araucária por FMA, a maior taxa tem sido verificada em Floresta nativa de araucárias (ZANGARO; MOREIRA, 2010).

A distribuição das espécies de FMA nas florestas de araucárias, em diferentes locais, não tem revelado um padrão muito consistente de espécies mais frequentes, provavelmente devido à influência de fatores edafoclimáticos de cada local e histórico da área. Considerando duas épocas de coleta, a diversidade dos FMA na Floresta de Araucária nativa tem variado de 13 a 21 táxons e, no reflorestamento, de 13 a 22, sendo os dois gêneros mais frequentes *Acaulospora* e *Glomus* (ZANGARO; MOREIRA, 2010).

Biomass ameaçados, como os da Mata Atlântica, abrigam florestas de araucária naturais e em reflorestamento, com alta diversidade de espécies de FMA, reconhecidamente importantes para a manutenção da biodiversidade e produtividade dos ecossistemas florestais e muitos deles ainda não descritos (DE SOUZA et al., 2010).

A perda de fontes de inóculo de FMA, dessas áreas, pode reduzir a qualidade do solo, especialmente a capacidade de a planta absorver nutrientes e, conseqüentemente a produtividade do ecossistema. Entretanto, a maioria dos trabalhos envolvendo ocorrência e diversidade de FMA em araucária se restringem a algumas regiões específicas, não sendo encontrados estudos envolvendo esse ecossistema em diferentes regiões do Estado de São Paulo.

Considerando que a simbiose micorrízica arbuscular é uma associação com papel multifuncional nos ecossistemas florestais naturais e importante na manutenção de sua produtividade e diversidade, buscou-se verificar a ocorrência e diversidade de FMA, em floresta de araucária nativa e reflorestada, e sua relação com os atributos físico-químicos do solo e da serapilheira em duas épocas (inverno e verão) em três diferentes regiões do estado de São Paulo (Capítulo 3).

1.4 Indicadores de qualidade do solo

O solo representa um ambiente vivo e dinâmico, resultado da contínua interação entre os fatores bióticos (planta, animais e micro-organismos) e abióticos (clima, rocha, relevo e tempo), fundamental como habitat e sustento da comunidade biológica nos ecossistemas terrestres naturais e agrícolas. Contudo, cada solo apresenta uma capacidade intrínseca no desenvolvimento de suas funções para a sustentação da produtividade biológica, sendo esta capacidade, ainda, limitada pelos recursos do ecossistema, os quais, quando muito exigidos, implicam em perdas na qualidade ambiental e no favorecimento da saúde de plantas e animais

e ainda na sustentabilidade ambiental (DORAN; PARKIN, 1994; FRIGHETTO; VALARINI, 2000).

A qualidade do solo nos ecossistemas florestais tropicais tem estreita relação com a sustentação da diversidade acima e abaixo do solo, o que torna a floresta nativa praticamente insubstituível na tarefa de preservar a biodiversidade tropical (GIBSON et al., 2011).

O monitoramento da qualidade do solo envolve o uso de indicadores na coleta de informações a respeito das funções do solo, as quais são representadas por propriedades físico-químicas e processos biológicos que interagem entre si, o que exige o uso de um conjunto mínimo de indicadores de natureza físico-química e biológica na interpretação mais correta da eficácia do funcionamento do solo (LARSON; PIERCE, 1994; DORAN; PARKIN, 1994; BASTIDA et al., 2008; RITZ et al., 2009).

Dentre os indicadores de qualidade do solo, os de natureza biológica devem ser prioridade em qualquer monitoramento, principalmente aqueles envolvendo a participação de micro-organismos que, por sua elevada abundância, atividade metabólica e bioquímica são mais sensíveis em medir e avaliar os efeitos de distúrbios ambientais do que os físico-químicos, permitindo antecipar as medidas de manejo nos ecossistemas (TÓTOLA; CHAER, 2002; SCHLOLER et al., 2003; BARETTA et al., 2008; SILVA et al., 2009).

A biomassa microbiana do solo é considerada o componente vivo da matéria orgânica do solo (MOS), excluindo-se raízes de plantas e animais e, embora represente menos de 5% da MOS, está envolvida nas transformações de C, N, P e S no solo, servindo de fonte e dreno de nutrientes (NANNIPIERI et al., 2002). Nesse contexto, o carbono da biomassa microbiana (CBM) é um dos mais requeridos indicadores microbiológicos de qualidade do solo devido a sua rápida resposta às interferências nos ecossistemas (NOGUEIRA et al., 2006; SILVA et al., 2009; KASCHUCK et al., 2010), inclusive utilizado com eficiência na separação de florestas de araucária em diferentes estádios de conservação (BARETTA et al., 2010).

A decomposição dos resíduos orgânicos no solo de ecossistemas florestais, realizada por micro-organismos heterotróficos aeróbios e anaeróbios, pode ser medida por meio da quantificação do C-CO₂ liberado durante o processo respiratório, o qual também é conhecido como carbono mais prontamente metabolizável do solo e reflete a atividade da microbiota do solo (ALVAREZ et al., 1995; BASTIDA et al., 2008). A determinação do C-CO₂ é um indicador muito utilizado no entendimento do processo de mineralização e fluxo de energia em solo de ecossistemas naturais e agrícolas (DORAN; PARKIN, 1994; SILVEIRA et al., 2004; BINI, 2009; BARETTA et al., 2010).

Da mesma maneira que a quantificação da biomassa microbiana do solo não representa a atividade da microbiota do solo (ANDERSON; DOMSCH, 2010), a interpretação dos resultados da respirometria também deve ser feita com cuidado porque embora a obtenção de altos valores de CO_2 possa, em curto período de tempo, significar maior oferta de nutrientes no solo para as plantas, em longo prazo, resulta em perdas de carbono orgânico na forma de CO_2 para a atmosfera.

A eficiência da biomassa microbiana do solo em utilizar carbono disponível para a biossíntese pode ser calculada através da relação entre o valor de CO_2 produzido por unidade de carbono da biomassa microbiana por unidade de tempo, resultando no quociente metabólico ($q\text{CO}_2$), um índice simples e muito popular (ANDERSON; DOMSCH, 1993). De modo geral, ecossistemas que sofreram distúrbios apresentam valores elevados de $q\text{CO}_2$ em relação a ecossistemas mais estáveis (DINESH et al., 2003; BARETTA et al., 2005; ARAÚJO; MONTEIRO, 2007).

A utilização deste indicador baseia-se na teoria de sucessão ecológica estabelecida por Odum (1969), na qual os valores de $q\text{CO}_2$ diminuem ao longo da sucessão ou durante a regeneração, após um distúrbio, até atingir a condição sucessional clímax, na qual a comunidade microbiana do solo seria mais eficiente em conservar carbono.

Na avaliação da atividade microbiana do solo, além da respiração basal, a determinação da atividade da enzima desidrogenase também auxilia na interpretação da capacidade oxidativa da biomassa microbiana do solo (MATSUOKA et al., 2003). Esta enzima é muito ativa em células vivas e responsável por reações de transferência de energia através da cadeia de transporte de elétrons (BASTIDA et al., 2006) e muito sensível e de rápida resposta às interferências nos ecossistemas (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007; BASTIDA et al., 2008).

Os solos sob florestas de araucária natural e naquelas que sofreram distúrbios, em sua maioria, são ácidos e pouco férteis, embora sua fertilidade dependa, entre outros aspectos, da classe do solo, fertilidade inicial e tipo de cobertura vegetal remanescente, além do manejo adotado (MERLIM, 2005; BARETTA, 2007). Os indicadores químico-físicos do solo, embora menos sensíveis do que os biológicos, também sofrem com a mudança do uso do solo, e, em solos sob florestas de araucária, podem trazer informações importantes sobre a ciclagem e armazenamento dos nutrientes.

Dentre os indicadores químicos do solo destacam-se o pH, matéria orgânica, capacidade de troca de cátions (CTC), teor de P, saturação de alumínio e por bases e teor de potássio (K), entre outros (DORAN; PARKIN 1994; SCHOENHOLTZ et al., 2000).

Segundo esses mesmos autores, estes atributos podem influenciar na atividade biológica do solo, desenvolvimento de raízes e, como consequência, a produtividade primária, sendo a sua avaliação uma forma de verificar se as condições estão favoráveis ao estabelecimento, manutenção e produtividade da comunidade biológica do solo.

Os atributos físicos do solo, utilizados como indicadores de sua qualidade estrutural estão relacionados à capacidade de oxigenação e retenção de umidade, características fundamentais na criação de condições ideais ao desenvolvimento radicular e de organismos, favorecendo os processos químicos e biológicos do solo (DEXTER, 1988; ALVES et al., 2007). Dentre os atributos físicos de qualidade do solo, os mais utilizados e correlacionados com os atributos químicos e biológicos são: densidade, porosidade, estabilidade de agregados e retenção de umidade, entre outros (DORAN et al., 1993; SCHOENHOLTZ et al., 2000).

Os invertebrados de solo desenvolvem importante função nos ecossistemas florestais onde atuam em sinergismo com os micro-organismos na decomposição de resíduos orgânicos e ciclagem de nutrientes (LAVELLE; SPAIN 2001). Nesse processo, diversos grupos de invertebrados da macrofauna do solo atuam na transformação da serapilheira, redistribuição da MOS na superfície e perfil do solo, favorecendo as populações e atividade de micro-organismos responsáveis pela mineralização e ciclagem de nutrientes (CORREIA; OLIVEIRA, 2000). Contudo, além dessa função ecológica, a comunidade de invertebrados da macrofauna tem sido utilizada como indicadora da qualidade do solo e/ou de distúrbios ambientais em função de sua rápida resposta às intervenções nos ecossistemas, bem como devido a sua importante contribuição nos processos edáficos (PAOLETTI, 1999; BARROS et al., 2003; ANTUNES et al., 2008; BROWN et al., 2009; BARETTA et al., 2011).

No Brasil, os levantamentos envolvendo a fauna do solo em florestas de araucária são bastante escassos e focados apenas numa determinada região (DUARTE, 2004; MERLIM, 2005; BARETTA et al., 2010).

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) são biotróficos obrigatórios e por isso desenvolvem associação simbiótica quando associados às raízes da maioria das plantas vasculares (SMITH; READ, 2008). Nessa associação, os FMA são capazes de propiciar à planta hospedeira diversos benefícios tais como: favorecimento na absorção de água e nutrientes (principalmente os pouco móveis no solo) (CARDOSO et al., 2010), proteção contra patógenos de solo, efeito sobre a diversidade e composição de plantas e vice versa (VAN der HEIJDEN et al., 1998). Além disso, as hifas extra-radiculares promovem a agregação de partículas de solo pelo contato físico e pela síntese e exsudação de proteínas específicas que atuam na cimentação das mesmas (RILLIG, 2004; RILLIG et al., 2010).

Contudo, a abundância e composição da comunidade de FMA sofrem influência da variação de fatores edafo-climáticos nos ecossistemas naturais e dos impactos antrópicos tais como: preparo do solo, tipo de cultivo, aplicação de fertilizante, poluição do solo, entre outros (JANSA et al., 2009).

Os FMA, embora globalmente pouco diversos, são muito abundantes e altamente distribuídos, apresentando forte interação com vasta comunidade de plantas, além de desempenhar papel essencial na ciclagem de nutrientes e de carbono nos ecossistemas, podendo, por estas características, ser úteis como indicadores de qualidade do solo (JANSA et al., 2009). Em relação à utilização dos FMA na caracterização de florestas de araucárias é necessário estabelecer um padrão de comunidade de espécies de FMA que as caracterize em diferentes estádios de conservação da floresta. Nesse sentido, os levantamentos sobre abundância e diversidade de espécies de FMA, em florestas de araucária, já estão sendo realizados, embora muito focados em determinadas regiões do país, necessitando-se de um maior esforço de amostragem em diversas regiões para se atingir esse objetivo.

O objetivo geral deste trabalho foi verificar o potencial de alguns grupos da macrofauna edáfica, de FMA e de variáveis ambientais explicativas (físicas, químicas e microbiológicas) como indicadores de qualidade do solo em floresta de araucária, em duas épocas contrastantes (inverno e verão) no Estado de São Paulo.

Referências

_____. Soil microbial biomass: the eco-physiological approach. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 25, p. 2039-2043, 2010.

ALBUQUERQUE, P.P. **Aspectos ecológicos de populações de fungos micorrízicos arbusculares em reflorestamento e em mata nativa de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.** 2003. 61 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2003.

ALVAREZ, R.; DIAZ, R.A.; BARBERO, N.; SANTANATOGLIA, O. J.; BLOTTA, L. Soil organic carbon, microbial biomass and CO₂ production from three tillage systems. **Soil Tillage and Research**, Amsterdam, v. 33, p. 17-28, 1995.

ALVES, M.C.; SUZUKI, L.G.A.S.; SUZUKI, L.E.A.S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um latossolo vermelho distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 617-625, 2007.

ANDERSON, T.H.; DOMSCH, K.H. The metabolic quotient for CO₂ ($q\text{CO}_2$) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.25, p.393-395, 1993.

ANDRADE, A.C.S.; QUEIROZ, M.H.; HERMES, R.A.L.; OLIVEIRA, V.L. Mycorrhizal status of same plants of the Araucaria Forest and the Atlantic rainforest in Santa Catarina, Brazil, **Mycorrhiza**, New York, v.10, 131-136, 2000.

ANTUNES, S.C.; PEREIRA, R.; SOUZA, J.P.; SANTOS, M.C.; GONÇALVES, F. Spatial and temporal distribution of litter arthropods in different vegetation covers of Porto Santo Island (Madeira Archipelago, Portugal). **European Journal of Soil Biology**, New Jersey, v. 44, p. 45-56, 2008.

AQUINO, A.M.; SILVA, R.F.; MERCANTE, F.M.; CORREIA, M.E.F.; GUIMARÃES, M.F.; LAVELLE, P. Invertebrate soil macrofauna under different ground cover plants in the no-till system in the Cerrado. **European Journal of Soil Biology**, New Jersey, v. 44, p. 191-197, 2008.

ARAÚJO, A.S.F.; MONTEIRO, R.T.S.; Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 23, p. 66-75, 2007.

BARETTA, D. **Fauna do solo e outros atributos edáficos como indicadores da qualidade ambiental em áreas com *Araucaria angustifolia* no Estado de São Paulo**. 2007. 158 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

BARETTA, D., MALUCHE-BARETTA, C.R.D.M.; CARDOSO, E.J.B.N. Análise multivariada de atributos microbiológicos e químicos do solo em florestas com *Araucaria angustifolia*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 32, p. 2683-2691, 2008.

BARETTA, D.; BROWN, G.G.; CARDOSO, E.J.B.N. Potencial da Macrofauna e outras variáveis edáficas como indicadores da qualidade do solo em áreas com *Araucaria angustifolia*. **Acta Zoológica Mexicana**, Mexico, v. 2, p. 135-150, 2010.

BARETTA, D.; BROWN, G.G.; JAMES, S.W.; CARDOSO, E.J.B.N. Earthworm populations sampled using collection methods in Atlantic Forests with *Araucaria angustifolia*. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, p. 384-392, 2007.

BARETTA, D.; SANTOS, J.C.P.; FIGUEIREDO, S.R.; KLAUBERG-FILHO, O. Efeito do monocultivo de pinus e da queima do campo nativo em atributos biológicos do solo no planalto sul catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 715-724, 2005.

BARETTA, D.; SANTOS, J.C.P.; SEGAT, J.C.; GEREMIA, E.V.; OLIVEIRA-FILHO, L.C.L.; ALVES, M.V. Fauna edáfica e qualidade do solo. In: KLAUBERG-FILHO, O.; MAFRA, A.L.; GATIBONI, L C. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. v. 7, p. 141-192.

BARROS, E.; NEVES, A.; BLANCHARD, E.; FERNANDES, E.C.M.; WANDELLI, E.; LAVELLE, P. Development of the soil macrofauna community under silvopastoral and agrosilvicultural systems in Amazonia. **Pedobiologia**, Berlin, v. 47, p. 273-280, 2003.

BASTIDA, F.; MORENO, J.L.; HERNANDEZ, T.; GARCIA, C. Microbiological activity in a soil 15 years after its devegetation. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 38, p. 2503-2507, 2006.

BASTIDA, F.; ZSOLNAY, A.; HERNANDEZ, T.; GARCIA, C. Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective. **Geoderma**, Amsterdam, v. 147, p. 159-171, 2008.

BEVER, J.D.; SCHULTZ, P.A.; PRINGLE, A.; MORTON, J.B. Arbuscular mycorrhizal fungi: more diverse than meets the eye, and the ecological tale of why. **BioScience**, Reston, v. 51, p. 923-931, 2001.

BINI, D. **Bioindicadores de qualidade do solo em diferentes ecossistemas**. 2009. 75p. Dissertação (Mestrado em Microbiologia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2009.

BONONI, V.L.R.; GRANDI, R.A.P.; LOPES, S.A.R.; RODRIGUES, E.; FONSECA, M.P. Micorrizas vesículo-arbusculares em *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. **Instituto Florestal**, São Paulo, v. 2, p. 87-93, 1990.

BREUNINGER, M.; EINIG, W.; MAGEL, E.; CARDOSO, E.J.B.N.; HAMPP, R. Mycorrhiza of Brazil Pine (*Araucaria angustifolia* Bert. O. Ktze.). **Plant Biology**, Freiburg, v. 2, p. 4-10, 2000.

BROWN, G.G.; MASCHIO, W.; FROUFE, L.C.M. **Macrofauna do solo em sistemas agroflorestais e Mata Atlântica em regeneração nos municípios de Barra do Turvo, SP, e Adrianópolis, PR**. Colombo: Embrapa Florestas, 2009. 51 p. (Embrapa Floresta. Documentos, 184).

CARDOSO, E.J.B.N.; CARDOSO, I.M.; NOGUEIRA, M.A.; MALUCHE-BARETTA, C.R.D.; ALESSANDRA, M.P. Micorrizas arbusculares na aquisição de nutrientes pelas plantas. In: SIQUEIRA, J.O.; SOUZA, F.A. de; CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M. **Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil**. Lavras: Editora ULFA, 2010. p. 153-214.

CARDOSO, I.M.; KUYPER, T.W. Mycorrhizas and soil tropical fertility. **Agriculture, Ecosystems and Environmental**, Amsterdam, v.116, p. 72-84, 2006.

CARRENHO, R.; GOMES-DACOSTA, S.M.; BALOTA, E.L.; COLOZZI-FILHO, A. Fungos micorrízicos arbusculares em agrossistemas Brasileiros. In: SIQUEIRA, J.O.; SOUZA, F.A. de; CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S. M. **Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil**. Lavras: Editora ULFA, 2010. p. 215-250.

CHEN, X.; TANG, J.; ZHI, G.; HU, S. Arbuscular mycorrhizal colonization and phosphorus acquisition of plants: effects of coexisting plant species. **Applied Soil Biology**, Amsterdam, v. 28, p. 259-269, 2005.

CORREIA, M.E.F.; ANDRADE, A.G. Formação de serapilheira e cicagem de nutrientes. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 137-158.

CORREIA, M.E.F.; OLIVEIRA, L.C.M. **Fauna de solo**: aspectos gerais e metodológicos. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2000. 46 p. (Documentos, 112).

DE SOUZA, F.A.; SILVA, I.C.L. da; BERBARA, R.L.L. Fungos micorrízicos arbusculares: muito mais diverso do que se imaginava. In: MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O.; BRUSSAARD, L. (Ed.). **Biodiversidade do solo em ecossistemas brasileiros**. Lavras: Editora UFLA, 2008. p. 483-536.

DE SOUZA, F.A.; STÜRMER, S.L.; CARRENHO, R.; TRUFFEN, S.F.B. Classificação e taxonomia de fungos micorrízicos arbusculares e sua diversidade e ocorrência no Brasil. In: SIQUEIRA, J.O.; SOUZA, F.A. de; CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M. **Micorrizas**: 30 anos de pesquisas no Brasil. Lavras: Editora ULFA, 2010. p. 153-214.

DECAËNS, T.; JIMÉNEZ, J. J.; BARROS, E.; CHAUVEL, A.; BLANCHART, E.; FRAGOSO, C.; LAVELLE, P. Soil macrofauna communities in permanent pastures derived from tropical forest or savanna. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 103, p. 301-312, 2004.

DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 199-238, 1998.

DINESH, R.; GHOSHAL CHAUDHURI, S.; GANESHAMURTHY, A. N.; DEY, C. Changes in soil microbial indices and their relationships following deforestation and cultivation in wet tropical forests. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 24, p. 17-24, 2003.

DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.B.; CLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWARD, B.A. (Ed.). **Defining soil quality for sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21. (Special Publication, 5).

DORAN, J.W.; VARVEL, G.E.; CULLEY, J.B.L. Tillage and residue management effects on soil quality and sustainable land management. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON SUSTAINABLE LAND MANAGEMENT, 1993, Lethbridge. **Proceedings...** Lethbridge: The Workshop, 1993. p. 15-24.

DUARTE, M.M. Abundância de microartrópodes do solo em fragmentos de mata com araucária no sul do Brasil. **Iheringia**, Série Zoológica, Porto Alegre, v. 94, p. 163-169, 2004.

FARJON, A. *Araucaria angustifolia*. In: IUCN 2009. **IUCN Red List of Threatened Species**. 2006. Disponível em: <<http://www.iucnredlist.org/details/32975/>>. Acesso em: 06 mar. 2010.

FONSECA, C.R.; GANADE, G.; BALDISSERA, R.; BECKER, C.G.; BOELTER, C.R.; BRESCOVIT, A.D.; CAMPOS, L.M.; FLECK, T.; FONSECA, V.S.; HARTZ, S.M.; JONER, F.; KÄFFER, M.; LEAL-ZANCHET, A.M.; MARCELLI, M.P.; MESQUITA, A.S.; MONDIN, C.A.; PAZ, C.P.; PETRY, M.V.; PIOVENSAN, F.N.; PUTZEK, J.; STRANZ, A.; VERGARA, M.; VIEIRA, E.M. Towards an ecologically-sustainable forestry in the Atlantic. **Forest Biological and Conservation**, Oxford, v. 142, p. 1209-1219, 2009.

FRIGHETTO, R.T.S.; VALARINI, P.J. (Cord.). **Indicadores biológicos e bioquímicos da qualidade do solo**: manual técnico. Jaguariúna: EMA, 2000. 198 p. (Documentos, 21).

GIBSON, L.; LEE, T.M.; KOH, L.P.; BROOK, B.W.; GARDNER, T.A.; BARLOW, J.; PERES, C.A.; BRADSHAW, C.J.A.; LAURENCE, W.F.; LOVEJOY, T.E.; SODHI, N.S. Primary forests are irreplaceable for sustaining tropical biodiversity. **Nature**, London, v. 478, p. 378-383, 2011.

GOTO, B.T.; MAIA, L.C. Glomerospores: a new denomination for the spores of Glomeromycota, a group molecularly distinct from the Zygomycota. **Mycotaxon**, Ithaca, v. 96, p. 129-132, 2006.

GUERRA, M.P.; SILVEIRA, V.; REIS, M.S. dos; SCHNEIDER, L. Exploração, manejo e conservação da Araucária (*Araucaria angustifolia*). In: SIMÕES, L.L.; LINO, C.F. (Ed.). **Sustentável Mata Atlântica**. São Paulo: SENAC, 2002. p. 85-101.

JANSA, J.; RUDOLF-HANS, O.; EGLI, S. Environmental determinants of the arbuscular mycorrhizal fungal infectivity of Swiss agricultural soils. **European Journal of Soil Ecology**, London, v. 45, p. 400-408, 2009.

KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: Lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 42, p. 1-13, 2010.

KRONKA, F.J.N.; NALON, M.A.; MATSUKUMA, C.K.; KANASHIRO, M.M.; YWANE, M.S.S.; PAVÃO, M.; DURIGAN, G.; LIMA, L.M.P.R.; GUILLAUMON, J.R.; BAITELLO, J.B.; BORGIO, S.C.; MANETTI, L.A.; BARRADAS, A.M.F.; FUKUDA, J.C.; SHIDA, C.N.; MONTEIRO, C.H.B.; PONTINHAS, A.A.S.; ANDRADE, G.G.; BARBOSA, O.; SOARES, A.P.; JOLY, C.A.; COUTO, H.T.Z. **Inventário florestal da vegetação natural do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Florestal, 2005. 200 p.

LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: PANKHURST, C.; DOUBE, B.M.; GUPTA, V.V.S.R. (Ed.). **Biological indicators of soil health**. Oxon: CAB International, 1994. p. 1-23.

LAVELLE, P.; SPAIN, A. **Soil ecology**. Dordrecht: Kluwer Academic, 2001. 654 p.

MANTOVANI, A.; MORELLATO, L.P.C.; REIS, M.S. Fenologia reprodutiva e produção de sementes em *Araucaria angustifolia* (Bert.) O.Kuntze. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 787-796, 2004.

MATSUOKA, M.; MENDES, I.C.; LOREIRO, M.F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 425-433, 2003.

McGONIGLE, T.P.; FILTER, A.H. Ecological specificity of vesicular arbuscular Mycorrhizal associations. **Mycological Research**, Oxford, v. 94, p. 120-122, 1990.

MERLIM, A.O. **Macrofauna edáfica em ecossistemas preservados e degradados no Parque Estadual de Campos de Jordão, SP**. 2005. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

MOÇO, M.K.S.; GAMA-RODRIGUES, E.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; CORREIA, M.E.F. Caracterização da fauna edáfica em diferentes coberturas vegetais na região norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 555-564, 2005.

- MOREIRA, F.M.S.; HUISING, E.J.; BIGNELL, D.E. **Manual de biologia dos solos tropicais: amostragem e caracterização da biodiversidade**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2010. 368 p.
- MOREIRA, M.; BARETTA, D.; TSAI, S.M.; CARDOSO, E.J.B.N. Arbuscular mycorrhizal fungi in a native forest and in reforested Araucaria Forest: a case study. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 6, p. 677-684, 2009.
- MOREIRA, M.; NOGUEIRA, M.A.; TSAI, S.M.; GOMES-DA-COSTA, S.M.; CARDOSO, E.J.B.N. Sporulation and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in Brazil Pine in the Field and in the greenhouse. **Mycorrhiza**, New York, v. 17, p. 519-526, 2007.
- MOREIRA-SOUZA, M.; CARDOSO, E.J.B.N. Dependência micorrízica de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. Sob doses de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 905-912, 2002.
- MOREIRA-SOUZA, M.; TRUFEM, S.F.B.; GOMES-DA-COSTA, S.M.; CARDOSO, E.J.B.N. Arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Araucaria angustifolia* (Bert.) O.Ktze. **Mycorrhiza**, New York, v. 13, p. 211-215, 2003.
- MUCHOVEJ, R.M.C.; ALVES, A.C.; MUCHOVEJ, J.J.; KASUYA, M.C.M. Influência da inoculação com fungos ectomicorrízicos e MVA sobre o comportamento de mudas de *Araucaria angustifolia* (BERT.) O. KTZE. **Hoehnea**, São Paulo, v. 19, p. 9-18, 1992.
- NANNIPIERI, P.; KANDELER, E.; RUGGIERO, P. Enzyme activities and microbiological and biochemical processes in soil. In: BURNS, R.G.; DICK, R.P. (Ed.). **Enzyme in the environment**. Marcel Dekker, New York, 2002. p. 1-34.
- NERONI, R.F.; CARDOSO, E.J.B.N. Occurrence of diazotrophic bactéria in *Araucaria angustifolia*. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, p. 303-304, 2007.
- NOGUEIRA, M.A.; BALBINO, U.B.; BRANDÃO-JUNIOR, O.; BRAUN, G.; CRUZ, M.F.; DIAS, B.A.; DUARTE, R.T.D.; GIOPPO, N.M.R.; MENNA, P.; ORLANDI, J.M.; RAIMAN, M.P.; RAMPAZO, L.G.L.; SANTOS, M.A.; SILVA, M.E.Z.; VIEIRA, F.P.; TOREZAN, J.M.D.; HUNGRIA, M.; ANDRADE, G. Promising indicators for assessment of agroecosystems alteration among natural, reforested and agricultural land use in Southern Brazil. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 115, p. 237-247, 2006.
- ODUM, E.P. The strategy of ecosystem development. **Science**, Washington, v. 164, p. 262-270, 1969.
- PAOLETTI, M.G. Using bioindicators based on biodiversity to assess landscape sustainability. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 74, p. 1-18, 1999.
- PURIN, S.; RILLIG, M.C. The arbuscular mycorrhizal fungal protein glomalin: Limitations, progress and a new hypothesis for its function. **Pedobiologia**, Berlin, v. 51, p. 123-130, 2007.
- REITZ, R.; KLEIN, R. M.; REIS, A. **Projeto madeira do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Companhia Rio Grandense de Artes Gráficas, 1983. 230 p.
- RIBEIRO, M.C.; METZGER, J. P.; MARTENSEN, A. C.; PONZONI, F.; HIROTA, M.; Brazilian Atlantic Forest: how much is left and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological and Conservation**, Oxford, v. 142, p. 1141-1153, 2009.

RILLIG, M.C. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 28, p. 355-363, 2004.

RILLIG, M.C.; MARDATIN, N.F.; LEIFHEIT, E.F.; ANTUNES, P.M. Mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi increases soil water repellency and is sufficient to maintain water-stable soil aggregates. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 42, p. 1189-1191, 2010.

RILLIG, M.C.; WRIGHT, S.F.; NICHOLS, K.A.; SCHMITD, W.F.; TORN, M.S. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 233, p. 167-177, 2001

RITZ, K.; BLACK, H.I.J.; CAMPBELL, C.D.; HARRIS, J.A.; WOOD, C. Selecting biological indicators for monitoring soil: a framework for balancing scientific and technical opinion to assist policy development. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 9, p. 1212-1222, 2009.

SANTOS, R.L.R.; IVANAUSKAS, N.M. Estrutura do componente arbóreo de trecho de floresta de araucária na Estação Ecológica de Itaberá, Itaberá-SP, **Instituto Florestal**, Série Registros, São Paulo, n. 42, p. 127-131, 2010.

SANTOS, R.L.R.; IVANAUSKAS, N.M.; POLISEL, R.T.; ESTEVES, R. Comunidade arbórea de trecho de floresta secundária com araucária na Estação Ecológica de Bananal, Bananal-SP. **Instituto Florestal**. Série Registros, São Paulo, n. 40, p. 137-142, jul. 2009.

SCHLOTTER, M.; DILLY, O.; MUNCH, J.C. Indicators for evaluating soil quality. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 98, p. 255-262, 2003.

SCHOENHOLTZ, S.H.; VAN MIEGROET, H.; BURGER, J.A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 138, p. 335-356, 2000.

SILVA, L.G.; MENDES, I.C.; REIS-JUNIOR, F.B.; FERNANDES, M.F.; MELO, J.T.; KATO, E. Atributos físicos, químicos e biológicos de um latossolo de cerrado em plantio de espécies florestais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, p. 613-620, 2009.

SILVEIRA, A.D. Micorrizas. In: CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M.; NEVES, M.C.P. **Microbiologia do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p. 257-282.

SILVEIRA, R.B.; MELLONI, R.; PEREIRA, E.G. Atributos microbiológicos e bioquímicos como indicadores da recuperação de áreas degradadas, no sul de Minas Gerais. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 2, p. 21-19, 2004.

SIQUEIRA, J.O. Micorrizas arbusculares. In: HUNGRIA, M.; ARAÚJO, R.S. (Ed.) **Micro-organismos de importância agrícola**. Brasília: EMBRAPA, CNPAF, 1994. p. 151-194.

SMITH, S.E.; BARKER, S.J. Plant phosphate transporter genes help harness the nutritional benefits of arbuscular mycorrhizal symbiosis. **Trends Plant Science**, London, v. 75, p. 189-190, 2002.

SMITH, S.E.; READ, D.J. **Mycorrhizal symbiosis**. 3rd ed. New York; London: Academic Press, 2008. 800 p.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. **Fatos e números do Brasil florestal**. São Paulo, 2008. 93 p.

SOUZA, R.P.M. **Estrutura da comunidade arbórea de trechos de florestas de Araucária no estado de São Paulo, Brasil**. 2008. 101 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

STÜRMER, S.L.; SIQUEIRA, J.O. Diversidade de fungos micorrízicos arbusculares em ecossistemas brasileiros. In: MOREIRA, M.S.F.; SIQUEIRA, J.O.; BRUSSAARD, L. (Ed.). **Biodiversidade do solo em ecossistemas brasileiros**. Lavras: UFLA, 2008. p. 537-583.

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

VAN DER HEIJDEN, M.; KLIRONOMOS, J.; URSIC, M.; MOUTOGLIS, P.; STREITWOLF-ENGEL, R.; BOLLER, T.; WIEMKEN, A.; SANDERS, I. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. **Nature**, London, v. 396, p. 69-72, 1998.

VAN DER HEIJDEN, M.G.A.; BARDGETT, R.D.; VAN STRAALLEN, NM. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. **Ecology Letters**, Davis, v. 11, p. 296-310, 2008.

VELOSO, H.P.; RANGEL, F.A.L.R.; LIMA, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991. 123 p.

ZANDAVALLI, R.B.; STÜRMER, S.L.; DILLENBURG, L.R. Species richness of arbuscular mycorrhizal fungi in forest with Araucaria in Southern Brasil. **Hoehnea**, São Paulo, v. 35, p. 63-68, 2008.

ZANGARO, W.; MOREIRA, M. Micorrizas arbusculares nos biomas Floresta Atlântica e Floresta de Araucária. In: SIQUEIRA, J.O.; SOUZA, F.A. de; CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M. **Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil**. Lavras: Editora ULFA, 2010. p. 279-310.

2 MACROFAUNA EDÁFICA COMO INDICADORA DE QUALIDADE DO SOLO EM FLORESTA DE *Araucaria angustifolia* NATIVA E REFLORESTADA NO ESTADO DE SÃO PAULO

Resumo

No Estado de São Paulo, a intensa exploração das florestas com *Araucaria angustifolia* resultou em sua fragmentação, colocando em risco a biodiversidade edáfica associada a esse ecossistema. Acredita-se que o estudo sobre a qualidade física, química e biológica do solo, em florestas com araucárias, seja muito importante para entender as mudanças ocorridas nesse ecossistema, servindo para a conservação da sua biodiversidade. O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial da macrofauna edáfica e das variáveis ambientais explicativas (físico-químicas e microbiológicas do solo) na discriminação de Florestas de Araucária nativa e reflorestada, a fim de selecionar os melhores indicadores de qualidade do solo. Avaliaram-se florestas com *Araucaria angustifolia* nativa (NF) e reflorestada (RF) em três regiões distintas do Estado de São Paulo. Cada floresta foi representada por três repetições verdadeiras e em cada área foram coletadas, ao acaso, quinze amostras de solo para avaliação dos atributos físicos (umidade, densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total) químicos [pH, Ca, Mg, K, Al, P, H+Al e carbono orgânico (C-org)] e biológicos do solo (carbono da biomassa microbiana, respiração basal, atividade da desidrogenase e quociente metabólico). As coletas da macrofauna do solo foram realizadas no inverno e verão, utilizando-se o método de escavação e triagem manual de monólitos (TSBF). As amostras de solo para avaliação dos atributos físico-químicos e microbiológicos foram retiradas nos mesmos pontos de coleta. Além desses atributos, foi avaliada a massa seca de serapilheira e C, N e S na mesma. A abundância (indivíduos por m²), riqueza (número de grupos taxonômicos) e os índices ecológicos de Shannon (H), dominância de Simpson (Is) e uniformidade de Pielou (*e*) foram calculados. A abundância da macrofauna e de espécies de minhocas foram submetidas à Análise de Componentes Principais (ACP) e os atributos físicos, químicos e microbiológicos foram utilizados na ACP, como variáveis ambientais explicativas. A análise de variância (Two way ANOVA) e a Canônica Discriminante (ACD) foram aplicadas às variáveis ambientais explicativas e aos atributos da macrofauna. A macrofauna do solo sofreu influência de sazonalidade, apresentando maior riqueza de grupos no verão. A abundância de grupos da macrofauna foi influenciada pelo estado de conservação da floresta, sendo que a nativa proporcionou maior diversidade de grupos taxonômicos. Os valores dos índices ecológicos (H, Is e *e*) não foram diferentes entre a floresta nativa e reflorestada. A riqueza de grupos taxonômicos foi o atributo mais importante para a discriminação das áreas. O grupo Oligochaeta, principalmente as espécies *Ponthoscolex corethrurus* e *Amyntas* spp., destacaram-se como importante indicador de qualidade do solo e/ou distúrbio ambiental em florestas com araucárias. As minhocas nativas, tais como: *Fimoscolex* sp1, *Glossoscolex* sp1, *Andiorrhinus* sp, *Meridrilus* sp e *Urobenus brasiliensis*, principalmente, estiveram associadas à floresta com araucárias nativa. A umidade do solo, porosidade total e teor de S na serapilheira foram as variáveis ambientais que mais contribuíram na separação das florestas.

Palavras-chave: Análise multivariada; Biodiversidade; Bioindicadores; Atributos microbiológicos; Atributos físico-químicos do solo; Fauna do solo; Ecologia do solo

Abstract

In São Paulo State, the intense exploitation of forests with *Araucaria angustifolia* resulted in its fragmentation endangering the soil biodiversity associated with this ecosystem. We believe that the survey of physical, chemical and biological soil attributes in Araucaria forests is very important to understand the changes in this ecosystem, serving to conserve its biodiversity. The objective of this study was to evaluate the soil invertebrate macrofauna and to study environmental explanatory variables (physico-chemical and microbiological) in the discrimination of native and reforested Araucaria forests and to select the best indicators of soil quality. We evaluated native forests with native (NF) and reforested (RF) *Araucaria angustifolia* in three distinct regions in the state of São Paulo. Each forest was represented by three true replicates, in which we collected at random fifteen soil samples. The sampling of soil macrofauna was carried out in the winter and summer, using the method of excavation and manual sorting of monoliths (TSBF). At the same sites soil samples were taken for the determination of physical (moisture, density, macroporosity, microporosity and total porosity), chemical [pH, Ca, Mg, K, Al, P, H+Al and organic carbon (org-C)] and microbiological [microbial biomass carbon (MBC), basal respiration (CO₂-C), dehydrogenase activity (Desi) and metabolic quotient (*q*CO₂)] soil attributes. In addition to these attributes, we evaluated the dry mass of litter and the C, N and S content. The number of individuals per m² (abundance), richness (number of taxons), and Shannon's diversity, Simpson's dominance and Pielou's evenness indices were calculated. The abundance of macrofauna groups and of earthworm species were submitted to a Principal Component Analysis (PCA) and the physical, chemical and microbiological attributes were used in the PCA as explanatory variables. The analysis of variance (Two-way ANOVA) and the Canonical Discriminant Analysis (CDA) were applied to the macrofauna attributes and to the explanatory variables. The soil macrofauna was influenced by seasonality, with higher group richness in the summer. The abundance of macrofauna groups was influenced by the state of forest conservation, and the native one provided greater diversity of taxonomic groups. The value of ecological indices (*H*, *Is* e *e*) did not differ between native and reforested forest. The richness of taxonomic groups was the most important attribute for the discrimination of areas. The group Oligochaeta, mainly the species *Ponthoscolelex corethrurus* and *Amyntas* spp., stood out with the most important soil quality indicators and/or of environmental disturbance in Araucaria forests. The native earthworms, mainly *Fimoscolex* sp1, *Glossoscolex* sp1, *Andiorrhinus* sp, *Meridrilus* sp and *Urobenus brasiliensis*, were associated with the native Araucaria forest. Soil moisture, total porosity and litter S contents were the explanatory variables that contributed the most to separate the areas.

Keywords: Multivariate analysis; Indicators of soil quality; Biodiversity; Bioindicators; Microbiological attributes; Attributes physico-chemical of soil; Soil fauna; Soil ecology

2.1 Introdução

A Floresta Ombrófila Mista, também conhecida como floresta com araucária, já ocupou aproximadamente 200 mil Km², estendendo-se, principalmente, desde o Rio Grande do Sul até o estado do Paraná (REITZ et al., 1983; VELOSO et al., 1991). A *Araucaria angustifolia*, principal componente desta floresta, foi intensivamente explorada devido ao seu

alto valor sócio-econômico (madeira e resina) e alimentar (pinhão), resultando na redução de sua área que, originalmente, ocupou cerca de 253.000 km², e, atualmente cobrem apenas 12,6% (32.021 km²) sendo que, 981 km² estão em área de preservação permanente, o que corresponde a 0,39% da área original da floresta (RIBEIRO et al., 2009).

No estado de São Paulo, a floresta com araucária se encontra bastante fragmentada, totalizando 174.681 há, o que é inferior a 4 % de sua área original (MANTOVANI et al., 2004; KRONKA et al., 2005), tornando esse ecossistema crítico em termos de conservação de sua biodiversidade (BARETTA et al., 2007a), ocasionando a inclusão da *Araucaria angustifolia* na lista de extinção na categoria “vulnerável” (FARJON, 2006).

A manutenção da qualidade do solo nas florestas com araucárias naturais, bem como sua melhoria nas áreas de reflorestamento, pode assegurar a sustentabilidade desse ecossistema e contribuir decisivamente para a preservação desta espécie.

A qualidade do solo é definida como “a capacidade de o solo funcionar dentro dos limites do ecossistema para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde de plantas e animais” (DORAN; PARKIN, 1994, FRIGHETTO; VALARINI, 2000; BARETTA et al., 2011). Entretanto, a medida da qualidade do solo é uma tarefa bastante complexa e envolve o uso de atributos edáficos denominados de indicadores. Estes indicadores devem incluir, além dos tradicionais atributos físicos e químicos, também os biológicos (microbiológicos, mesofauna e macrofauna) do solo para que, em conjunto, possam refletir melhor os processos que atuam na qualidade do solo (TÓTOLA; CHAER, 2002; BASTIDA et al., 2008; BARETTA et al., 2010).

A macrofauna do solo engloba diferentes grupos taxonômicos de invertebrados com dimensões acima de 10 mm de comprimento ou 2 mm de diâmetro corporal, portanto visíveis a olho nu, e que desenvolvem pelo menos uma importante fase de seu ciclo de vida na superfície ou dentro do solo (WOLTERS, 2000; LAVELLE; SPAIN, 2001, BROWN et al., 2009; BARETTA et al., 2011).

Os invertebrados do solo também são reconhecidos pelos serviços que prestam aos ecossistemas, seja como “engenheiros do solo” ou como catalisadores da ciclagem de nutrientes pela fragmentação e ingestão de material orgânico, interagindo com os micro-organismos que atuam na decomposição e mineralização, aumentando assim a disponibilidade de nutrientes para as plantas (DECAËNS et al., 2003; LAVELLE et al., 2006; SWIFT et al., 2010).

Dentre os grupos da macrofauna, destaca-se a atuação das minhocas no solo, as quais são responsáveis pela melhoria de suas propriedades físicas, químicas e microbiológicas

aumentando a disponibilidade de nutrientes e a mineralização microbiana (BROWN; DOUBE, 2004), além de atuar na dispersão de inóculo de bactérias diazotróficas, esporos de fungos micorrízicos na região da drilosfera e, digerir, de modo seletivo, microrganismos patogênicos (BROWN, 1995; BONKONWSKI et al., 2009).

Os macroinvertebrados edáficos, além de sua função ecológica, também são utilizados como bioindicadores da qualidade do solo ou de distúrbios ambientais, pela sua ampla distribuição e abundância, além de serem bastante sensíveis às diversas intervenções antrópicas realizadas no meio ambiente (PAOLETTI, 1999; LAVELLE; SPAIN, 2001; ANTUNES et al., 2008; BARETTA et al., 2010).

No Brasil, praticamente são inexistentes os estudos sobre avaliação da qualidade do solo envolvendo atributos físicos, químicos e biológicos, nos mesmos pontos de amostragens e repetições verdadeiras do mesmo sistema, por meio de análise multivariada.

O estudo das modificações da comunidade da macrofauna invertebrada do solo, em florestas com araucária, principalmente envolvendo variáveis ambientais físico-químicas e microbiológicas, coletadas nos mesmos pontos de amostragens e com metodologias padronizadas pode contribuir no entendimento dos fatores responsáveis pelo desequilíbrio ecológico nesse ecossistema. Nesse sentido, este trabalho tem o objetivo de avaliar o potencial da macrofauna invertebrada do solo e das variáveis ambientais explicativas (físico-químicas e microbiológicas do solo) na discriminação de Florestas de Araucária nativa e reflorestada e selecionar os melhores indicadores de qualidade do solo por meio de técnicas de análise multivariada.

2.2 Desenvolvimento

2.2.1 Material e Métodos

2.2.1.1 Descrição das áreas de estudo

O estudo foi realizado em ambiente de Floresta Ombrófila Mista pertencente ao Bioma Mata Atlântica no Estado de São Paulo. Foram selecionadas áreas de Florestas com *Araucaria angustifolia* nativa (NF) e reflorestada (RF) em três regiões distintas no Estado (Figura 2.1). Além de a região ser considerada como uma réplica verdadeira, em cada região, na NF e na RF foi delimitada uma parcela de 0,5 hectare, sendo está considerada uma réplica verdadeira de cada tipo de floresta.

Figura 2.1 - Mapa do estado de São Paulo com a localização georeferenciada dos locais de estudo, São Paulo Brasil, 2012

Uma das regiões estudadas está localizada na Estação Ecológica de Bananal (EEB), na Serra da Bocaina, entre os estados de São Paulo e Rio de Janeiro. Distante 25 km da cidade de Bananal, a EEB apresenta clima mesotérmico úmido sem estação seca com verão brando, Cfb segundo a classificação de Köppen. As temperaturas médias variam entre 20 e 33 °C, chegando à mínima de 0 °C no inverno (SANTOS et al., 2009). Na primeira época de coleta (agosto de 2009) a temperatura média e pluviosidade foram de 17 °C e 40 mm respectivamente, enquanto que no verão a temperatura média subiu para de 22 °C e a maior pluviosidade foi registrada no mês de janeiro, acima de 300 mm (Figura 2.2).

A floresta com araucária nativa (NF), da EEB, se encontra a 1185 m de altitude (22°48'26" latitude Sul e 44°21'59" longitude Oeste) (floresta 1 da Figura 2.1 e Figura 2.3), onde estão presentes outras espécies vegetais arbustivas, herbáceas e arbóreas. Além da *A. angustifolia*, outras espécies vegetais foram registradas na composição florística dessa área, tais como: 178 espécies arbustivas e arbóreas distribuídas em 46 famílias e 89 gêneros, sendo as famílias de maior riqueza a Myrtaceae (28 espécies), Melastomataceae (19), Lauraceae (13), Rubiaceae (12) e Asteraceae (11) (SANTOS et al., 2009). Foram registradas quatro espécies que constam em lista de ameaçadas de extinção: *Euterpe edulis* Mart. (palmito-

juçara), *Raulinoreitzia leptophebia* (B.L. Rob) R.M. King & H. Rob, *Cedrella fissilis* Vell. (cedro-rosa) e *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze. A diversidade florística determinada pelo índice de Shanonn (H) foi de 3,68 e o índice de equitabilidade de Pielou de (*e*) foi de 0,75 (SANTOS et al., 2009). Outras informações mais detalhadas sobre a composição florística dessa área podem ser obtidas em Santos et al. (2009).

A área reflorestada com araucária (RF), nessa região, tem aproximadamente 38 anos e se encontra em desenvolvimento, com presença de outras espécies como *Dicksonia sellowiana* Hook. (xaxim-verdadeiro), *Euterpe edulis* Mart. (palmito-juçara), *Myrcia rostrata* DC. (guamirim-chorão), entre outras, flora arbustiva, herbácea e com presença de gramíneas em locais de menor densidade de cobertura vegetal. A área RF se encontra nas coordenadas (22°48'24" latitude Sul e 44°22'27" longitude Oeste) (floresta 2 da Figura 2.1 e Figura 2.4), com elevação de 1126 m. O solo, nas áreas de coleta, foi classificado como Cambissolo Háplico Tb Distrófico úmbrico (Anexo C e D). A caracterização físico-química do solo nos locais de coleta se encontra na (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Características químicas e físicas do solo, na profundidade de 0-20 cm, em Floresta de Araucária nativa (NF) e reflorestada (RF) no Estado de São Paulo, Brasil

Variáveis	(Unidade)	Floresta nativa (NF)	Reflorestada (RF)
pH (CaCl ₂)	(0,01 mol L ⁻¹)	4,0 ± 0,37 ^(a)	4,2 ± 0,7
C-org	(g kg ⁻¹)	33 ± 12,9 ^(a)	34,9 ± 7,9
P-resina	(mg kg ⁻¹)	8,3 ± 4,01 ^(a)	5,1 ± 2,1
K	(mmolc kg ⁻¹)	2,0 ± 1,02 ^(a)	1,4 ± 0,6
Ca	(mmolc kg ⁻¹)	16,8 ± 17,6 ^(a)	20,7 ± 28,8
Mg	(mmolc kg ⁻¹)	9,0 ± 9,8 ^(a)	7,6 ± 9,4
H + Al	(mmolc kg ⁻¹)	115,5 ± 46,2 ^(a)	132,3 ± 68,9
Densidade	(g cm ⁻³)	1,08 ± 0,2 ^(b)	1,03 ± 0,1
Macroporos	(m ³ m ⁻³)	0,16 ± 0,07 ^(b)	0,11 ± 0,1
Microporos	(m ³ m ⁻³)	0,41 ± 0,06 ^(b)	0,52 ± 0,1
Areia	(g kg ⁻¹)	459,0 ± 157,6 ^(c)	263,0 ± 165,1
Silte	(g kg ⁻¹)	87,3 ± 40 ^(c)	96,0 ± 75,3
Argila	(g kg ⁻¹)	453,8 ± 136,5 ^(c)	651,0 ± 119,0

^(a) média de 90 amostras (n=45x 2 épocas= 90) ± s.d.; ^(b) média de 45 amostras [n=45x 1 época (inverno = 45)] ± s.d., ^(c) média de 9 amostras ± s.d, C-org (carbono orgânico)

Figura 2.2 - Média mensal de temperatura (°C) e total mensal de precipitação (mm), registrada pela estação meteorológica de Silveiras-SP, no período de março de 2009 a março de 2010

Figura 2.3 - Vista da Floresta de Araucária nativa (NF) na Estação Ecológica de Bananal (EEB), no município de Bananal-SP, Brasil, 2012

Figura 2.4 - Vista da área reflorestada com araucária (RF) com aproximadamente 38 anos na Estação Ecológica de Bananal (EEB), município de Bananal-SP, Brasil, 2012

A segunda região estudada está localizada na Estação Ecológica de Itaberá (EEI) que se estende por 180 ha, no município de Itaberá, SP (Figura 2.1) e corresponde a um trecho de Floresta secundária com presença de *A. angustifolia* nativa. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é o Cfb mesotérmico úmido sem estação seca com verão brando. A temperatura média anual está entre 18-20 °C, sendo janeiro o mês mais quente (26 a 28°C) e julho o mais frio, entre 8 a 16 °C, com índice pluviométrico de 1200 a 1400 mm anuais (SANTOS; IVANAUSKAS, 2010). No período da primeira coleta (agosto de 2009) foi verificada uma temperatura média de 17 °C e pluviosidade de 45 mm, no mês de agosto, embora no mês de julho tenha sido 250 mm, atípica para essa época. No verão, o mês de fevereiro foi o mais quente e janeiro o de maior pluviosidade, 25 °C e 420 mm respectivamente (Figura 2.5). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico típico (Anexos C e D), relevo suave a ondulado. A floresta com araucária nativa (NF) localiza-se nas coordenadas 23° 50' 21" latitude Sul e 49° 08' 40" longitude Oeste (floresta 3 da Figura 2.1 e Figura 2.6), e altitude de aproximadamente 678 metros.

Figura 2.5 - Média mensal de temperaturas (°C) e total mensal de precipitação (mm), registrada pela estação meteorológica de Itaberá-SP, no período de março de 2009 a março de 2010

Figura 2.6 - Vista da Floresta com Araucária nativa (NF) na Estação Ecológica de Itaberá (EEI), no município de Itaberá-SP, Brasil, 2012

Nesta área, EEI, foram registradas, na NF, 134 espécies arbustivas e arbóreas, pertencentes a 91 gêneros e 50 famílias, sendo as de maior riqueza: Myrtaceae (12 espécies), Lauraceae (11 espécies), Rubiaceae (8), Euphorbiaceae (8), Salicaceae (6) e Meliaceae (6) (SANTOS; IVANAUSKAS, 2010). *Eugenia ligustrina* (Sw.) Willd. e *Sorocea bonplandii* (Baill.) W.C. Burger, Lanj. & Wess. Boer., foram encontradas em elevado número de indivíduos, muito comuns no sub-bosque e sub-dossel da floresta. *Syagrus romanzoffiana* (Cham.) Glassman também se destaca no estrato intermediário. No dossel estão presentes *Matayba elaeagnoides* Radlk., *Luehea divaricata* Mart., *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan além da *Araucaria angustifolia* que se destaca como emergente (SANTOS; IVANAUSKAS, 2010).

Das espécies ameaçadas de extinção, além da *A. angustifolia* foram encontradas: *Euterpe edulis* Mart. (palmito-juçara), *Balfourodendron riedelianum* (Engl.) Engl. (pau-marfim), *Aspidosperma polyneuron* Müll. Arg. (peroba-rosa) e *Cedrela fissilis* Vell. (cedro-rosa). A diversidade florística determinada de acordo com o índice de Shannon (H), foi de 4,12 e pelo índice de equitabilidade de Pielou (*e*) foi de 0,84. Outras informações mais detalhadas sobre a florística dessa área podem ser obtidas em Santos e Ivanauskas (2010).

Nessa mesma região, a área RF está localizada na estação Experimental de Itapeva (E.Ex.I) pertencente ao município de Itapeva-SP, onde foi implantada há 45 anos. No local estão presentes outras espécies vegetais tais como: *Gochnatia polymorpha* (Less) Cabr., (cambará), *Chusquea ramossissima* Lindm., (taquara), outras espécies arbustivas e herbáceas no sub-bosque, regeneração natural de plântulas de araucária e baixa presença de espécies de porte arbóreo, com exceção da araucária que é dominante nessa área. Está localizada entre as coordenadas 24° 04' 19" latitude Sul e 49° 01' 07" longitude Oeste (floresta 4 da Figura 2.1 e Figura 2.7), numa altitude de 740 metros, sob um Nitossolo Vermelho Eutroférico latossólico (Anexos C e D).

A terceira réplica das florestas está localizada no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), município de Iporanga-SP e em área nos arredores do parque, no município de Barra do Chapéu-SP (Figura 2.1). O clima da região é do tipo temperado brando sem estiagem (Cfb) segundo classificação de Köppen, sendo o mês de fevereiro o mais quente com temperatura média de 22,5 °C e entre maio e agosto o período de temperaturas mais baixas com média variando entre 15 e 16,7 °C (SOUZA, 2008). Na coleta de inverno, abril foi o mês mais seco (< 50 mm) e junho o mais frio (média de 17 °C), enquanto que no verão o mês mais chuvoso foi janeiro (acima de 400 mm) e temperatura média de 24 °C (Figura 2.8).

Figura 2.7 - Vista da área reflorestada com araucária (RF) na Estação Experimental de Itapeva (EExI), município de Itapeva-SP, Brasil, 2012

A floresta com araucária nativa (NF) se encontra em trecho de floresta Ombrófila Mista com elevação de 785 m, localizada no município de Barra do Chapéu-SP. O solo foi classificado como Cambissolo Háplico Tb Distrófico úmbrico (Anexos C e D). A cobertura vegetal dessa área é composta por *Dicksonia sellowiana*, *Cordyline terminalis* e *Eugenia cerasiflora* como representativas no subosque; *Allophylus edulis* é a espécie típica do subdossel; *Prunus myrtifolia*, *Casearia sylvestris*, *Swartzia acutifolia*, *Matayba elaeagnoides*, *Casearia decandra* e *Ocotea elegans* são dominantes no dossel e *Araucaria angustifolia*, *Cedrela fissilis*, *Ocotea elegans*, *Ocotea puberula* e *Matayba elaeagnoides*, aparecem como emergentes (SOUZA, 2008) (Figura 2.9). No estrato superior, foram amostrados 1879 indivíduos pertencentes a 87 gêneros e 45 famílias ($H= 3,81$, $e= 0,79$), sendo exclusivas deste estrato: Anacardiaceae, Aquifoliaceae, Arecaceae, Boraginaceae, Canellaceae, Chrysobalanaceae, Dicksoniaceae, Euphorbiaceae, Lamiaceae, Malpighiaceae, Olacaceae, Sabiaceae e Vochysiaceae. No estrato inferior foram amostrados apenas 915 indivíduos, distribuídos em 74 espécies, 50 gêneros e 33 famílias ($H= 3,44$, $e=0,79$). Outras informações sobre a florística dessa área podem ser encontradas em Souza (2008).

Figura 2.8 - Média mensal de temperaturas (°C) e total mensal de precipitação (mm), registrada pela estação meteorológica de Ribeira (SP), no período de março de 2009 a março de 2010

Figura 2.9 - Vista da Floresta com Araucária nativa (NF) nos arredores do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), no município de Barra do Chapéu-SP, Brasil, 2012

A área NF está situada entre as coordenadas 24° 28 '40" latitude Sul e 49° 01' 07" longitude Oeste (floresta 5 da Figura 2.1). A área reflorestada com araucária (RF), nessa mesma região, fica localizada no “Núcleo do Areado”, dentro do PETAR, município de Iporanga-SP. A área tem presença de espécies arbóreas em regeneração, arbustivas e herbáceas, além de cobertura por gramíneas em locais de menor densidade vegetal (Figura 2.10).

O solo foi identificado como Cambissolo Háplico Tb umbrico (Anexo C e D) e se encontra nas coordenadas 24° 20' 14" latitude Sul e 49° 36' 14" longitude Oeste (floresta 6 da Figura 2.1), com altitude de aproximadamente 932 m. Todas as áreas com araucária reflorestadas (RF) estão próximas de áreas de mata preservadas da Mata Atlântica, o que contribui para a reposição da comunidade da macrofauna nessas áreas.

Figura 2.10 - Vista da área reflorestada com araucária (RF) no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), no município de Iporanga-SP, Brasil, 2012

2.2.1.2 Descrição do solo nos locais de estudo

Os solos descritos, no presente estudo, foram coletados em cada floresta em trincheiras, de acordo com Santos et al. (2005). Posteriormente, as suas características químicas e granulométricas foram analisadas para fins de levantamento (EMBRAPA, 1997),

e, posteriormente, classificados (Anexos C e D) até o 4º nível categórico segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de solos (EMBRAPA, 2006).

2.2.1.3 Avaliação da macrofauna do solo

Em cada uma das réplicas verdadeiras de floresta nativa com araucária (NF) e reflorestada (RF), de aproximadamente 0,5 ha, ao redor das árvores de araucária, foram coletadas, ao acaso, quinze amostras de solo para avaliação da comunidade da macrofauna invertebrada do solo. As coletas foram realizadas no inverno (agosto de 2009) e no verão (fevereiro de 2010). Para a avaliação da comunidade da macrofauna utilizou-se o método recomendado pelo Programa “Tropical Soil Biology and Fertility” (TSBF) (ANDERSON; INGRAM, 1993).

Os monólitos de solo (25 x 25 cm de lado) na profundidade de 0-20 cm foram retirados, em cada floresta, até dois metros de distância de cada árvore de *Araucaria angustifolia*, na direção Norte. Foram coletados um total de 90 monólitos de solo, em cada época de coleta, com auxílio de um marcador de ferro galvanizado (Figura 2.11 a) (BARETTA et al., 2007b). Antes da retirada do monólito de solo, a serapilheira foi amostrada na mesma área (Figura 2.11 a e b). As amostras de solo e serapilheira foram colocadas em sacos de polietileno e transportadas para o laboratório (Figura 2.11 f). Em seguida, realizou-se a triagem manual (Figura 2.11 g) e, os indivíduos, visíveis a olho nu, foram separados da serapilheira e do solo e identificados em grupos taxonômicos, com auxílio de microscópio estereoscópico (Figura 2.11 h). Após a triagem, o número de indivíduos por m² (abundância), a riqueza (número de grupos taxonômicos), o índice de diversidade de Shannon (H), de dominância de Simpson (Is) e o de uniformidade de Pielou (*e*) foram calculados de acordo com Odum (1983).

Figura 2.11– Esquema ilustrativo das etapas de coleta, triagem e identificação da macrofauna do solo. Marcador de monólito (a); Coleta de serapilheira (b); Corte do bloco de solo (c); Retirada do monólito (d); Monólito de solo (e); Transporte do monólito (f); Triagem manual (g) e Identificação (h). Foto: Pereira, J.M (2009)

2.2.1.4 Determinação da matéria seca da serapilheira e C, N e S

A massa seca de serapilheira foi determinada a 55 °C até peso constante. A seguir a serapilheira foi moída e passada em peneira de 100 mesh. O teor de C, N e S foi determinado por combustão seca em analisador simultâneo para C, N e S, modelo vario EL cube, marca Elementar. Nos mesmos pontos de coleta dos monólitos, foram retiradas amostras de solo para avaliação da umidade (105 °C por 48 h) e atributos químicos, físicos e microbiológicos do solo.

2.2.1.5 Determinação dos atributos físico-químicos do solo

Para a análise granulométrica, as frações areia foram separadas por meio de peneiramento (0,053mm) e silte e argila por sedimentação. A argila foi determinada através da leitura do densímetro e o silte pela diferença conforme descrito pela Embrapa (1997). No inverno, nos mesmos pontos de coleta das amostras químicas, foram retiradas amostras de solo indeformadas, na camada de 0-5 cm de profundidade e com auxílio de anéis de aço inox de 5 cm de diâmetro. As amostras foram envolvidas em filme plástico e transportadas para o

laboratório, onde permaneceram em câmara fria até o momento da análise. Em laboratório, as amostras foram saturadas em bandejas, com uma lâmina de água de dois terços da altura dos anéis. A obtenção do conteúdo de água, nos potenciais matriciais de -1 e -6 KPa, foi realizada com uso de uma mesa de tensão (EMBRAPA, 1997). Em seguida, as amostras foram secadas em estufa a 105 °C por 48 horas e pesadas para a determinação da massa de sólidos e cálculo da densidade do solo. A macroporosidade foi obtida pela diferença entre o conteúdo de água no solo saturado e o conteúdo de água após a aplicação da tensão de 6 KPa. A microporosidade foi estimada como o conteúdo de água retido na tensão de 6 KPa. A densidade de partícula foi determinada em aparelho para cada amostra.

Para as análises químicas, as amostras de solo foram peneiradas em malha de 2 mm e homogeneizada. O pH foi determinado por potenciometria, em solução de CaCl_2 0,01 mol L⁻¹, em mistura de solução de solo na proporção de 1:2,5. O fósforo (P), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) foram extraídos com resina trocadora de íons. O potássio (K) foi extraído por Mehlich 1 e determinado por espectrometria de emissão de chama. O P foi determinado espectrofotometricamente pelo complexo azul de molibdênio e o Ca e Mg por espectrometria de absorção atômica. O hidrogênio (H) + alumínio (Al) foi determinado por potenciometria em solução SMP a pH 7,0. O Al foi extraído com solução de KCl (1 mol L⁻¹) e determinado por titulometria com NaOH 0,025 M. Já o Carbono orgânico (C-org) foi determinado por colorimetria, através da oxidação da matéria orgânica em mistura de solução de solo com $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e H_2SO_4 , de acordo com metodologia descrita por Raij et al. (2001).

2.2.1.6 Carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal do solo (C-CO₂) e atividade da enzima desidrogenase (Desi).

As amostras de solo coletadas para avaliação dos atributos microbiológicos foram mantidas sob refrigeração e transportadas para o laboratório em caixas de isopor com gelo onde permaneceram em câmara fria (4 °C) até o momento das análises.

O carbono da biomassa microbiana (CBM) foi determinado pelo método da fumigação-extração (VANCE et al., 1987), usando-se 10 g de solo com umidade corrigida para 60% da capacidade máxima de retenção de água. As amostras de solo foram fumigadas com clorofórmio livre de etanol por 24 horas, seguidas de extração com K_2SO_4 (0,5 mol L⁻¹) sob agitação a 180 rpm por 30 minutos, oxidação com $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (66 mM) e titulação com sulfato ferroso amoniacal $[(\text{NH}_4)_2\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ (33 mM) em presença de difenilamina

sulfanato de bário. O valor do fator de correção Kc utilizado nos cálculos foi 0,33 e o C das amostras não fumigadas foi extraído simultaneamente às fumigadas.

A atividade microbiana foi avaliada pela determinação da respiração basal (C-CO₂) em amostra de 100g de solo com umidade corrigida para 60% da capacidade máxima de retenção de água. O solo foi incubado em frasco de vidro contendo NaOH (0,5 mol L⁻¹), por 24 horas durante 10 dias em sala escura e climatizada a temperatura de 28 °C. O carbono liberado na forma de CO₂ foi quantificado por titulação do NaOH, com solução padronizada de (HCl 0,5 mol L⁻¹), usando fenolftaleína como indicador e precipitação prévia do carbonato pela adição de BaCl₂ (4 mol L⁻¹) (ALEF; NANNIPIERI, 1995). Os resultados de C-CO₂ e do CBM foram utilizados para calcular o quociente metabólico ($q\text{CO}_2$), conforme descrito por Anderson; Domsch (1993).

A atividade da enzima desidrogenase (Desi) foi determinada em amostras de 5g de solo com umidade natural adicionado de 5 mL de uma solução de cloreto de trifeniltetrazólio 1,0% (TTC) e incubado a 37 °C por 24 horas. O TTC utilizado como aceptor de elétrons, a partir da ação da enzima, é reduzido a trifenil tetrazólio formazan (TTF) sendo extraído com 10 mL de metanol. A atividade da enzima foi medida espectrofotometricamente a 485 nm e expressa em $\mu\text{g TTF g}^{-1} 24 \text{ h}^{-1}$ (CASIDA et al., 1964).

2.2.1.7 Análise estatística

Os resultados do número de indivíduos por metro quadrado (Densidade), riqueza de grupos taxonômicos (Riqueza), índice de diversidade de Shannon (H), dominância de Simpson (Is) e de uniformidade de Pielou (*e*) foram submetidos à análise de variância (Two-way ANOVA) e as médias comparadas pelo teste LSD ($P \leq 0,05$) por meio do programa estatístico SAS versão 8.2 (SAS, 2002).

A densidade (ind./m²) de cada grupo taxonômico da macrofauna do solo nas diferentes áreas foi utilizada para a obtenção do comprimento do gradiente e, como esse comprimento foi menor que três (resposta linear), optou-se pela Análise de Componentes Principais (ACP), usando o programa CANOCO versão 4.0 (tER BRAAK; SMILAUER, 1998). Os atributos químicos e físicos do solo (pH, P, Ca, Mg, K, AL, Corg e H+Al), [densidade (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (Pt) e umidade (Umi)], respectivamente e os da serapilheira [carbono (Cser), nitrogênio (Nser) e enxofre (Sser)], além de massa seca de serapilheira (MSS), os microbiológicos do solo (CBM, C-CO₂, Desi e $q\text{CO}_2$) e os índices de diversidade [índice de diversidade de Shannon (H), de Simpson (Is) e de

equitabilidade de Pielou (e)] foram utilizados posteriormente na ACP, como variáveis ambientais explicativas das modificações da comunidade da macrofauna: [Abundância de Oligochaeta, Chilopoda, Coleoptera, Isopoda, Diplopoda, Enchytraeidae, Mollusca, Pseudoscorpionida, Hymenoptera, Orthoptera, Opilionida, Isoptera, Blattodea, Grilloblattodea e Outros (grupos menos frequentes)].

Somente os atributos físicos (umidade, densidade, macroporosidade, e porosidade total), químicos do solo (P, Corg, Ca e H+Al), químicos da serapilheira (C, N e S), além de MSS, os microbiológicos (CBM, $q\text{CO}_2$ e Desi) e os índices de diversidade (H, Is e e), significativos (5% de significância) foram usados como variáveis ambientais explicativas, aumentando-se assim a robustez da análise (BARETTA, 2007). A abundância de espécies de minhocas foi submetido à Análise de Componentes Principais (ACP) e os atributos físico-químicos e microbiológicos foram utilizados como variáveis explicativas. Adicionalmente, as variáveis ambientais e os principais atributos da macrofauna foram submetidos à análise canônica discriminante (ACD) para identificar quais deles foram mais relevantes na separação das áreas amostradas (CRUZ-CASTILLO et al., 1994, BARETTA et al., 2005, 2010). Foram calculados os coeficientes canônicos padronizados (CCP), o coeficiente de correlação (r) e a taxa de discriminação paralela (TDP= $r \times \text{CCP}$). Os valores de TDP indicam a força da variável, ou atributo, em discriminar as áreas estudadas nos quais os valores são considerados bons (entre 0,1 e 0,2), muito bons (entre 0,2 e 0,4), ótimos (entre 0,4 e 0,8) e excelentes (acima de 0,81) para discriminar as áreas (BARETTA et al., 2010).

2.2.2 Resultados e Discussão

2.2.2.1 Densidade total da macrofauna do solo

Os valores de densidade total (Ind. m^{-2}) variaram de 1132 na área RF no inverno a 3018 indivíduos por metro quadrado em NF no verão (Figura 2.12). No verão, foram encontrados os maiores valores de densidade total em NF (3018) em comparação com a RF (2115) ($P < 0,05$). Já no inverno, não houve efeito significativo ($P < 0,05$) para os valores de densidade de indivíduos entre a NF (1373) e o RF (1132) (Figura 2.12). Os valores encontrados de densidade total são superiores (aproximadamente o dobro) aos encontrados em área com araucária nativa e reflorestada no Parque Estadual de Campos de Jordão, SP (MERLIM, 2005; BARETTA, 2007).

Figura 2.12 - Densidade total da comunidade de macrofauna invertebrada nas Florestas com Araucárias nativas (NF) e reflorestadas (RF) no inverno (agosto de 2009) e verão (fevereiro de 2010), São Paulo, Brasil. (*) indica diferença significativa da mesma variável entre épocas. Letras iguais maiúsculas no verão ou minúsculas no inverno não diferem significativamente entre si pelo teste LSD a 5%; (T). Erro padrão (n=45)

Esse incremento na densidade total, provavelmente seja reflexo do maior número de áreas amostradas (repetições verdadeiras), melhor estado de conservação das áreas com araucária amostradas do que nas outras regiões do presente estudo, com diferentes condições edafoclimáticas.

Independente da época de coleta, os grupos de insetos sociais Isoptera (cupins) e Hymenoptera (formigas) foram os que apresentaram maior frequência relativa na comunidade invertebrada edáfica em todas as áreas (Figura 2.13). As formigas tiveram a frequência relativa aumentada no verão, em comparação com o inverno, independente do tipo de floresta. Estes grupos têm sido reportados como mais frequentes em solos de diferentes ecossistemas florestais (AQUINO et al., 2008a), inclusive em solos de floresta de *Araucaria angustifolia* (BARETTA, 2007). O grupo Coleoptera (besouros) apresentou distribuição uniforme em todas as áreas e épocas de coleta, justificando sua maior diversidade nos diferentes ecossistemas (BROWN et al., 2009).

Figura 2.13 - Frequência relativa dos principais grupos da macrofauna edáfica coletada até 20 cm, nas Florestas com Araucárias nativas (NF) e reflorestadas (RF) no inverno (agosto de 2009) e verão (fevereiro de 2010), São Paulo, Brasil, (n= 45). Coleo= Coleoptera; Hym= Hymenoptera; Diplo= Diplopoda; Isopt= Isoptera; Chi= Chilopoda; Oligo= Oligochaeta; Outros= outros grupos. (Coloe= Coleoptera; Hym= Hymenoptera; Diplo= Diplopoda; Isopt= Isoptera; Chi= Chilopoda; Oligo= Oligochaeta; Outros= Outros grupos menos frequentes)

A frequência relativa de Oligochaeta (minhocas) foi diferenciada nas áreas com araucária reflorestada (RF) o que demonstra a importância desse grupo como bons indicadores de qualidade do solo e/ou de distúrbio ambiental (PAOLETTI; BRESSAN, 1996; PAOLETTI, 1999; BARETTA et al., 2007b). Os demais grupos de maior frequência nas áreas foram Chilopoda (centopeias) e Diplopoda (piolho-de-cobra) que apresentam históricos de vida semelhantes, densidades comparáveis e demonstram comportamentos semelhantes ao longo do ano (TUF; TUFOVÁ, 2008) e o grupo outros, entre outros (Figura 2.13) e Anexo A.

2.2.2.2 Riqueza de grupos da macrofauna do solo e índices de diversidade

Os valores de riqueza de grupos taxonômicos da macrofauna invertebrada do solo na floresta nativa (NF) foram significativamente maiores, comparados com a área reflorestada (RF) nas duas épocas de coleta (Figura 2.14). A maior riqueza de grupos foi observada no verão tanto na NF quanto na RF, indicando que a melhor época de coleta para estudo da abundância e diversidade da comunidade da macrofauna do solo seja o final da época chuvosa.

Figura 2.14 - Riqueza de grupos taxonômicos e índices de diversidade de Shannon (H), Simpson (Is) e de Pielou (e) da comunidade da macrofauna invertebrada, nas florestas de Araucária nativa (NF) e reflorestada (RF) no inverno (agosto de 2009) e verão (fevereiro de 2010). Letra maiúscula dentro da mesma variável, na barra, compara entre florestas e letra minúscula compara a mesma variável e floresta entre épocas (Teste LSD, $P \leq 0,05$)

Estes resultados corroboram os de Merlim (2005) e Baretta et al. (2010), os quais também encontraram maior riqueza de grupos da macrofauna do solo, em época de chuva, em floresta preservada com araucária em comparação aos reflorestamentos dessa espécie, degradados ou não pela intervenção antrópica.

De modo geral, a maior riqueza de grupos da macrofauna do solo esteve associada ao ambiente da floresta nativa no verão, onde a maior diversidade da cobertura vegetal, possivelmente, resultou em maior heterogeneidade e quantidade de serapilheira e, consequentemente, melhor oferta de alimento, além de propiciar condições edafoclimáticas favoráveis que minimizam o impacto de condições desfavoráveis como estresse hídrico e oscilação de temperatura, favorecendo o desenvolvimento da comunidade de macrofauna (TIAN et al., 1993; KLADIVKO, 2001; TEWS et al., 2004; WARDLE, 2005; MOÇO et al., 2005; WARDLE et al., 2006; AQUINO et al., 2008; BARETTA et al., 2010).

Maior densidade e riqueza de fauna do solo vêm sendo observadas em solo sob cobertura de floresta natural e em estádios sucessionais mais avançados (floresta secundária) em comparação com áreas de reflorestamentos e pastagens (MOÇO et al., 2005; MENEZES

et al., 2009), inclusive em floresta nativa com *Araucaria angustifolia* em comparação ao reflorestamento desta espécie, sendo esse efeito mais pronunciado quando essa floresta foi submetida à intervenção antrópica (BARETTA et al., 2010). Nesse sentido, Gibson et al. (2011) alertam, com muita propriedade, que a floresta nativa e/ou secundária preservadas são insubstituíveis na tarefa da preservação da biodiversidade tropical o que reforça a necessidade de preservação das áreas de floresta com araucárias, principalmente aquelas em área de Mata Atlântica. Outros autores encontraram maior riqueza e densidade de espécies da macrofauna do solo com a implementação de sistemas agroflorestais em comparação à cobertura de floresta nativa (LIMA et al., 2007) .

Não foram observadas diferenças significativas nos índices ecológicos de diversidade de Shannon (H), Simpson (Is) e Pielou (e) entre a NF e o RF (Figura 2.14), embora a NF tenha apresentado maior riqueza de grupos taxonômicos em relação à RF. A maior associação de alguns grupos de invertebrados do solo na NF, tais como Isoptera (cupins), Hymenoptera (formigas), Coleoptera (besouros) e Chilopoda (lacrarias) que, assumindo escores positivos e maiores em relação aos demais, diminui a equitabilidade entre os grupos, o que se reflete diretamente na diversidade (Figuras 2.15 a e b). Por outro lado, o predomínio de Oligochaeta (minhocas) associado à baixa riqueza de outros grupos taxonômicos, observada na RF, pode estar contribuindo para a redução da equitabilidade e, conseqüentemente, do índice de diversidade. Por isso, em consequência desse efeito, os índices ecológicos de diversidade H, Is e e mostraram fraca associação com a área NF, não seguindo o mesmo padrão da riqueza de grupos taxonômicos que apresentou alta associação com esta floresta (NF) (Figura 2.15 a). Lima et al., 2010, estudando o efeito de uso do solo sobre a diversidade da macrofauna e sua relação com atributos químicos do solo em diferentes agrossistemas, verificaram que, indiferentemente da época de coleta, inverno ou verão, o solo sob cobertura de floresta nativa apresentou os menores valores dos índices de Shannon e Pielou associados à maior dominância de indivíduos do grupo Isoptera. Assim, no presente estudo, considerando-se não só as variáveis da macrofauna do solo, mas também as ambientais explicativas, ficou evidente que a medida de diversidade que melhor representou as áreas de estudo foi a riqueza de grupos taxonômicos em comparação aos outros índices ecológicos (H, Is e e).

2.2.2.3 Análise de Componentes Principais (ACP)

A Análise de Componentes Principais (ACP) revelou que os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2) explicaram 39,3% da variabilidade total dos dados no

inverno, sendo 21,0% explicado pela CP1 e apenas 18,3% pela CP2 (Figura 2.15 a). No verão, a análise das variáveis pela ACP nos dois primeiros eixos explicou 40,6% da variabilidade dos dados (Figura 2.15 b).

Os resultados da ACP evidenciaram uma separação das florestas estudadas, nos quais os grupos da macrofauna do solo e as variáveis ambientais explicativas ocorreram de forma diferenciada entre as florestas com araucária nativa e a reflorestada nas duas épocas de coleta (Figuras 2.15 a e b).

Independente da época de coleta, a área RF apresentou maior densidade total de Oligochaeta (minhocas), especialmente composta por *Ponthonoscolex corethrurus* (espécie nativa do Brasil, mas peregrina nessas áreas) e do gênero exótico *Amyntas* em relação aos demais grupos da macrofauna (Figuras 2.15 a, b e 2.17). Por outro lado, a baixa densidade desses gêneros na área NF é um indicativo do bom estado de preservação dessas áreas, uma vez que essas espécies são consideradas invasoras (BROWN; JAMES, 2007).

Apesar da alta diversidade de minhocas nos trópicos, apenas um número reduzido de espécies tem sido intensivamente estudado e relacionado a processos do solo (FRAGOSO et al., 1997). Todavia, as minhocas são consideradas os “engenheiros do ecossistema” e, na busca por alimento e abrigo, criam canais, galerias e câmaras no perfil e na superfície do solo, trituram e misturam partículas de solo e de matéria orgânica, modificando as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e aumentando a disponibilidade de alimentos para

Figura 2.15 - Relação entre a Componente Principal 1 (CP1) e 2 (CP2), discriminando Florestas de Araucária nativa (**NF**) e reflorestada (**RF**), grupos taxonômicos da macrofauna (→ em *itálico*) e as variáveis ambientais explicativas (→ tracejado) no inverno (a) (agosto de 2009) e no verão (b) (fevereiro de 2010). Ologi: Oligochaeta; Diplo: Diplopoda; Iso: Isopoda; Coleo: Coleoptera; Hym: Hymenoptera; Isopt: Isoptera; Blat: Blattodea; Orth: Orthoptera; Pseudo: Pseudoscorpionidae; Chil: Chilopoda; Opi: Opiliones; Moll: Mollusca; Enchy: Enchytraeidae; Grill: Grilloblatodea; Outros: Outros grupos menos abundantes; Riq: Riqueza; Abun: Abundância; H: índice de diversidade de Shannon; Is: índice de diversidade de Simpson; *e*: equitabilidade de Pielou. Corg: Carbono orgânico; P: Fósforo; Ca: Cálcio; H+Al: Hidrogênio + Alumínio; CSer: Carbono da serapilheira; NSer: Nitrogênio na serapilheira; Umi: Umidade; Pt: Porosidade total; Ma: Macroporosidade; Ds: Densidade; MSS: Massa Seca de Serapilheira; CBM: Carbono da Biomassa Microbiana; Desi: Desidrogenase; *q*CO₂: Quociente metabólico

outros grupos, bem como a capacidade suporte do solo para a produção primária (LEE, 1985; LAVELLE, 1988; BROWN, 1995; DECAËNS et al., 2004). Neste sentido, a maior abundância de minhocas na área RF já é um indicativo da melhoria da qualidade do solo nesse local, principalmente pela presença do gênero *Amyntas* que, embora exótica, vive em solos com maior teor de matéria orgânica e serapilheira (BARETTA et al. 2007b; BROWN et al., 2009). Estes dois gêneros de minhocas (*Amyntas* e *Ponchoscolex*), encontrada na área RF, têm sido já observados em alguns ecossistemas derivados da Mata Atlântica, especialmente áreas com certa intervenção antrópica, e já foram relatados como indicadores de distúrbios em diferentes ecossistemas (FRAGOSO et al., 1997; BURTELOW et al., 1998; BROWN; JAMES, 2006; JAMES; BROWN, 2006; BROWN; JAMES, 2007; MARICHAL et al., 2010), inclusive em florestas de *Araucaria angustifolia* nativa no estado de São Paulo (BARETTA et al., 2007b).

A ACP ainda mostrou, independente da época coletada, que RF esteve mais associada a solos, com maior teor de umidade, porosidade total, atividade microbiana do solo (representada pela desidrogenase) e quociente metabólico (qCO_2), que pode indicar maiores perdas de carbono (Figura 2.15 a e b). Nesta área, o maior teor de umidade do solo proporciona ambiente edáfico mais favorável à colonização por Oligochaeta e desfavorável à maioria de outros grupos da macrofauna (HARADA; BANDEIRA, 1994; PIMENTEL et al., 2006), o que ajudou a explicar sua abundância diferenciada dos outros grupos da macrofauna (Figura 2.15 a e b).

De acordo com Burtelow et al. (1998) a relação entre minhocas e comunidade microbiana do solo é bastante complexa podendo variar com a espécie de minhoca, tipo de solo, disponibilidade e qualidade da matéria orgânica. Assim, a maior abundância de Oligochaeta (*Amyntas* sp. e *Ponchoscolex corethrurus*) (item 2.2.2.5, Figura 2.17) associada à atividade de desidrogenase e qCO_2 na área RF pode sugerir interação entre minhocas e microrganismos do solo, possivelmente indicando perdas de CO_2 (condição de estresse) associadas aos impactos causados pela intervenção antrópica nesse ambiente. Ainda, essa maior abundância de Oligochaeta na área RF pode indicar que estas são pioneiras no preparo desse ambiente, favorecendo, em longo prazo, a colonização por outros grupos da macrofauna, uma vez que são conhecidas por sua capacidade de modificar a estrutura do solo, promover a distribuição de partículas e de matéria orgânica na superfície e no perfil do solo, catalisando a atividade microbiana e, conseqüentemente, criando melhores condições para a colonização por outros componentes bióticos (LAVELLE et al., 1999; BROWN et al., 2000; BARETTA et al., 2007b). É importante ressaltar que a abundância diferenciada de

Oligochaeta, principalmente do gênero *Amyntas* (Figuras 2.15 a e b e 2.17), encontrada em RF, certamente seja em resposta à formação de uma cobertura vegetal no solo, umidade, porosidade e carbono orgânico, já que esse gênero está pouco associado a solos muito perturbados e mais pobres em C, típicos de ecossistemas tropicais (BROWN et al., 2006). Comparada à floresta nativa NF, a área RF é caracterizada pela manutenção de uma cobertura vegetal, menos diversificada, menos densa e com maior luminosidade, inclusive com cobertura de gramínea em locais mais abertos, e de menor cobertura de espécies arbóreas, o que pode ter contribuído para a menor riqueza de grupos da macrofauna.

No inverno, os demais grupos da macrofauna, principalmente Chilopoda (lacrarias), Coleoptera (besouros), Isopoda (tatuzinhos) e Diplopoda (piolho-de-cobra) apresentaram maior associação com a NF, resultando em maior riqueza de grupos taxonômicos nesta floresta (Figura 2.15 a). Estes grupos também foram mais abundantes em florestas de araucária preservada em comparação ao reflorestamento desta espécie, sujeita ou não à intervenção antrópica (MERLIM, 2005; BARETTA et al., 2010). A presença de grupos predadores (Chilopoda e Opilionidae) e saprófagos (Diplopoda e Isopoda), na NF, mesmo na época de inverno, indica maior disponibilidade de alimento relacionado com a maior variedade de cobertura vegetal existente nessa área, o que mantém um microclima menos sujeito a alterações e mais favorável à colonização e desenvolvimento desses grupos (USHER et al., 1982). Além desses, outros grupos se associaram a NF tais como Enchytraeidae (enquitrédeos), Mollusca (moluscos), Pseudoscorpionida (Pseudoescorpiões), Hymenoptera (formigas), entre outros, menos frequentes (Figura 2.15 a).

De modo geral, observou-se que os ambientes de floresta com araucária nativa mais conservada, proporcionaram as melhores condições edáficas para a colonização de grupos da macrofauna, com exceção de Oligochaeta, indicando que esses grupos foram sensíveis às alterações ambientais presentes na área RF, provavelmente relacionadas a mudanças no ambiente solo/serapilheira, principal habitat e fonte de todos os recursos necessários aos invertebrados (LAVELLE et al., 2006).

No inverno, a NF também esteve associada a solos com maior teor de C e N na serapilheira, alto teor de P no solo, principalmente, mas também pela maior capacidade de macroporosidade, densidade do solo e carbono da biomassa microbiana, o que pode explicar a associação da maioria dos atributos da macrofauna com essa área. Os resultados também revelaram algumas associações de grupos a atributos específicos do solo e da serapilheira, por exemplo, Oligochaeta (minhocas) estiveram mais associadas com porosidade total, umidade e aos atributos microbiológicos, quociente metabólico e atividade da enzima desidrogenase,

indicando relação desse importante grupo da fauna do solo com atividade microbiana do solo (discutido anteriormente) na área RF.

Os grupos Isoptera (cupins), Hymenoptera (formigas) e Blattodea (baratas) estiveram fortemente relacionados com os solos mais aerados, favorecendo a presença de insetos sociais que precisam revolver o solo para a confecção de seus ninhos. Já, a presença de Coleoptera (besouros), Chilopoda (lacrarias), Orthoptera (grilos), Opilionida (opiliões), Diplopoda (piolho-de-cobra), Isopoda (tatuzinhos) e outros, principalmente estão associados a solos com maior teor de P e maior teor de C e N na serapilheira, recursos importantes para a manutenção de grupos funcionais detritívoros e predadores (Figura 2.15 a). A maior frequência de Enchytraeidae (enquitreídeos), Pseudoscorpionida (pseudo-escorpiões) e Mollusca (moluscos), no entanto, esteve associada a solos com maior densidade. A ocorrência conjunta e mais frequente de predadores (topo da cadeia) e saprófagos, associada com o teor de P no solo e de C e N na serapilheira indica uma melhoria na qualidade biológica do solo (PAOLETTI, 1999) e sugere que a serapilheira representa uma reserva de nutrientes e energia que estimula e protege a macrofauna do solo contra predadores. O atributo microbiológico CBM, apesar de associado com a área NF, independente da época de coleta, ficou disposto no centro (valor próximo a zero) enquanto que o conteúdo de serapilheira (MSS), no inverno, assumiu valores negativos, não se associando especificamente a nenhuma das áreas estudadas, provavelmente, pela similaridade desse atributo nas áreas (Figura 2.15 a). Isso acontece porque, embora a floresta nativa com araucária apresente maior quantidade e diversidade de serapilheira, ela é menos densa comparada à coletada na área reflorestada em que, embora menos diversa, predomina serapilheira de araucária de maior densidade.

No verão, com exceção de Oligochaeta, os demais grupos da macrofauna do solo apresentaram maior associação com a NF, principalmente Chilopoda, Hymenoptera, Isoptera, Coleoptera, Opilionida, Orthoptera e o grupo “Outros”, que mais fortemente se associaram com esta área, além da abundância de grupos taxonômicos (Figura 2.15 b). Os grupos Enchytraeidae, Diplopoda, Pseudoscorpionida e Mollusca não mostraram qualquer associação, contribuindo pouco para a separação das áreas amostradas, indicando que, no verão, houve distribuição mais uniforme desses grupos entre a floresta nativa e reflorestada com araucária.

A NF também se caracterizou por apresentar maior valor do atributo microbiológico CBM, dos químicos [(carbono da serapilheira (CSera), fósforo (P) e cálcio (Ca)] e dos físicos (macroporosidade (Ma), densidade do solo (Ds) e massa seca de serapilheira (MSS) (Figura 2.15 b), proporcionando condições edáficas mais adequadas para associação da maioria dos

atributos da macrofauna com essa área. A área NF é caracterizada pela manutenção de uma cobertura vegetal mais diversificada e madura, o que permite maior aporte de serapilheira, densidade de raízes, redução das oscilações térmicas no solo e ciclagem de nutrientes, essencial para a manutenção de uma diversificada comunidade edáfica (LAVELLE; SPAIN, 2001; MALUCHE-BARETTA et al., 2006; AQUINO et al., 2008; BARETTA et al., 2010). Por outro lado, a atividade da fauna do solo também pode influenciar positivamente na criação e manutenção da estrutura do solo, regular a decomposição da matéria orgânica e a mineralização de nutrientes, e pode, em longo prazo, influenciar a reciclagem e proteção da matéria orgânica, fatores importantes na manutenção da fertilidade do solo e produção vegetal (LAVELLE et al., 2003; BARROS et al., 2004; BROWN et al., 2009; BARETTA et al., 2011).

Os resultados da ACP também revelaram a associação dos grupos Chilopoda, Hymenoptera, Isoptera, Orthoptera e Opilionida a CSera, Ma e CBM, enquanto que o grupo Coleoptera apresentou forte associação com o teor de P no solo; Blattodea e o grupo “Outros” com a MSS e Mollusca e Diplopoda que ficaram associados a maiores valores de Ca no solo (Figura 2.15 b), provavelmente devido à necessidade deste elemento para a construção de sua concha e exoesqueleto, respectivamente (ALVES et al., 2006); Enchytraeidae e Pseudoscorpionida com a atividade de desidrogenase; e a presença de Oligochaeta, principalmente em solos com maior teor de umidade, porosidade total e carbono orgânico o que corresponde às necessidades para o desenvolvimento e atividade desse grupo (BROWN; DOUBE, 2004) (Figura 2.15 b).

Observa-se que nas florestas mais preservadas, com araucárias nativas, não houve influência de um grupo específico da macrofauna, porém ocorreu uma contribuição conjunta dos atributos da macrofauna e das variáveis ambientais, separando esta área das demais devido à melhoria da qualidade do solo evidenciada por tais variáveis. Provavelmente, essa situação decorre da complexidade das relações ecológicas existentes entre as comunidades de macroinvertebrados do solo e sua relação com as variáveis ambientais (BARETTA et al., 2010).

2.2.2.4 Análise Canônica Discriminante (ACD)

O teste estatístico multivariado de Wilks' Lambda para os atributos da macrofauna invertebrada e variáveis ambientais indicou diferenças significativas entre época de amostragens e áreas estudadas ($P < 0,0001$) quanto à Função Canônica Discriminante 1

(FCD1) e 2 (FCD2), sendo assim realizada uma ACD para cada época de amostragem (Figuras 2.16 a e b).

Figura 2.16 - Coeficientes Canônicos Padronizados (CCP) da Função Canônica Discriminante 1 e 2 (FCD1 e FCD2), discriminando Florestas de Araucária nativa (NF) e reflorestada (RF), considerando todos os atributos das variáveis ambientais e da macrofauna do solo, analisados no Inverno (agosto de 2009) (a) e Verão (fevereiro de 2010) (b). O símbolo cheio representa o valor médio de CCP (centróide) para cada área (n=45)

O modelo estatístico utilizado na ACD explicou praticamente a totalidade da variabilidade dos dados, nos quais a FCD1 explicou 94,71% no inverno e 91,87 % no verão (Figuras 2.16 a e b). Ainda foi observada alta correlação canônica para a época seca (inverno) (0,95) e época chuvosa (verão) (0,93) ($P < 0,0001$). Altos valores de correlação canônica indicam elevada associação entre os atributos analisados e as áreas de coleta desses atributos (BARETTA et al., 2010).

Nas (Figura 2.16 a e b), estão indicados os coeficientes canônicos padronizados (CCP) da FCD1 e FCD2, para as duas áreas com araucária amostradas, considerando todos os atributos ambientais e da macrofauna edáfica analisados. Pelo resultado da ACD observou-se, nas duas épocas de amostragens, que a FCD1 separou nitidamente a área NF, com maiores valores de CCP, da área RF (Figura 2.16 a e b). A distribuição polarizada entre as áreas NF e RF indica alta dissimilaridade em relação aos atributos ambientais e da macrofauna edáfica entre as áreas estudadas, sendo que os atributos edáficos analisados foram eficientes em detectar diferenças entre as florestas.

Entretanto, o coeficiente da taxa de discriminação paralela (TDP) é considerado o parâmetro mais adequado para avaliar a real eficiência de cada um dos atributos edáficos analisados para a separação entre as áreas. Assim, os valores positivos de TDP indicam efeitos de separação entre as áreas quanto ao atributo analisado, enquanto que os negativos indicam semelhanças entre elas (BARETTA et al., 2008). De maneira geral, o valor de TDP das variáveis ambientais (Tabela 2.2) e da macrofauna (Tabela 2.3) foi diferenciado para cada época de amostragem

Na amostragem de inverno, dentro da FCD1, os atributos umidade do solo (0,28), Ssera (0,18), Pt (0,16), K (0,11), C-CO₂ (0,10), CBM (0,07), pH (0,07) e P (0,06) foram os que apresentaram os maiores valores positivos de coeficientes de TDP, respectivamente, sendo os que mais contribuíram para a separação entre as áreas estudadas (Tabela 2.2). As variáveis ambientais consideradas indicadores de mudanças nas áreas na FCD1 no verão foram Pt (0,27), umidade do solo (0,20), Ssera (0,17), H+Al (0,10), P (0,08) e Ma (0,07), respectivamente. Assim, observou-se que diversos atributos ambientais do solo foram importantes na separação das áreas amostradas (Tabela 2.2), demonstrando potencial para serem usados como indicadores, uma vez que contribuíram mais para a separação entre as florestas (Figura 2.16 a).

No presente trabalho, o teor de umidade do solo foi um dos principais atributos na separação das áreas. Nessas áreas, o teor de umidade está mais relacionado com a densidade

Tabela 2.2 - Valores dos Coeficientes Canônicos Padronizados (CCP), correlação canônica (r) e Taxa de Discriminação Paralela (TDP: $r \times \text{CCP}$) referentes à Análise Canônica Discriminante (ACD) quanto às variáveis ambientais, independentemente da época estudada. Valores em negrito representam os atributos mais importantes para discriminar as áreas de estudo ($n=45$)

	FCD1 (Inverno)			FCD1 (Verão)		
Variáveis ambientais	r	CCP	TDP	r	CCP	TDP
Carbono da biomassa microbiana (CBM)	0,06	1,24	0,07	0,15	0,29	0,04
Respiração basal (C-CO ₂)	-0,07	-1,46	0,10	-0,03	-0,64	0,02
Quociente metabólico ($q\text{CO}_2$)	-0,16	0,57	-0,09	-0,21	-0,17	0,04
Atividade de desidrogenase (Desi)	-0,13	0,32	-0,04	-0,09	0,15	-0,01
pH do solo em CaCl ₂ (pH)	-0,06	-1,16	0,07	-0,04	-1,19	0,05
Carbono orgânico do solo (C-org)	-0,04	-0,25	0,01	-0,02	0,30	-0,01
Fósforo (P)	0,17	0,35	0,06	0,23	0,35	0,08
Potássio (K)	0,17	0,63	0,11	0,14	0,37	0,05
Magnésio (Mg)	0,01	0,44	0,01	0,05	-0,01	0,00
Alumínio (Al)	-0,02	0,41	-0,01	-0,11	0,97	-0,11
Hidrogênio + Alumínio (H + Al)	-0,04	-0,46	0,02	-0,07	-1,35	0,10
Carbono na serapilheira (Csera)	0,08	-0,93	-0,07	0,11	-0,41	-0,04
Nitrogênio na serapilheira (Nsera)	0,26	-0,02	0,00	0,33	-0,18	-0,06
Enxofre na serapilheira (Ssera)	0,17	1,08	0,18	0,22	0,78	0,17
Umidade	-0,35	-0,80	0,28	-0,31	-0,63	0,20
Densidade (Ds)	0,06	-0,50	-0,03	0,07	-0,86	-0,06
Macroporosidade (Ma)	0,11	0,29	0,03	0,14	0,46	0,07
Porosidade total (Pt)	-0,18	-0,86	0,16	-0,23	-1,09	0,25
Massa de serapilheira seca (MSS)	-0,01	0,47	0,00	0,11	0,14	0,02

da cobertura vegetal e permanência de uma camada mais espessa de serapilheira, resultando em menor oscilação de temperatura, além da influência da textura do solo. A porosidade total (Pt) do solo está relacionada com a sua capacidade em proporcionar ao sistema radicular das plantas condições favoráveis ao seu crescimento e desenvolvimento sendo muito influenciada pela estrutura do solo. Já o teor de enxofre na serapilheira pode variar de acordo com a qualidade e diversidade de plantas nas áreas de estudo, o mesmo acontecendo com o K, que é facilmente lixiviável do tecido vegetal para o solo. Outros atributos relacionados com o carbono do solo, tais como carbono da biomassa microbiana (CBM) e atividade microbiana (C-CO₂), também contribuíram na separação das áreas, além de P e pH que modulam a ação dos anteriores, confirmando a participação destes como indicadores de qualidade do solo (WARDLE; HUNGRIA, 1994; BARETTA et al., 2005, 2010; MALUCHE-BARETTA et al., 2006).

Na amostragem de inverno, dentro da FCD1, os atributos da macrofauna que apresentaram os maiores valores positivos de coeficientes TDP (Tabela 2.3), foram riqueza de grupos taxonômicos (0,13), Oligochaeta (0,03), Chilopoda (0,03) e Coleoptera (0,02), respectivamente. Já, no verão, dentro da FCD1, os atributos riqueza de grupos taxonômicos (0,15), Mollusca (0,06), e Oligochaeta (0,04) apresentaram os maiores valores positivos de coeficientes TDP (Tabela 2.3). Baretta et al. (2010), também encontraram valores positivos de coeficientes TDP para Chilopoda e Mollusca considerados indicadores de mudanças em áreas com araucária. Independente da época de coleta, o grupo Oligochaeta e riqueza de grupos foram os atributos da macrofauna que melhor indicaram mudanças nas áreas, dentro da FCD1 (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 - Valores dos coeficientes canônicos homogêneos (CCP), correlação canônica (r) e Taxa de Discriminação Paralela (TDP: $r \times CCP$) referentes à análise canônica discriminante (ACD) quanto aos atributos da macrofauna, nas duas épocas de coleta, independentemente da área avaliada. Valores em negrito representam os atributos mais importantes para discriminar as áreas de estudo (n=45)

	FCD1 (Inverno)			FCD1 (Verão)		
Grupos mais frequentes da macrofauna	r	CCP	TDP	r	CCP	TDP
Coleoptera	0,04	0,50	0,02	0,14	0,05	0,01
Orthoptera	0,04	0,13	0,01	0,00	-0,19	0,00
Hymenoptera	0,05	0,08	0,00	0,11	0,02	0,00
Isoptera	0,02	-0,30	-0,01	0,05	-0,24	-0,01
Diplopoda	0,02	-0,16	0,00	0,00	-0,03	0,00
Chilopoda	0,15	0,18	0,03	0,16	0,00	0,00
Isopoda	0,10	0,00	0,00	0,01	0,13	0,00
Opiliones	0,01	-0,13	0,00	-0,01	-0,50	0,00
Pseudoscorpionida	0,03	-0,26	-0,01	-0,04	-0,13	0,00
Mollusca	0,10	0,09	0,01	0,14	0,41	0,06
Blattodea	0,06	-0,16	-0,01	0,07	-0,21	-0,01
Grilloblattodea	0,06	0,14	0,01	0,00	0,00	0,00
Enchytraeidae	-0,06	-0,09	0,01	-0,12	-0,17	0,02
Oligochaeta	-0,15	-0,21	0,03	-0,19	-0,22	0,04
Outros ¹	-0,01	-0,22	0,00	0,07	0,18	0,01
Outros atributos da macrofauna						
Abundância	0,03	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00
Riqueza de grupos taxonômicos (Riqueza)	0,11	1,18	0,13	0,17	0,91	0,15
Índice de Diversidade de Shannon (H)	0,06	-1,28	-0,08	0,06	-1,24	-0,08
Índice de Diversidade de Simpson (Is)	0,04	-1,07	-0,05	0,03	0,08	0,00
Índice de Pielou (e)	0,03	2,22	0,06	0,01	1,26	0,01

¹ Outros= soma de grupos menos frequentes

As demais variáveis ambientais e atributos da macrofauna foram menos sensíveis, assumindo menores valores de TDP e contribuíram menos na função indicada para a separação entre as áreas (Tabelas 2.2 e 2.3). Este resultado confirma a indicação do grupo Oligochaeta como importante na discriminação entre as florestas de araucária, o qual foi identificado a nível de espécie no presente estudo (item 2.2.2.5, figura 2.17).

Nas duas épocas de amostragens (inverno e no verão), observou-se, através dos valores de TDP, que alguns atributos ambientais e da macrofauna foram bem eficientes para separar as áreas estudadas, apresentando potencial como indicadores, pois proporcionaram separação entre as áreas, especialmente quando se possui um maior número de repetições das amostras e dos ecossistemas amostrados (repetições verdadeiras), como no presente trabalho (ROSSI et al., 2006). Assim, para uma avaliação eficiente da qualidade do solo em florestas com araucárias nativas e reflorestadas há a necessidade do uso, em conjunto, de indicadores físicos, químicos e microbiológicos, acrescidos da macrofauna, que desempenham um importante papel nesse ecossistema (BARETTA et al., 2008, 2010).

2.2.2.5 Diversidade de minhocas

A diversidade de minhocas, nas áreas de estudo, foi avaliada por meio de uma Análise de Componentes Principais (ACP). Esta análise revelou que os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2) explicaram 64,2% da variabilidade total dos dados de abundância de espécies de minhocas no inverno, sendo 35,9% explicados pela CP1 e 28,3% pela CP2 (Figura 2.17a). No verão, houve um aumento na explicação da variabilidade dos dados, com 77,5%, sendo 51,1% e 26,4% explicados pela CP1 e CP2, respectivamente (Figura 2.17 b).

Os resultados da ACP mostram que, tanto no inverno (Figura 2.17a) quanto no verão (Figura 2.17 b), houve nítida separação entre as florestas com araucária nativa (NF) e a reflorestada (RF), onde as espécies de minhocas e as variáveis explicativas assumiram distribuição diferenciada entre elas. Nesse sentido, é importante destacar que tanto RF quanto NF ficaram dispostas no mesmo local, independente da coleta de inverno (Figura 2.17 a) ou de verão (Figura 2.17 b), mostrando que o que mudou efetivamente entre a época do ano foi a composição de algumas poucas espécies de minhocas em cada área.

Figura 2.17 - Relação entre as Componentes Principais 1 e 2 (CP1 e CP2) da Análise de Componentes Principais (ACP), discriminando Florestas de Araucária nativa (NF) e reflorestada (RF), espécies, gêneros e famílias de minhocas (→ em itálico) e as variáveis ambientais explicativas (---→ tracejado) em duas épocas contrastantes (a) inverno (agosto de 2009) e (b) verão (fevereiro de 2010). Pcor: *Ponthoscolex corethrurus*; Asp: Gênero *Amyntas*; Agra: *Amyntas gracilis*; Acort: *Amyntas corticis*; Dgra: *Dichogaster gracilis*; Ubras: *Urobenus brasiliensis*; Fsp1: *Fimoscolex* sp1; Glsp1: *Glossoscolex* sp1; Andsp: Gênero *Andiorrhinus*; Glsp2: *Glossoscolex* sp2; Msp: Gênero *Meridrilus*; Acjuv: indivíduos juvenis da família Acanthodrilidae; Glosjuv: Indivíduos juvenis da família Glossoscolecidae; Megjuv: Indivíduos juvenis da família Megascolecidae; Juv: Juvenis; Nid: Espécies não identificadas. Corg: Carbono orgânico; P: Fósforo; K: Potássio; CSer: Carbono da serapilheira; NSer: Nitrogênio da serapilheira; Umi: Umidade; Ma: Macroporosidade; Ds: Densidade; MSS: Massa Seca de Serapilheira; CBM: Carbono da Biomassa Microbiana; Desi: Desidrogenase; CCO₂: Respiração basal; pH CaCl₂: pH em Cloreto de Cálcio

No inverno, observou-se que as espécies *Ponthoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae), *Amyntas corticis* (Megascolecidae), *Amyntas gracilis* (Megascolecidae), *Dichogaster gracilis* (Acanthodrilidae) e os gêneros *Amyntas* e *Andiorrhinus* (Glossoscolecidae) ficaram associadas à RF devido aos maiores valores de umidade e respiração do solo (C-CO₂) (Figura 2.17 a). Já em NF, as espécies *Urubenus brasiliensis* (Glossoscolecidae), *Glossoscolex* sp.1 e o gênero *Meridrilus* (Glossoscolecidae), apresentaram maior abundância, além de indivíduos juvenis das famílias Glossoscolecidae e Megascolecidae. Isso é explicado pelo fato de a NF apresentar maiores teores de carbono orgânico (Corg), fósforo (P), potássio (K), carbono da biomassa microbiana (CBM) e macroporosidade (Ma) do solo, além de carbono (C) e nitrogênio (N) da serapilheira (Figura 2.17 b). As espécies *Fimoscolex* sp.1, *Glossoscolex* sp.2 e indivíduos juvenis da família Acanthodrilidae e juvenis, em geral, ocorreram de forma semelhante e não ficaram associados a nenhuma das florestas, embora relacionadas, principalmente aos maiores valores de densidade (Ds), atividade da desidrogenase (Desi) e massa seca de serapilheira (MSS). As espécies não identificadas (Nid) ficaram mais relacionadas com valores elevados de pH do solo (Figura 2.17a).

No verão, as espécies *P. corethrurus*, *A. corticis*, *A. gracilis* e o gênero *Amyntas* permaneceram associadas à RF, repetindo os resultados do inverno, especialmente devido aos maiores teores de umidade, atividade da Desi, Corg e MSS (Figura 2.17 b). *A. corticis* ficou fortemente relacionada aos maiores valores de Corg e pH do solo. Outras espécies, tais como, *U. brasiliensis*, o gênero *Meridrilus* e indivíduos jovens de Acanthodrilidae, ficaram dispostas no centro da Figura 2.17 b, não tendo forte associação com nenhuma das áreas, apesar de serem um pouco mais abundantes em RF. Já em NF foi mais abundante a espécie *Glossoscolex* sp.1, associada aos teores de CBM, Csera, Nsera e densidade do solo, enquanto as espécies *Fimoscolex* sp.1 e *Dichogaster gracilis*, além do gênero *Andiorrhinus*, indivíduos juvenis de Glossoscolecidae, juvenis em geral e espécies não identificados ficaram mais associadas, especialmente aos teores de K e macroporosidade do solo (Figura 2.17 b).

A associação de *P. corethrurus* e *Amyntas* spp. ao reflorestamento, tanto no inverno quanto no verão, é um forte indicativo que estas espécies são indicadoras de florestas de araucária que já sofreram distúrbios antropogênicos (BARETTA et al., 2007b) e corroboram os resultados de outros autores Brown e James (2006), que estudaram espécies de minhocas em diferentes ecossistemas antropizados no Estado de São Paulo e no Brasil (JAMES; BROWN, 2008; MARICHAL et al., 2010). A maior associação de *P. corethrurus*, especialmente a solos com valores mais elevados de umidade em RF, pode indicar maior favorecimento desta

espécie nesse ambiente. Nunes et al. (2006) verificaram que, em área de várzea úmida com pastagem, 95% das minhocas amostradas eram *P. corethrurus*, enquanto que Azevedo et al. (2010), encontraram maior densidade de *P. corethrurus* em associação a solos de brejo e de mata, com alta umidade, em comparação a cultivos agrícolas e pastagem.

No presente estudo foram encontradas espécies nativas, tais como: *Fimoscolex* sp.1, *Glossoscolex* sp.1, *Glossoscolex* sp.2, *Urobenus brasiliensis*, *Meridrilus* sp. e *Andiorrhinus* sp. (aproximadamente 25 cm de comprimento), em sua maioria associados a NF, caracterizada pela ausência de distúrbio antrópico e maior diversidade de cobertura vegetal. O maior predomínio de minhocas dos gêneros *Urobenus* e *Glossoscolex*, principalmente foram relatados por Sautter et al. (2007) em florestas nativas do norte do Paraná. No Estado de São Paulo, as minhocas dos gêneros *Fimoscolex*, *Glossoscolex* e *Urobenus brasiliensis* foram mais abundantes em florestas naturais de araucária (BARETTA et al., 2007b), com exceção de *Andiorrhinus* spp. (minhocuçu). Esta última foi relatada por Lima (2011) associada a plantios de *Pinus* spp., no município de Colombo-PR.

Dentre as espécies exóticas e/ou peregrinas de minhocas, foram encontradas *P. corethrurus*, *Amyntas gracilis*, *A. corticis* e *Dichogaster gracilis*, que são mais adaptadas às alterações edáficas, em relação às nativas (NAHMANI et al., 2003). As espécies *P. corethrurus* e *Amyntas gracilis* foram as mais abundantes associadas a plantios de *Pinus*, Araucária e em Floresta Ombrófila Mista (LIMA, 2011), enquanto que *Amyntas corticis* foi a mais abundante em Floresta de araucária natural e sob diferentes tipos de intervenção antrópica (BARETTA et al., 2007b). Diversos gêneros de *Dichogaster* foram relados por Azevedo et al. (2010) associadas a solos de cultivos no norte do Paraná.

2.3 Considerações Finais

Este estudo mostrou que o estado de conservação da Floresta de Araucária e as características físico-químicas e microbiológicas do solo, foram condições ambientais determinantes e influenciaram a distribuição da comunidade da macrofauna.

A repetição dos tratamentos (Floresta de Araucária) em diferentes regiões do Estado de São Paulo e o uso, em conjunto, dos atributos físico-químicos e microbiológicos do solo, acrescidos da macrofauna, aumentam a robustez na avaliação da qualidade do solo.

A floresta com araucária nativa NF detentora de maior diversidade florística proporcionou maior diversidade de grupos da macrofauna, com maior expressividade no verão.

Os índices de diversidade de Shannon (H), Simpson (Is) e de uniformidade de Pielou (e) não foram sensíveis à intervenção antrópica nas florestas com araucária.

A floresta com araucária nativa NF apresentou, independente da época de coleta, a maior riqueza de grupos da macrofauna

O reflorestamento (menor diversidade florística) apresentou maior abundância de espécies exóticas (*Amyntas* spp. e *Ponthoscolex corethrurus*) associadas a solos com maior atividade microbiana, porosidade total e umidade do solo, enquanto que na floresta nativa a ocorrência de espécies nativas foi maior.

As espécies *Ponthoscolex corethrurus* e *Amyntas* spp., principalmente, ficaram associadas à RF o que demonstra o seu potencial como indicadores de distúrbios em Florestas de araucárias.

A aplicação do coeficiente de TDP, resultado da ACD, mostrou que os atributos mais promissores para separação entre as áreas com araucárias foram Oligochaeta, Chilopoda, Mollusca, riqueza de grupos, umidade do solo, porosidade total, teor de enxofre na serapilheira, C-CO₂, CBM, pH, P, K e H+Al.

A manutenção da cobertura vegetal na floresta nativa com araucária (NF) com maior diversidade florística parece ser o caminho certo na manutenção e melhoria das condições do solo e consequente aumento da diversidade de grupos da macrofauna edáfica.

Referências

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

ALVES, M.V; BARETTA, D.; CARDOSO, E.J.B.N. Fauna edáfica em diferentes sistemas de cultivo no Estado de São Paulo. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 5, p. 33-43, 2006.

ANDERSON, J.M.; INGRAM, J.S.I. **Tropical soil biology and fertility, a handbook of methods**, 2nd ed. Wallingford: CAB International, 1993. 171 p.

ANDERSON, T.H.; DOMSCH, K.H. The metabolic quotient for CO₂ (*q*CO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 25, p. 393-395, 1993.

ANTUNES, S.C.; PEREIRA, R.; SOUSA, J.P.; SANTOS, M.C.; GONÇALVES, F. Spatial and temporal distribution of litter arthropods in different vegetation covers of Porto Santo Island (Madeira Archipelago, Portugal). **European Journal of Soil Biology**, New Jersey, v. 44, p. 45-56, 2008.

AQUINO, A.M.; CORREIA, M.E.F.; ALVES, M.V. Diversidade da macrofauna edáfica no Brasil. In: MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O.; BRUSSAARD, L. **Biodiversidade do solo em ecossistemas brasileiros**. Lavras: Ed. UFLA, 2008. p. 143-170

AQUINO, A.M.; SILVA, R.F.; MERCANTE, F.M.; CORREIA, M.E.F.; GUIMARÃES, M.F.; LAVELLE, P. Invertebrates soil macrofauna under different ground cover plants in the no-till system in the Cerrado. **European Journal of Soil Biology**, New Jersey, v. 44, p. 191-197, 2008.

AZEVEDO, P.T.M.; BROWN, G.G.; BARETTA, D.; PASINI, A.; NUNES, D.H. Populações de minhocas amostradas por diferentes métodos de coleta (elétrico, químico e manual) em ecossistemas da região de Londrina, Paraná, Brasil. **Acta Zoológica Mexicana**, México, n. 2, p. 79-93, 2010.

BARETTA, D. **Fauna do solo e outros atributos edáficos como indicadores da qualidade ambiental em áreas com *Araucaria angustifolia* no Estado de São Paulo**. 2007. 158 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

BARETTA, D., BROWN, G.G., CARDOSO, E.J.B.N. Potencial da Macrofauna e outras variáveis edáficas como indicadores da qualidade do solo em áreas com *Araucaria angustifolia*. **Acta Zoológica Mexicana**, Mexico, v.2, p.135-150, 2010.

BARETTA, D., MALUCHE-BARETTA, C.R.D.M.; CARDOSO, E.J.B.N. Análise multivariada de atributos microbiológicos e químicos do solo em florestas com *Araucaria angustifolia*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2683-2691, 2008.

BARETTA, D.; BRESCOVIT, A.D.; KNYSACK, I.; CARDOSO, E.J.B.N. Trap and soil monolith sampled edaphic spiders (Aracnida: Araneae) in *Araucaria angustifolia* forest. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 64, n. 4, p. 384-392, 2007a.

BARETTA, D.; BROWN, G.G.; JAMES, S.W.; CARDOSO, E.J.B.N. Earthworm populations sampled using collection methods in Atlantic Forests with *Araucaria angustifolia*. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 64, p. 384-392, 2007b.

BARETTA, D.; SANTOS, J.C.P.; FIGUEIREDO, S.R.; KLAUBERG-FILHO, O. Efeito do monocultivo de pinus e da queima do campo nativo em atributos biológicos do solo no planalto sul catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 715-724, 2005.

BARETTA, D.; SANTOS, J.C.P.; SEGAT, J.C.; GEREMIA, E.V.; OLIVEIRA-FILHO, L.C.L.; ALVES, M. V. Fauna edáfica e qualidade do solo. In: KLAUBERG-FILHO, O.; MAFRA, A.L.; GATIBONI, L.C. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. v. 7, p. 141-192.

BARROS, E.; GRIMALDI, M.; SARRAZIN, M.; CHAUVEL, A.; MITJA, D.; DESJARDINS, T.; LAVELLE, P. Soil physical degradation and changes in macrofaunal communities in Central Amazonia. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 26, p. 157-168, 2004.

BASTIDA, F., ZSOLNAY, A., HERNANDEZ, T., GARCIA, C. Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective. **Geoderma**, Amsterdam, v. 147, p. 159-171, 2008.

BONKOWSKI, M.; VILLENAVE, C.; GRIFFITHS. Rhizosphere fauna: the functional and structural diversity of intimate interactions of soil fauna with plant roots. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 321, p. 213-233, 2009.

BROWN, G.G. How do earthworms affect microfloral and faunal community diversity? **Plant Soil**, Dordrecht, v. 170, p. 209-231, 1995.

BROWN, G.G.; DOUBE, B. M. Functional interactions between earthworms, microorganisms, organic matter and plants. In: EDWARDS, C.A. (Ed.). **Earthworms ecology**. Boca Raton: CRC Press, 2004. p. 213-239.

BROWN, G.G.; JAMES, S.W. Earthworm biodiversity in São Paulo State, Brazil. **European Journal of Soil Biology**, New Jersey, v. 42. p. S145-S149, 2006.

_____. Ecologia, biodiversidade e biogeografia das minhocas no Brasil. In: BROWN, G.G.; FRAGOSO, C. (Ed.). **Minhocas na América Latina: biodiversidade e ecologia**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. p. 297-381.

BROWN, G.G.; BAROIS, I.; LAVELLE, P. Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains. **European Journal of Soil Biology**, New Jersey, v. 36, p. 177-198, 2000.

BROWN, G.G.; MASCHIO, W.; FROUFE, L.C.M. **Macrofauna do solo em sistemas agroflorestais e Mata Atlântica em regeneração nos municípios de Barra do Turvo, SP, e Adrianópolis, PR**. Colombo: Embrapa Florestas, 2009. 51 p. (Embrapa Floresta. Documentos, 184).

BROWN, G.G.; JAMES, S.W.; PASINI, A.; NUNES, D.H.; BENITO, N.P.; MARTINS, P.T.; SAUTTER, K.D. Exotic, peregrine and invasive earthworms in Brazil: diversity, distribution and effects on soils and plants. **Caribbean Journal of Science**, Puerto Rico, v. 42, n. 2, p. 339-358, 2006.

BURTELOW, A.E.; BOHLEN, P.J.; GROFFMAN, P.M. Influence of exotic earthworm invasion on soil organic matter, microbial biomass and denitrification potential in forest soils of the northeastern United States. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 9, p. 197-202, 1998.

CASIDA JR., L.E.; KLEIN, D.A.; SANTORO, T. Soil dehydrogenase activity. **Soil Science**, Philadelphia, v. 98, p. 371-376, 1964.

CRUZ-CASTILLO, J.G.; GANESHANANDAM, S.; MACKEY, B.R.; LAWES, G.S.; LAWOKO, C.R.O.O.; WOOLLEY, D.J. Applications of canonical discriminant analysis in horticultural research. **HortScience**, Alexandria, v. 29, p. 1115-1119, 1994.

DECAËNS, T.; JIMÉNEZ, J.J.; BARROS, E.; CHAUVEL, A.; BLANCHART, E., FRAGOSO, C.; LAVELLE, P. Soil macrofauna communities in permanent pastures derived from tropical forest or savanna. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 103, p. 301-312, 2004.

DECAËNS, T.; LAVELLE, P.; JIMÉNEZ, J.J.; ESCOBAR, G.; RIPPSTEIN, G.; SCHNEIDMADL, J.; SANZ, J.I.; HOYOS, P.; THOMAS, R.J. Impacto del uso de la tierra en la macrofauna del suelo de los Llanos Orientales de Colombia. In: JIMÉNEZ, J.J.; THOMAS, R.J. (Ed.). **El arado natural**: las comunidades de macroinvertebrados del suelo en las savanas neotropicales de Colombia. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical, 2003. p. 21-45. (Publicación CIAT, 336).

DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWARD, B.A. (Ed.). **Defining soil quality for sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21. (SSSA. Special Publication, 35).

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solo, 1997. 212 p.

EMBRAPA Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

FARJON, A. *Araucaria angustifolia*. In: IUCN 2009. **IUCN Red List of Threatened Species. 2006**. Disponível em: <<http://www.iucnredlist.org/details/32975/>>. Acesso em: 06 mar. 2010.

FRAGOSO, C.; BROWN, G.G.; PATRÓN, J.C.; BLANCHART, E.; LAVELLE, P.; PASHANASI, B.; SENAPATI, B.; KUMAR, T. Agricultural intensification, soil biodiversity and agroecosystem function in the tropics: the role of earthworms. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 6, p. 17-35, 1997.

FRIGHETTO, R.T.S.; VALARINI, P.J. (Cord.). **Indicadores biológicos e bioquímicos da qualidade do solo**: manual técnico. Jaguariúna: EMA, 2000. 198 p. (Documentos, 21).

GIBSON, L.; LEE, T.M.; KOH, L.P.; BROOK, B.W.; GARDNER, T.A.; BARLOW, J.; PERES, C.A.; BRADSHAW, C.J.A.; LAURENCE, W.F.; LOVEJOY, T.E.; SODHI, N.S. Primary forests are irreplaceable for sustaining tropical biodiversity. **Nature**, London, v. 478, p. 378-383, 2011.

HARADA, A.Y.; BANDEIRA, A.G. Abundância e estratificação de invertebrados em solo argiloso sob floresta e plantios arbóreos na Amazônia central, durante a estação seca. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Zoológica**, Belém, v. 10, p. 235-250, 1994.

JAMES, S.W.; BROWN, G.G. Earthworm ecology and biodiversity in Brazil. In: MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O.; BRUSSAARD, L. (Ed.). **Soil biodiversity in Amazonian and other Brazilian ecosystems**. Wallingford: CABI, 2006. p. 56-116.

_____. Ecologia e diversidade de minhocas no Brasil. In: MOREIRA, F.; SIQUEIRA, J.O.; BRUSSAARD, L. **Biodiversidade do solo em ecossistemas brasileiros**. Lavras: Editora UFLA, 2008. p. 193-276.

KLADIVKO, E.J. Tillage systems and soil ecology. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, p. 61-76, 2001.

KRONKA, F.J.N.; NALON, M.A.; MATSUKUMA, C.K.; KANASHIRO, M.M.; YWANE, M.S.S.; PAVÃO, M.; DURIGAN, G.; LIMA, L.M.P.R.; GUILLAUMON, J.R.; BAITELLO, J.B.; BORGO, S.C.; MANETTI, L.A.; BARRADAS, A.M.F.; FUKUDA, J.C.; SHIDA, C.N.; MONTEIRO, C.H.B.; PONTINHAS, A.A.S.; ANDRADE, G.G.; BARBOSA, O.; SOARES, A.P.; JOLY, C.A.; COUTO, H.T.Z. **Inventário florestal da vegetação natural do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Florestal, 2005. 200 p.

LAVELLE, P. Earthworm activities and the soil system. **Biological Fertility of Soils**, Berlin, v. 6, p. 237-251, 1988.

LAVELLE, P.; SPAIN, A. **Soil ecology**. Dordrecht: Kluwer Academic, 2001. 654 p.

LAVELLE, P.; SENAPATI, B.K.; BARROS, E. Soil macrofauna. In: SCHROTH, G.; SINCLAIR, F.J. (Ed.) **Trees, crops and soil fertility**. Wallingford: CABI, 2003. p. 303-323.

LAVELLE, P.; DECAËNS, T.; AUBERT, M.; BAROT, S.; BLOUIN, M.; BUREAU, F.; MARGERIE, P.; MORA, P.; ROSSI, J.P. Soil invertebrates and ecosystem services. **European Journal of Soil Biology**, New Jersey, v. 42, S3-S15, 2006.

LAVELLE, P.; PASHANASI, B.; CHARPENTIER, F.; GILOT, C.; ROSSI, J.P.; DEROUARD, L.; ANDRE, J.; PONGE, J.F.; BERNIER, N. Large-scale effects of earthworms on soil organic matter and nutrient dynamics, In: EDWARDS, C.A. (Ed.). **Earthworm ecology**. Boca Raton: St. Lucie Press, 1999. p. 103-122.

LEE, K.E. **Earthworms**: their ecology and relationships with soils and land use. London: Academic Press, 1985. 411 p.

LIMA, O.G. **Indicadores físicos, químicos e biológicos da qualidade do solo em plantios florestais e floresta Ombrófila Mista na Embrapa florestas, Colombo-PR**. 2011. 67p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

LIMA, S.S.; AQUINO, A.M.; LEITE, L.F.; SILVA, P.H.S.; CASTRO, A.A.J.F.; OLIVEIRA, F.C. Diversidade da macrofauna edáfica em agroflorestas de diferentes estádios sucessionais. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Cruz Alta, v. 2, n. 2, p. 1029-1033, 2007.

LIMA, S.S.; AQUINO, A.M.; LEITE, L.F.C.; VELÁSQUEZ, E.; LAVELLE, P. Relação entre macrofauna edáfica e atributos químicos do solo em diferentes agroecossistemas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 3, p. 322-331, 2010.

MALUCHE-BARETTA, C.R.D.; AMARANTE, C.V.T.; KLAUBERG-FILHO, O. Análise multivariada de atributos do solo em sistemas convencional e orgânico de produção de maçãs. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 1531-1539, 2006.

MANTOVANI, A.; MORELLATO, L.P.C.; REIS, M.S. Fenologia reprodutiva e produção de sementes em *Araucaria angustifolia* (Bert.) O.Kuntze. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 787-796, 2004.

MARICHAL, R.; MARTINEZ, A.F.; PRAXEDES, C.; RUIZ, D.; CARVAJAL, A.F.; JOHAN OSZWALD, J.; HURTADO, M. del P.; BROWN, G.G.; MICHEL GRIMALDI, M.; DESJARDINS, T.; SARRAZINA, M.; DECAËNS, T.; VELASQUEZ, E.; LAVELLE, P. Invasion of *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae, Oligochaeta) in landscapes of the Amazonian deforestation arc. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 46, p. 443-449, 2010.

MENEZES, C.E.G.; CORREIA, M.E.F.; PEREIRA, M.G.; BATISTA, I.; RODRIGUES, K.M.; COUTO, W.H.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, I.P. Macrofauna Edáfica em estádios sucessionais de floresta estacional semidecidual e pastagem mista em Pinheiral (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1647-1656, 2009.

MERLIM, A.O. **Macrofauna edáfica em ecossistemas preservados e degradados no Parque Estadual de Campos de Jordão, SP**. 2005. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

MOÇO, M.K.S.; GAMA-RODRIGUES, E.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; CORREIA, M.E.F. Caracterização da fauna edáfica em diferentes coberturas vegetais na região norte fluminense. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 555-564, 2005.

NAHMANI, J.; LAVELLE, P.; LAPIED, E.; VAN OORT, F. Effects of heavy metal soil pollution on earthworm communities in the north of France. **Pedobiologia**, Amsterdam, v. 47, p. 663-669, 2003.

NUNES, D.H.; PASINI, A.; BENITO, N.P.; BROWN, G.G. Earthworms diversity in four land use systems in the region of Jaguapitã, Paraná State, Brazil. **Caribbean Journal of Science**, Porto Rico, v. 42, p. 331-338, 2006.

ODUM, E.P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1983. 434 p.

PAOLETTI, M.G. Using bioindicators based on biodiversity to assess landscape sustainability. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 74, p. 1-18, 1999.

PAOLETTI, M.G.; BRESSAN, M. Soil invertebrates as bioindicators of human disturbance. **Critical Reviews in Plant Sciences**, London, v. 15, n. 1, p. 21-62, 1996.

PIMENTEL, M.S.; AQUINO, A.M.; CORREIA, M.E.F.; COSTA, J.R.; RICCI, M.S.F.; DE-POLLI, H. Atributos biológicos do solo sob manejo orgânico de cafeeiro, pastagem e floresta em região do médio Paraíba Fluminense-RJ. **Coffee Science**, Lavras, v. 1, n. 2, p. 85-93, jul./dez. 2006.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285 p.

REITZ, R.; KLEIN, R.M.; REIS, A. **Projeto madeira do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Companhia Rio Grandense de Artes Gráficas, 1983. 230 p.

RIBEIRO, M.C.; METZGER, J.P.; MARTENSEN, A.C.; PONZONI, F.; HIROTA, M.; Brazilian Atlantic Forest: how much is left and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, Oxford, v. 142, p. 1141-1153, 2009.

ROSSI, J.P.; MATHIEU, J.; COOPER, M.; GRIMALDI, M. Soil macrofaunal biodiversity in Amazonian pastures: matching sampling with patterns. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 38, p. 2178-2187, 2006.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100 p.

SANTOS, R.L.R.; IVANAUSKAS, N.M. Estrutura do componente arbóreo de trecho de floresta de araucária na Estação Ecológica de Itaberá, Itaberá-SP. **Instituto Florestal, Série Registros**, São Paulo, n. 42, p. 127-131, 2010.

SANTOS, R.L.R.; IVANAUSKAS, N.M.; POLISEL, R.T.; ESTEVES, R. Comunidade arbórea de trecho de floresta secundária com araucária na Estação Ecológica de Bananal, Bananal-SP. **Instituto Florestal**. Série Registros, São Paulo, n. 40, p. 137-142, jul. 2009.

SAS INSTITUTE. **SAS user's guide: statistics**. Versão 8.2. 6th ed. Cary, 2002.

SAUTTER, K.D.; BROWN, G.G.; PASINI, A.; BENITO, N.P.; NUNES, D.H.; JAMES, S. Ecologia e biodiversidade das minhocas no Estado do Paraná, Brasil. In: BROWN, G.G.; FRAGOSO, F. (Org). **Minhocas na América Latina: biodiversidade e ecologia**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. p. 383-396.

SOUZA, R.P.M. **Estrutura da comunidade arbórea de trechos de florestas de Araucária no estado de São Paulo, Brasil**. 2008. 101 p. Dissertação (Mestrado Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

SWIFT, M.J.; BIGNELL, D.E.; MOREIRA, F.M.S.; HUISING, E.J. O inventário da diversidade biológica do solo: conceitos e orientações gerais. In: MOREIRA, F.M.S.; HUISING, E.J.; BIGNELL, D.E. (Ed.). **Manual de biologia dos solos tropicais: amostragem e caracterização da biodiversidade**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2010. p. 19-23.

TER BRAAK, C.J.F.; SMILAUER, P. **CANOCO reference manual and user's guide to Canoco for Windows: for canonical community ordination (version 4)**. New York: Microcomputer Power, 1998.

TEWS, J.; BROSE, U.; GRIMM, U.; TIELBÖRGER, K.; WICHMANN, M.C.; SCHAWGER, M.; JELTSCH, F. Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: The importance of keystone structures. **Journal of Biogeography**, Oxford, v. 31, p. 79-92, 2004.

TIAN, G.; BRUSSARD, L.; KANG, B.T. Biological effects of plant residues with contrasting chemical composition under humid tropical conditions: effects on soil fauna. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 25, p. 731-737, 1993.

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

TUF, I.H.; TUFOVÁ, J. Proposal of ecological classification of centipede, millipede and terrestrial isopod faunas for evaluation of habitat quality in Czech Republic. **Casopis Slezského Muzea**, Opava, v. 57, p. 37-44, 2008.

USHER, M.B.; BOOTH, K.E.; SPARKES, K.E. A review progress in understanding the organization of communities of soil arthropods. **Pedobiologia**, Amsterdam, v. 23, p. 126-144, 1982.

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

VELOSO, H.P.; RANGEL, F.A.L.R.; LIMA, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991. 123 p.

WARDLE, D.A. How plant communities influence decomposer communities. In: BARDGETT, R.D.; HOPKINS, D.W.; USHER, M.B. (Ed.). **Biological diversity and function in soils**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. p. 119-138.

WARDLE, D.A.; HUNGRIA, M.A. A biomassa microbiana do solo e sua importância nos ecossistemas terrestres. In: ARAUJO, R.S.; HUNGRIA, M. (Ed.). **Micro-organismos de importância agrícola**. Brasília: EMBRAPA, 1994. p. 193-216.

WARDLE, D.A.; YEATES, G.W.; BARKER, G.M.; KAREN, I.B. The influence of plant litter diversity on decomposer abundance and diversity. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 38, p. 1052-1062, 2006.

WOLTERS, V. Invertebrate control of soil organic matter stability. **Biology and Fertility of Soils**, New Yourk, v. 31, p. 1-19, 2000.

3 DIVERSIDADE DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EM FLORESTA DE *Araucaria angustifolia* NATIVA E REFLORESTADA NO ESTADO DE SÃO PAULO

Resumo

A espécie *Araucaria angustifolia* (Bertoloni) Otto Kuntze é uma gimnosperma nativa do Brasil e a principal representante da Floresta Ombrófila Mista. A intensa exploração desta espécie restringiu a sua área de ocorrência e vem colocando em risco a biodiversidade de organismos edáficos, essenciais à manutenção desse ecossistema. Os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) desempenham uma função importante na melhoria da qualidade do solo e no estabelecimento de plantas, manutenção da diversidade biológica e da sustentabilidade dos ecossistemas florestais. Este trabalho tem como objetivo verificar, em florestas de araucária nativa e reflorestada, a ocorrência e diversidade de FMA e sua relação com os atributos físico-químicos do solo e da serapilheira em duas épocas (inverno) e (verão). Foram avaliadas florestas com *Araucaria angustifolia* nativa (NF) e reflorestada (RF) em três regiões distintas no Estado de São Paulo. Cada floresta foi representada por três repetições verdadeiras, nas quais, em cada área, foram coletadas, ao acaso, quinze amostras de solo para avaliação dos atributos físicos do solo (densidade, macroporosidade, porosidade total e umidade), dos atributos químicos do solo (pH, H+Al, P, Ca, K, Mg C-orgânico), da serapilheira (C, N e S), massa seca de serapilheira e dos FMA (colonização radicular, densidade de esporos e diversidade). Realizou-se a identificação morfológica dos FMA e foram calculados os índices ecológicos R (riqueza de espécies), H (índice de diversidade de Shannon), Is (índice de dominância de Simpson) e *e* (equitabilidade de Pielou). Os dados foram submetidos à análise de variância (Two-way ANOVA). A abundância de espécies de FMA foi submetida à Análise de Componentes Principais (ACP) e os atributos físico-químicos foram utilizados na ACP, como variáveis ambientais explicativas das modificações da comunidade de FMA. Considerando os dois períodos de amostragem e os dois ecossistemas estudados, foram encontradas 36 espécies de FMA, sendo os gêneros *Glomus*, *Acaulospora*, *Scutellospora* e *Gigaspora*, nessa ordem, os de maior riqueza de espécies. *Ambispora appendicula* e o gênero *Acaulospora* apresentaram maior abundância relativa, independente da época e ecossistemas amostrados. A densidade de esporos foi significativamente maior em RF no inverno, e a colonização diferiu apenas entre épocas, sendo maior no verão. Houve diferença significativa apenas para os índices de riqueza R e H entre as áreas estudadas no inverno, sendo os maiores valores de R e H encontrados em RF, nessa época. A ACP mostrou que houve separação espacial entre as áreas estudadas e quais foram as espécies de FMA mais associadas, em cada área, aos atributos físico-químicos do solo e da serapilheira.

Palavras-chave: Micorrizas; Mixed Ombrophylous Forest Floresta Ombrófila Mista; Glomeromicetos; Atributos físico- químicos do solo; Análise de Componentes Principais (ACP); biologia do solo, Colonização radicular

Abstract

The species *Araucaria angustifolia* (Bertoni) Otto Kuntze is a gymnosperm native of Brazil and the main component of the *Araucaria* forest. The intense exploitation of this species restricted its range, and has put at risk the biodiversity of edaphic organisms, essential for maintaining this ecosystem. The arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) play an important role in improving soil quality and plant establishment, maintenance of biological diversity and

sustainability of forest ecosystems. This work aims to verify, in native forest and reforested *Araucaria* areas, the occurrence and diversity of AMF and their relationships with physical and chemical attributes of soil and leaf litter in two seasons, winter and summer. We evaluated native forests with *Araucaria angustifolia* (NF) and reforested sites (RF) in three distinct regions in São Paulo state. Each forest was represented by three true replicates, where, in each area, we collected at random fifteen soil samples for evaluation of soil physical characteristics (density, macroporosity, total porosity, moisture), chemical soil properties (pH, H+Al, P, K, Mg, organic C) and litter (C, N, S), dry mass of litter and AMF (root colonization, spore density, diversity). We carried out the morphological identification of AMF and ecological indices were calculated: R (species richness), H (Shannon's diversity index), Is (Simpson's dominance index) and e (Pielou's evenness index). The data were subjected to analysis of variance (Two-way ANOVA). The abundance of AMF species was submitted to a Principal Component Analysis (PCA) and the physical and chemical attributes were used in the PCA as explanatory variables for changes in the environmental community of AMF. Considering the two sampling periods and the two ecosystems studied, we identified 36 AMF species. *Ambispora appendicula* and *Acaulospora* sp. had the largest distribution, regardless of the season and ecosystem sampled. The spore density was significantly higher in RF in the winter and colonization differed only between seasons, being higher in summer. There was a significant difference only of H and R between the areas studied in winter; the highest values of R and H were found in RF at this season. The PCA showed that there was spatial separation between the areas which were studied and the AMF species most associated with each area and with the physical and chemical attributes of soil and leaf litter.

Keywords: Mycorrhizas; Mixed Ombrophylous Forest; Glomeromycetes; Physical and chemical attributes of soil; Principal Component Analysis (PCA); Soil biology; Root colonization

3.1 Introdução

A espécie *Araucaria angustifolia* (Bertoloni) Otto Kuntze é uma gimnosperma da família Araucariaceae e representa a espécie arbórea dominante no dossel da Floresta Ombrófila Mista, também conhecida como Floresta de Araucária. A intensa exploração desta espécie, a partir da década de 30, principalmente pelo alto valor econômico de sua madeira, resultou na redução de sua área que, originalmente, ocupou cerca de 253.000 km², e, atualmente cobre apenas 12,6% (32.021 km²). Destes, 981 km² estão em área de preservação permanente, o que corresponde a 0,39% da área original da floresta (RITCHER, 1998; RIBEIRO et al., 2009).

No Estado de São Paulo, as áreas com araucária, em condições naturais, são remotas e se encontram em áreas muito dispersas em regiões de Mata Atlântica. Atualmente, as áreas com araucária totalizam 174.681 há, o que é inferior a 4 % de sua área original no estado (MANTOVANI et al., 2004; KRONKA et al., 2005), tornando esse ecossistema crítico em termos de conservação de sua biodiversidade (BARETTA et al., 2007a; RIBEIRO et al.,

2009; SANTOS; IVANAUSKAS, 2010), justificando a inclusão da *A. angustifolia* em lista na categoria “vulnerável” (FARJON, 2006).

Dos diversos organismos do solo que beneficiam as plantas, os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) são predominantes nos solos tropicais onde eles desenvolvem associações micorrízicas com grande variedade de espécies de plantas (SMITH; READ, 2008).

De generalizada ocorrência e distribuição nos ecossistemas naturais e produtivos, (STÜRMER; SIQUEIRA, 2008) a colonização dos FMA em diferentes espécies de plantas (McGONIGLE; FILTER, 1990), aumentam a sua diversidade e produtividade (VAN DER HEIJDEN et al., 1998), principalmente, pelo maior aporte de água e nutrientes (SMITH; BARKER, 2002; CHEN et al., 2005; SMITH; READ, 2008; CARDOSO et al., 2010), aumentando a sua tolerância à seca e, conseqüentemente, diminuindo o estresse biológico da planta hospedeira (NEWSHAM et al., 1995). Desse modo, os FMA são considerados essenciais ao estabelecimento de plantas, à manutenção da diversidade biológica e à sustentabilidade dos ecossistemas (MOREIRA et al., 2009).

Outro importante benefício da associação micorrízica está relacionado à melhoria da propriedade física do solo, onde o micélio associado à raiz promove uma contribuição direta pela agregação física de partículas do solo e, ainda, pela produção de uma proteína (ação indireta) que pode atuar como agente cimentante das partículas de solo (RILLIG, 2004; PURIN; KLAUBERG-FILHO, 2010), além de contribuir com o estoque de carbono e melhoria da qualidade do solo, sustentando a produtividade biológica (RILLIG et al., 2001, 2010).

Assim, a melhoria das condições edáficas que favoreçam o desenvolvimento da associação micorrízica, principalmente em solos de ecossistemas florestais de baixa fertilidade e dependentes da ciclagem de nutrientes, podem auxiliar na manutenção da qualidade do solo tornando a comunidade de FMA como indicadora de qualidade.

A *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze., é colonizada por diferentes espécies de FMA (MILANEZ; MONTEIRO, 1950; OLIVEIRA; VENTURA, 1952; BREUNINGER et al., 2000; MOREIRA-SOUZA; CARDOSO, 2002; MOREIRA-SOUZA et al., 2003; MOREIRA et al., 2007a, 2009).

Em floresta de *Araucaria angustifolia*, o tipo de formação florestal (natural ou reflorestada) e condições edafo-climáticas afetam a diversidade de espécies de FMA (MOREIRA et al., 2007a, 2007b, 2009). Biomas ameaçados, como os da Mata Atlântica, abrigam florestas de araucária com grande diversidade de espécies de FMA reconhecidamente

importante para a manutenção da biodiversidade e produtividade dos ecossistemas florestais e muitos deles ainda não descritos (DE SOUZA et al., 2010).

No entanto, ainda são poucos os estudos, envolvendo a diversidade de FMA e atributos físico-químicos do solo, em ecossistemas de araucária naturais e reflorestados, em regiões distintas do Estado de São Paulo. Assim, este trabalho tem como objetivo verificar a ocorrência e diversidade de FMA, em floresta de araucária nativa e reflorestada, e sua relação com os atributos físico-químicos do solo e da serapilheira em duas épocas (inverno) e (verão).

3.2 Desenvolvimento

3.2.1 Material e Métodos

3.2.1.1 Descrição das áreas de estudo

O estudo foi realizado em ambiente de Floresta Ombrófila Mista pertencente ao Bioma Mata Atlântica no Estado de São Paulo. Foram selecionadas áreas de florestas com *Araucaria angustifolia* nativa (NF) e reflorestada (RF) em três distintas regiões no Estado Figura 2.1 (Capítulo 2). Além de a região ser considerada como uma réplica verdadeira, em cada região, na FN e na RF foi delimitada uma parcela de 0,5 hectare, sendo está considerada uma réplica verdadeira de cada tipo de floresta.

Uma das regiões estudadas está localizada na Estação Ecológica de Bananal (EEB) Figura 2.1 (Capítulo 2), na Serra da Bocaina entre os estados de São Paulo e Rio de Janeiro. A estação tem extensão de 884 hectares com elevação variável de 1200 a 1900 metros e temperaturas médias variando de 20 a 33 °C, chegando à mínima de 0 °C no inverno (SANTOS et al., 2009). Na primeira época de coleta (agosto de 2009) a temperatura média e a pluviosidade foram de 17 °C e 40 mm, respectivamente, enquanto que no verão, a temperatura média subiu para próximo de 22 °C, e a maior pluviosidade foi registrada no mês de janeiro, acima de 300 mm Figura 2.2 (Capítulo 2).

Distante 25 km da cidade de Bananal, a EEB apresenta clima mesotérmico úmido sem estação seca com verão brando, Cfb segundo a classificação de KÖPPEN. A floresta NF apresenta elevação de 1185 m (22° 48' 26" latitude Sul e 44° 21' 59" longitude Oeste) (floresta 1 da Figura 2.1, Capítulo 2). Além da araucária, outras espécies vegetais fazem parte da composição florística dessa área Figura 2.3 (Capítulo 2). Informações mais detalhadas sobre a composição florística da área podem ser obtidas em (SANTOS et al., 2009) e no Capítulo 2.

A área reflorestada com araucária (RF), nessa região, tem aproximadamente 38 anos e se encontra em estado de regeneração, com presença de outras espécies como *Dicksonia sellowiana* Hook. (xaxim-verdadeiro), *Euterpe edulis* Mart. (palmito-juçara), *Myrcia rostrata* DC. (guamirim-chorão), flora arbustiva, herbácea e de porte arbóreo, com presença de gramíneas em locais de menor densidade de cobertura vegetal. A área RF se encontra nas coordenadas 22° 48' 24" latitude Sul e 44° 22' 27" longitude Oeste, com elevação de 1126 m (floresta 2 da Figura 2.1 e Figura 2.4, Capítulo 2). O solo, em ambas as áreas de coleta, foi classificado como Cambissolo Háplico Tb Distrófico úmbrico (Anexos C e D). A caracterização físico-química do solo nos locais de coleta se encontra na Tabela 2.1 (Capítulo 2).

A segunda região estudada está localizada na Estação Ecológica de Itaberá (EEI) Figura 2.1 (Capítulo 2) que se estende por 180 ha, no município de Itaberá-SP Figura 2.1 (Capítulo 2) e corresponde a um trecho de floresta secundária com presença de *A. angustifolia* nativa. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é o Cfb mesotérmico úmido sem estação seca com verão brando.

A temperatura média anual está entre 18-20 °C, sendo janeiro o mês mais quente (26 a 28 °C) e julho o mais frio, entre 8 a 16 °C, com índice pluviométrico de 1200 a 1400 mm anuais (SANTOS; IVANAUSKAS, 2010). No período da primeira coleta (agosto de 2009), foi verificada uma temperatura média de 17 °C e pluviosidade em torno de 45 mm, no mês de agosto, embora no mês de julho tenha sido 250 mm, atípica para essa época. No verão, o mês de fevereiro foi o mais quente e janeiro o de maior pluviosidade, 25 °C e 420 mm respectivamente Figura 2.5 (Capítulo 2). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico típico (Anexos C e D), relevo suave a ondulado. A floresta NF localiza-se nas coordenadas 23° 50' 21" latitude Sul e 49° 08' 40" longitude Oeste (floresta 3 da Figura 2.1, Capítulo 2), e altitude de aproximadamente 678 metros.

Diversas famílias de espécies vegetais arbustivas e arbóreas fazem parte da composição florística dessa área (EEI) como descrito no Capítulo 2 e Figura 2.6 (do mesmo capítulo). Outras informações mais detalhadas sobre a florística dessa área podem ser obtidas em Santos e Ivanauskas (2010).

Nessa mesma região, a área reflorestada com *A. angustifolia* (RF) está localizada na estação Experimental de Itapeva (EEExI) Figura 2.1 (Capítulo 2) pertencente ao município de Itapeva-SP. Essa área, implantada em 1964, tem o predomínio de araucárias, presença de plântulas da espécie no sub-bosque, além de outras espécies arbustivas, herbáceas e baixa

presença de espécies de porte arbóreo Figura 2.7 (Capítulo 2). Está localizada entre as coordenadas 24° 04' 19" latitude Sul e 49° 01' 07" longitude Oeste (floresta 4 da Figura 2.1, Capítulo 2), numa altitude de 740 metros sob um Nitossolo Vermelho Eutroférico latossólico (Anexos C e D).

A terceira região está localizada no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira, (PETAR) no município de Iporanga-SP, e em área particular nos arredores do parque, no município de Barra do Chapeu-SP. O clima da região é do tipo temperado brando sem estiagem (Cfb) segundo classificação de Köppen, sendo o mês de fevereiro o mais quente com temperatura média de 22,5 °C e, entre maio e agosto, o período de temperaturas mais baixas com média variando entre 15 e 16,7 °C (SOUZA, 2008).

Na coleta de inverno, abril foi o mês mais seco (< 50 mm) e julho o mais frio com temperatura média de 17 °C, enquanto que no verão o mês mais chuvoso foi janeiro (acima de 400 mm) e temperatura média de 24 °C Figura 2.8 (Capítulo 2). A floresta NF se encontra em propriedade particular coberta por 48 ha de floresta Ombrófila Mista com elevação de 785 m, localizada no município de Barra do Chapeu-SP Figura 2.1 (Capítulo 2).

O solo foi classificado como Cambissolo Háplico Tb Distrófico úmbrico (Anexos C e D). A cobertura vegetal dessa área é composta, entre outras, por *Dicksonia sellowiana* no sub-bosque, *Allophylus edulis* é típica do sub-dossel, *Prunus myrtifolia* no dossel e *Araucaria angustifolia* como emergente. Outras informações sobre a florística dessa área estão no Capítulo 2 e descritas em Souza (2008) Figura 2.9 (Capítulo 2). A NF está situada entre as coordenadas 24° 28 '40" latitude Sul e 49° 01' 07" longitude Oeste (floresta 5 da Figura 2.1, Capítulo 2). A área reflorestada com araucária (RF), nessa mesma região, fica localizada no “Núcleo do Areado”, dentro do PETAR, município de Iporanga-SP Figura 2.1 (Capítulo 2). A área tem presença de espécies arbóreas em regeneração, arbustivas e herbáceas, além de cobertura por gramíneas em locais de menor densidade de cobertura vegetal Figura 2.10 (Capítulo 2).

O solo foi identificado como Cambissolo Háplico Tb umbrico (Anexos C e D) e se encontra nas coordenadas 24° 20' 14" latitude Sul e 49° 36' 14" longitude Oeste (floresta 6 da Figura 2.1, Capítulo 2), com altitude de aproximadamente 932 m. Na Tabela 2.1, (Capítulo 2) estão as informações sobre a média dos valores das características físico-químicas do solo na floresta NF e na reflorestada RF.

3.2.1.2 Avaliação dos atributos físico-químicos do solo, da serapilheira e FMA

Em cada uma das réplicas verdadeiras de floresta nativa com araucária (NF) e reflorestada (RF) de, aproximadamente, 0,5 ha e ao redor das árvores de araucária, foram coletadas, ao acaso, quinze amostras de solo, de raízes de araucária e de serapilheira para avaliação dos atributos físicos e químicos do solo, da serapilheira, colonização radicular e densidade de esporos de FMA, nos mesmos pontos de coleta. A coleta de solo foi feita com auxílio de um trado, sendo coletadas cinco amostras simples em cada ponto de coleta (árvore) perfazendo uma composta. A serapilheira foi amostrada numa área de 25 cm x 25 cm e as coletas foram realizadas no inverno (agosto de 2009) e verão (fevereiro de 2010).

O solo foi acondicionado em sacos de polietileno, mantido sob refrigeração e transportado para o laboratório em caixas de isopor com gelo e mantido em câmara fria até o momento das análises. Para avaliação da comunidade de fungos micorrízicos, o solo foi mantido em câmara fria e as raízes de araucária foram lavadas em água corrente e conservadas em solução de álcool 50% até o processamento das amostras. Para os atributos físico-químicos, as amostras de solo foram peneiradas em malha de 2 mm, e as análises foram realizadas nos Laboratórios de Fertilidade e Física do Solo do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP.

Para a análise granulométrica, as frações areia foram separadas por meio de peneiramento (0,053mm) e silte e argila, por sedimentação. A argila foi determinada através da leitura do densímetro, e o silte, pela diferença conforme descrito pela Embrapa (1997). No inverno, nos mesmos pontos de coleta das amostras químicas, foram retiradas amostras de solo indeformadas, na camada de 0-5 cm de profundidade e com auxílio de anéis de aço inox de 5 cm de diâmetro. As amostras foram envolvidas em filme plástico e transportadas para o laboratório, onde permaneceram em câmara fria até o momento da análise. Em laboratório, as amostras foram saturadas em bandejas, com uma lâmina de água de dois terços da altura dos anéis. A obtenção do conteúdo de água, nos potenciais matriciais de -1 e -6 KPa, foi realizada com uso de uma mesa de tensão (EMBRAPA, 1997). Em seguida, as amostras foram secadas em estufa a 105 °C por 48 horas, e pesadas para a determinação da massa de sólidos e cálculo da densidade do solo. A macroporosidade foi obtida pela diferença entre o conteúdo de água no solo saturado e o conteúdo de água após a aplicação da tensão de 6 KPa. A microporosidade foi estimada como o conteúdo de água retido na tensão de 6 KPa. A densidade de partícula foi determinada em aparelho para cada amostra.

Em relação aos atributos químicos, foram determinados o pH em CaCl_2 0,01 mol L⁻¹, Carbono orgânico (Corg), fósforo (P), Cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg), alumínio (Al) e H+Al, conforme metodologia descrita em Raij et al. (2001) e no (item 2.2.1.5, Capítulo 2.) A umidade do solo foi determinada a 105 °C por 48 h.

3.2.1.3 Determinação da matéria seca da serapilheira e C, N e S

A massa seca de serapilheira foi determinada a 55 °C até peso constante. A seguir a serapilheira foi moída e passada em peneira de 100 mesh. O teor de C, N e S foi determinado por combustão seca em analisador simultâneo para C, N e S, modelo vario EL cube, marca Elementar, como já descrito no item 2.2.1.4 do Capítulo 2.

3.2.1.4 Determinação da percentagem de colonização radicular

Para a determinação da percentagem de colonização radicular, cerca de 5 gramas de raízes foram colocadas em solução de KOH 10% e mantidas por 48 horas, sendo a solução substituída a cada 24 horas. A seguir, as raízes ainda em solução de KOH 10%, foram colocadas em banho-maria a 90 °C por 30 minutos. Após, as raízes foram transferidas para solução de H₂O₂ 10%, onde permaneceram por cerca de 20 segundos e, em seguida, coradas em solução de tinta de caneta dissolvida em ácido acético (VIERHEILING et al., 1998). Após a etapa de coloração, as raízes foram mantidas em solução de lactoglicerol. A presença de estruturas do fungo (hifas, arbúsculos, vesículas e esporos) nas raízes foi observada, pela montagem de segmentos de raízes em lâminas cobertos por lamínulas, em microscópio, no aumento de (400x), conforme Giovannetti e Mosse (1980). Foram montadas cinco lâminas para cada ponto de amostragem (árvore), contendo dez segmentos de raízes de, aproximadamente, 1 cm de comprimento em cada lâmina, resultando na avaliação de 50 segmentos de raiz para cada ponto de amostragem. Atribuiu-se uma nota de 0 a 100 para cada segmento, conforme a intensidade de colonização radicular observada (MOREIRA et al., 2006).

A densidade de esporos de FMA foi determinada por peneiramento úmido (GERDEMANN; NICOLSON, 1963), a partir de uma alíquota de 50 g de solo para cada ponto de amostragem, seguida de centrifugação em sacarose 70% (JENKINS, 1964). A seguir, os esporos foram transferidos para placas canaletadas e contados sob microscópio

estereoscópico (40x), marca Leica MZ 125. Após a obtenção do número total de esporos de cada amostra, estes foram separados em grupos de acordo com sua morfologia. A seguir, com os esporos de cada grupo, foram montadas lâminas permanentes em resina de álcool polivinílico e glicerol (PVLG), conforme Morton et al. (1993) e reagente de Melzer (KOSKE; TESSIER, 1983). A identificação, em nível de espécie, foi realizada usando-se microscópio estereoscópico (100 a 400x), com auxílio do manual de Schenck e Perez (1990) e descrição fornecida pelo site do banco de dados da coleção Internacional de Culturas de Fungos Micorrízicos Arbusculares (<http://invam.caf.wvu.edu>) e descrição das espécies originais.

O número total de esporos para cada grupo morfológicamente distinto foi avaliado em 50 g de solo, contando-se apenas os esporos considerados com morfologia intacta. O número de esporo (NS) representa o número de esporos de cada espécie de FMA. A abundância relativa de ocorrência das espécies de FMA foi calculada, onde a abundância relativa (AR) de cada espécie de FMA, em cada área, foi calculada de acordo com $AR = (\text{número de esporo de cada espécie} / \text{total de esporo}) \times 100$.

3.2.1.4 Análise estatística

Os resultados dos atributos químicos do solo [pH(CaCl₂), H+Al, K, Ca, Al, Mg, P e Carbono orgânico, da serapilheira (C, N e S), além de umidade, densidade, porosidade total, macroporosidade e matéria seca da serapilheira] foram submetidos à análise de variância (Two-way ANOVA) e as médias, comparadas pelo teste LSD ($P \leq 0,05$) por meio do programa estatístico SAS versão 8.2 (SAS, 2002). O mesmo procedimento foi realizado para os resultados de números de esporos de FMA [(transformado para $\log(x + 1)$), colonização radicular [(transformado para $\arcsin(x + 1)^{0,5}$), riqueza de espécies de FMA, índices de diversidade de Shannon (H), dominância de Simpson (Is) e de uniformidade de Pielou (e). A abundância de espécies de FMA, nas diferentes áreas, foi utilizada para a obtenção do comprimento do gradiente. Como esse comprimento foi menor que três (resposta linear), optou-se pela Análise de Componentes Principais (ACP), usando o programa CANOCO versão 4.0 (TER BRAAK; SMILAUER, 1998). Os atributos químicos significativos (Ca, K, Mg, P, Corg, H+Al), serapilheira (C, N, S), físicos do solo (densidade, macroporosidade, porosidade total, umidade) e a massa seca de serapilheira foram utilizados posteriormente na ACP, como variáveis ambientais explicativas das modificações das espécies de FMA encontradas nas florestas estudadas. Após a retirada das variáveis multicolineares (efeito de colinearidade), somente os atributos significativos (5% de significância) foram usados como

variáveis ambientais explicativas, aumentando-se assim a robustez da análise (TER BRAAK; SMILAUER, 1998; BARETTA et al., 2008).

3.2.2 Resultados e Discussão

Considerando-se as coletas de inverno e verão, 48,4% do total de glomerosporos foram recuperados na floresta com araucária nativa (NF), enquanto que na área reflorestada com araucária RF, 51,6% (Tabela 3.2). A densidade de esporos sofreu efeito de sazonalidade, e o maior valor de densidade foi encontrado em RF, no inverno, em comparação a NF. Em NF a maior densidade de esporo foi encontrada no verão, enquanto que no inverno foi em RF (Figura 3.1) e Anexo B.

A menor densidade de esporos em NF, no inverno, em comparação com RF, pode indicar que os FMA são mais ativos em ecossistemas que sofreram distúrbios e ainda estão em recuperação do que naqueles já estáveis (PIETROWSKI et al., 2008). Nesse sentido, pode se admitir que, a comunidade de FMA em RF resistiu ao efeito do distúrbio (resiliência) e, provavelmente, foi favorecida pelo retorno da vegetação natural, ainda emergente nessa área, comparada a NF de florística mais complexa e estável (MOREIRA et al., 2006; VIOLI et al., 2008).

Por outro lado, mudanças na densidade de esporos, distribuição e dominância de espécies de FMA podem acontecer em função de modificações nas condições edafoclimáticas, resultado de alterações na cobertura vegetal, chuva, temperatura, luminosidade, exsudação radicular, dinâmica de crescimento das plantas e competição com outros microrganismos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; MAIA et al., 2010).

Apesar de ambas as florestas apresentarem conteúdos similares de Corg, pH, teor de Mg e densidade do solo, NF apresentou solos com maiores valores de P, K, macroporosidade e massa seca de serapilheira, enquanto que RF maiores valores de umidade e porosidade total (Tabela 3.1). Estes resultados de densidade de esporos contrastam com os de Moreira et al. (2007a), os quais encontraram maior densidade de esporos em solos sob florestas com araucária nativa, em comparação ao reflorestamento, tanto no inverno quanto no verão e com os de Moreira-Souza et al. (2003), que encontraram valores médios de densidade de esporos superiores na floresta de araucária nativa em relação ao reflorestamento. Contudo, estão de acordo com os dados de Moreira et al. (2006) que também encontraram maior densidade de esporos em solo sob reflorestamento com araucária no inverno (maio) em relação à floresta nativa com araucária.

Tabela 3.1 - Análise de comparação de médias dos Atributos Físico-químicos do solo e matéria seca da serapilheira do solo na Floresta nativa (NF) e reflorestada (RF) com araucária

Variável	Inverno		Verão	
	NF	RF	NF	RF
pH CaCl ₂ (0,01 mol L ⁻¹)	4,0 a	4,2 a	4,0 a	4,1 a
H+AL (m molc kg ⁻¹)	113,2 a	127,0 a	117,8 a	137,7 a
K (m molc kg ⁻¹)	2,3 a	1,5 b	1,6 a	1,2 b
Mg (m molc kg ⁻¹)	8,8 a	8,0 a	9,2 a	7,2 a
P- resina (mg kg ⁻¹)	8,9 a	5,6 b	7,6 a	4,4 b
C-orgânico* (g kg ⁻¹)	32,6 a	35,5 a	34,3 a	33,3 a
Umidade (%)	28,5 b	40,7 a	31,9 b	46,3 a
Densidade (g cm ⁻¹)	1,1 a	1,0 a	1,1 a	1,0 a
P. total * (m ³ m ⁻³)	0,56 b	0,63 a	0,56 b	0,63 a
Macroporos (m ³ m ⁻³)	0,15 a	0,11 b	0,15 a	0,11 b
M.seca ser * (kg m ⁻²)	1,12 a	1,10 b	1,14 a	0,93 b

* M. seca ser= Massa seca de serapilheira; P. Total= Porosidade tota; C-orgânico= Carbono orgânico
Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo Teste LSD (P≤ 0,05%)

A percentagem de colonização micorrízica não diferiu significativamente entre as áreas estudadas, mas a maior colonização radicular foi obtida no verão (Figura 3.1) e Anexo B. Os resultados de colonização obtidos nas áreas NF e RF variaram de 4 a 11% (Figura 3.1) e é menor quando comparado a outros trabalhos em floresta de araucária (BREUNINGER et al., 2000; MOREIRA et al., 2007a). Na literatura, resultados diversos são encontrados com relação à colonização micorrízica em ecossistemas de araucária. Moreira et al. (2006) não encontraram diferença significativa para colonização entre floresta de araucária nativa, reflorestada e impactada por fogo, além de a colonização variar de 10,7 a 14,5% no inverno. Já, Moreira-Souza et al. (2003) encontraram valores para colonização entre 14 e 29% em área reflorestada com araucária e 21 a 29% em floresta nativa. Entretanto, os trabalhos realizados no Brasil não levam em consideração o uso de réplicas verdadeiras de florestas nativa e reflorestada, como no presente estudo, sendo considerados apenas estudos de caso.

Figura 3.1 - Colonização radicular (%) por fungos micorrízicos arbusculares e número de esporos (em 50g de solo seco) em floresta com araucária nativa (NF) e reflorestada (RF) em agosto de 2009 (inverno) e Fevereiro de 2010 (verão), São Paulo, Brasil, (n=45). (*) indica diferença significativa da mesma variável entre as áreas (NF) e (RF) na mesma época

A baixa percentagem de colonização encontrada pode estar refletindo as condições edáficas favoráveis e o estágio avançado de desenvolvimento das plantas de araucária (Tabela 3.1), além da alta variabilidade dos valores de colonização. Em estudo com outras espécies vegetais, em sucessão, observa-se redução da colonização radicular à medida que as plantas atingem estádios sucessionais maduros (ZANGARO et al., 2008). Ainda de acordo com Janos (1980), numa floresta madura, as plantas potencialmente favoráveis à associação buscam reduzir a dependência da simbiose, evitando o dreno de carbono. Maior colonização radicular no verão, também foi relatada em florestas de araucária preservadas e não preservadas por (MOREIRA et al., 2007a).

No verão, tanto a colonização quanto a esporulação podem ser estimulados pelo teor de umidade do solo e por valor de temperatura próxima de 35 °C (BOWEN, 1987). Todas as amostras de raiz estavam colonizadas, sendo a colonização caracterizada pela presença de hifas grossas e muito finas, vesículas, arbúsculos e esporos no interior das raízes, além de presença de células auxiliares aderidas às mesmas.

Foram encontrados 36 táxons de FMA nas áreas de estudo, sendo identificados 16 em nível de espécie e 20 em nível de gênero (Tabela 3.2). Essa alta diversidade de FMA em

ecossistemas de Floresta de Araucária é maior do que normalmente foi encontrada em outros estudos com araucária no sul do país (BREUNINGER et al., 2002; ZANDEVALLI et al., 2008) e no Estado de São Paulo (MOREIRA-SOUZA et al., 2003, 2007a, 2009).

Alta diversidade de espécies foi apresentada pelos gêneros *Glomus*, com 28% (10 espécies), seguidas por *Acaulospora* com 25% (9), *Scutellospora* com 22,2% (8) e por *Gigaspora* 13,9% (5). Estes gêneros também foram os mais frequentes em outros estudos envolvendo solos sob florestas de araucária naturais e reflorestadas, no Estado de São Paulo (MOREIRA et al., 2009) e em solos de ecossistemas de mata tropical úmida no mesmo estado (TRUFEM, 1990).

Com exceção do gênero *Gigaspora*, os demais gêneros são muito frequentes em solos de ecossistemas florestais de araucária e de outras formações florestais do Bioma Mata Atlântica (TRUFEM, 1990; BREUNINGER et al., 2002; STÜRMER et al., 2006; MOREIRA et al., 2007a; BONFIM, 2011). Os gêneros *Glomus* e *Acaulospora* têm sido reportados como os mais comuns em ecossistemas brasileiros e também em áreas de Floresta Tropical em outras partes do mundo (ZHAO et al., 2001; AIDAR et al., 2004; PEÑA-VELEGAS et al., 2007; ZANDEVALLI et al., 2008; MOREIRA et al., 2009), o que pode indicar que estes dois gêneros apresentam adaptações diversas com relação às diferentes características do solo, clima e espécies hospedeiras.

O número total de espécies de FMA foi similar entre as áreas em estudo, sendo verificadas 34 espécies na área NF e 33 espécies na área RF, considerando-se as duas épocas de amostragem. Esse equilíbrio na riqueza de espécies de FMA, nas duas florestas estudadas, pode indicar efeito da cobertura vegetal, em estágio mais ativo de crescimento em RF, favorecendo a esporulação das espécies de FMA, o que ressalta a importância da manutenção do sub-bosque nas áreas de reflorestamento com araucárias, aumentando o potencial de inóculo.

Moreira et al. (2007b) também não encontraram diferenças no número de espécies de FMA entre as áreas de araucária reflorestadas e nativas, no Estado de São Paulo. Entretanto, Zandavalli et al. (2008), em florestas de araucária reflorestadas no sul do Brasil, encontraram um total de 16 espécies de FMA, sendo este valor bem superior às áreas de mata nativa (8 espécies).

Tabela 3.2 - Número de esporos de FMA (NS) em 50 g de solo seco e abundância relativa (AR) de diferentes espécies em Floresta de *Araucaria angustifolia* nativa (NF) e reflorestada (RF) no Estado de São Paulo, Brasil, 2011 (n=45)

		(continua)							
Espécies de FMA		Inverno				Verão			
		NF		RF		NF		RF	
		NS	AR	NS	AR	NS	AR	NS	AR
<i>Acaulospora bireticulata</i>	Rothwell & Trappe	2	0,3	8	0,9	1	0,1	3	0,4
<i>Acaulospora scrobiculata</i>	Trappe	48	6,4	18	1,9	0	0,0	82	10,2
<i>Acaulospora foveata</i>	Trappe & Janos	35	4,6	40	4,3	30	3,4	113	14,1
<i>Acaulospora koskei</i>	Braszkowski	71	9,4	44	4,7	10	1,1	64	8,0
<i>Acaulospora lacunosa</i>	Morton	40	5,3	11	1,2	97	11,0	57	7,1
<i>Acaulospora mellea</i>	Spain & Schenck	33	4,4	43	4,6	0	0,0	24	3,0
<i>Acaulospora spinosa</i>	Walker & Trappe	7	0,9	19	2,0	116	13,1	24	3,0
<i>Acaulospora tuberculata</i>	Janos & Trappe	0	0,0	4	0,4	3	0,3	0	0,0
<i>Acaulospora sp.1</i>		0	0,0	8	0,9	15	1,7	41	5,1
<i>Ambispora appendicula</i>	(Spain, Sieverd., N.C. Schenck) Spain, Oehl & Sierved.	201	26,7	177	18,8	95	10,8	152	19,0
<i>Gigaspora decipiens</i>	Hall & Abbott	23	3,1	40	4,3	51	5,8	58	7,2
<i>Gigaspora sp.1</i>		5	0,7	12	1,3	5	0,6	3	0,4
<i>Gigaspora sp.2</i>		1	0,1	0	0,0	21	2,4	7	0,9
<i>Gigaspora sp.3</i>		9	1,2	4	0,4	0	0,0	13	1,6
<i>Gigaspora sp.4</i>		0	0,0	0	0,0	0	0,0	3	0,4
<i>Glomus alonatum</i>	S. L. Rose & Trappe	13	1,7	8	0,9	27	3,1	18	2,2
<i>Glomus sp.1</i>		7	0,9	30	3,2	8	0,9	15	1,9
<i>Glomus sp.2</i>		13	1,7	104	11,1	47	5,3	4	0,5
<i>Glomus sp.3</i>		44	5,8	24	2,6	46	5,2	0	0,0
<i>Glomus sp.4</i>		3	0,4	27	2,9	0	0,0	19	2,4
<i>Glomus sp.5</i>		30	4,0	25	2,7	23	2,6	16	2,0
<i>Glomus sp.6</i>		5	0,7	11	1,2	0	0,0	0	0,0
<i>Glomus sp.7</i>		42	5,6	36	3,8	92	10,4	0	0,0
<i>Glomus sp.8</i>		0	0,0	0	0,0	7	0,8	0	0,0
<i>Glomus sp.9</i>		26	3,5	16	1,7	0	0,0	0	0,0
<i>Paraglomus brasilianum</i>	(Spain & Miranda)								
<i>Morton & Redecker</i>		0	0,0	107	11,4	0	0,0	0	0,0
<i>Racocetra intraornata</i>	Goto, Maia & Oehl	25	3,3	68	7,2	13	1,5	29	3,6
<i>Racocetra sp.1</i>		22	2,9	8	0,9	5	0,6	1	0,1
<i>Scutellospora calospora</i>	Walker & Sanders	0	0,0	0	0,0	17	1,9	4	0,5
<i>Scutellospora pellucida</i>	(Nicol. & Schenck)								
<i>Walker & Sanders</i>		10	1,3	3	0,3	22	2,5	4	0,5
<i>Scutellospora scutata</i>	Walker & Diederichs	0	0,0	0	0,0	8	0,9	0	0,0
<i>Scutellospora sp.1</i>		10	1,3	5	0,5	3	0,3	2	0,2
<i>Scutellospora sp.2</i>		0	0,0	0	0,0	17	1,9	0	0,0
<i>Scutellospora sp.3</i>		6	0,8	6	0,6	49	5,5	4	0,5

Tabela 3.2 - Número de esporos de FMA (NS) em 50 g de solo seco e abundância relativa (AR) de diferentes espécies em Floresta de *Araucaria angustifolia* nativa (NF) e reflorestada (RF) no Estado de São Paulo, Brasil, 2011 (n=45)

Espécies de FMA	(conclusão)							
	Inverno				Verão			
	NF		RF		NF		RF	
	NS	AR	NS	AR	NS	AR	NS	AR
<i>Scutellospora</i> sp.4	5	0,7	12	1,3	45	5,1	17	2,1
<i>Scutellospora</i> sp.5	12	1,6	12	1,3	0	0,0	4	0,5
<i>Esporos não identificados</i>	5	0,7	11	1,2	10	1,1	21	2,6
Total	753		941		883		802	

Os resultados de diversidade de FMA do presente estudo, utilizando-se repetições verdadeiras de florestas de araucária são inéditos no Brasil e reforçam, com maior robustez, que alguns gêneros de FMA estão realmente dominando esses ambientes, variando sua frequência entre inverno e verão, enquanto que algumas espécies são dominantes, independente de época avaliada. A espécie *Ambispora appendicula*, por exemplo, apresentou ampla distribuição em NF e RF com a maior densidade de esporos, independente da época de amostragem, com exceção da área NF no verão, onde *Acaulospora spinosa* e *Acaulospora lacunosa* foram superiores (Tabela 3.2).

Destaca-se a ocorrência de uma *Gigasporaceae* (*Racocetra intraornata*) (MORTON; MSISKA, 2010) encontrada apenas em solo da Caatinga do Nordeste e ecossistema de dunas da costa Atlântica do Nordeste do Brasil (GOTO et al., 2009) e, mais recentemente por Bonfim (2011) em área de mata restaurada de Mata Atlântica no Estado de São Paulo. No inverno, as espécies mais frequentes encontradas em NF foram *Ambispora appendicula*, *Acaulospora koskei*, *A. scrobiculata*, *Glomus* sp.3, *Glomus* sp.7, *A. lacunosa*, *A. foveata* e *A. mellea*. No verão a predominância foi de *Acaulospora spinosa*, *Acaulospora lacunosa*, *Ambispora appendicula*, *Glomus* sp.7, *Gigaspora decipiens*, *Scutellospora* sp.3, *Glomus* sp.2, *Glomus* sp.3 e *Scutellospora* sp.4 (Tabela 3.2).

Na área reflorestada RF as espécies mais abundantes, no inverno, foram: *Ambispora appendicula*, *Paraglomus brasilianum*, *Glomus* sp.2, *Racocetra intraornata*, *Acaulospora koskei*, *A. mellea*, *A. foveata* e *Gigaspora decipiens*, e, no verão, as mais frequentes foram *Ambispora appendicula*, *Acaulospora foveata*, *A. scrobiculata*, *A. koskei*, *Gigaspora decipiens*, *Acaulospora lacunosa* e *A. sp.1* (Tabela 3.2). No verão, as espécies de maior frequência, tanto em NF quanto em RF, foram *Ambispora appendicula* e *Acaulospora lacunosa*, enquanto que no inverno foram *A. appendicula* e *A. koskei*.

Esse resultado indica que *A. appendicula* e o gênero *Acaulospora* estejam mais adaptados, principalmente a solos com valores baixos de pH e conteúdos médios de carbono orgânico (Tabela 3.1.) e devido às diferentes condições edáfoclimáticas e hospedeiros nessas áreas. A espécie *Ambispora appendicula*, provavelmente, já foi relatada como *Acaulospora appendicula*, junto com outras espécies de *Acaulospora* como muito abundantes em solo sob floresta tropical úmida no Estado de São Paulo (TRUFEM, 1990). O gênero *Glomus*, embora presente em maior riqueza de espécies, apresentou baixa frequência nas áreas estudadas, provavelmente, devido aos baixos valores de pH característicos dos ecossistemas florestais e encontrados nessas áreas (Tabela 3.1), corroborando resultados de menor frequência desse gênero, em solos ácidos, obtidos por outros autores (LAMBAIS; CARDOSO, 1988; AIDAR et al., 2004; ZANDEVALLI et al., 2008).

Algumas espécies de FMA foram exclusivas para a época seca, como por exemplo, *Paraglomus brasilianum*, *Glomus* sp.6 e *Glomus* sp.9, enquanto que *Gigaspora* sp.4, *Glomus* sp.8, *Scutellospora* sp.2, *S. calospora* e *S. scutata* foram exclusivas para época chuvosa. A variação da esporulação das espécies de FMA em função das épocas de amostragem já tem sido reportada, com algumas espécies esporulando mais e outras menos em determinadas épocas do ano, e ainda há aquelas que esporulam apenas em uma época do ano (MOREIRA et al., 2007a). A realização de coletas em mais de uma época de amostragem e as repetições verdadeiras dos ecossistemas amostrados, em diferentes regiões, constitui-se numa estratégia importante nos estudos de diversidade de FMA, uma vez que possibilita a recuperação de um maior número de espécies da comunidade de FMA e uma melhor caracterização dos ecossistemas em estudo.

A análise de variância (Two-way ANOVA) para riqueza de espécie, índice de diversidade de Shannon (H), Simpson (Is) e de equitabilidade de Pielou (*e*) mostrou que houve diferença significativa (teste LSD $P \leq 0,05$) entre as florestas (NF) e (RF) apenas para riqueza R e H (Figura 3.2). Os valores de índice de riqueza de espécies de FMA e de (H) na área reflorestada (RF) foram significativamente maiores comparados aos valores obtidos na floresta nativa (NF), no inverno. Além disso, independente de época de coleta, o maior valor do índice de riqueza de espécies de FMA em (RF) foi encontrado no inverno, enquanto que em (NF), no verão (Figura 3.2) e Anexo B.

Figura 3.2 - Riqueza de espécies de FMA e índice de diversidade de Shannon (H), de Simpson (Is) e de Pielou (e) da comunidade de fungos micorrízicos arbusculares nas florestas de Araucária nativa (NF) e reflorestada (RF) no inverno (agosto de 2009) e verão (fevereiro de 2010). (*) indica diferença significativa da mesma variável entre as áreas (NF) e (RF) na mesma época

Os resultados indicam que, no inverno, as condições edáficas (menor concentração de P, K e maior teor de umidade no solo) (Tabela 3.1) e de cobertura vegetal em (RF) estejam favorecendo a maior diversidade de espécies de FMA, provavelmente, porque nessa área há menor densidade de plantas de porte arbóreo, facilitando maior entrada de luz o que estimula o crescimento e renovação de espécies de plantas de menor porte, além da presença de gramíneas que podem ter contribuído para estimular a esporulação, visto que RF apresentou maior densidade de esporos no inverno.

Assim, uma maior diversidade vegetal emergente presente no sub-bosque na área RF também pode ter contribuído para uma maior diversidade de FMA, uma vez que ocorrerá um maior número de espécies potencialmente hospedeiras e, dessa forma, ocorrem esporulações diferenciadas e, em consequência, uma maior diversidade de FMA (BOEGER et al., 2005).

A aplicação dos índices ecológicos para medir a diversidade de espécies de FMA em outros estudos envolvendo florestas de araucária nativas, reflorestadas e impactadas por fogo, no Estado de São Paulo, não apontaram diferenças significativas entre essas áreas, mas os maiores valores de H, também foram reportados na floresta conservada e na reflorestada, no inverno (MOREIRA et al., 2009).

3.2.2.1 Análise de Componentes Principais (ACP)

Na ACP foi utilizada apenas a abundância de FMA identificadas em nível de espécie (Tabela 3.2). A ACP revelou que os dois primeiros componentes (CP1 e CP2) explicaram 42,1% da variabilidade total dos dados de abundância de espécies de FMA no inverno, sendo 23,1% explicados pela CP1 e 19% pela CP2 (Figura 3.3 a). No verão, a análise das variáveis pela ACP nos dois primeiros eixos explicou 41,6% da variabilidade dos dados (Figura 3.3 b).

Os resultados da ACP evidenciam a separação entre a floresta de araucária nativa NF e reflorestada RF. As espécies de FMA e as variáveis ambientais explicativas ocorreram de forma diferenciada entre as florestas com araucária nativa NF e a reflorestada RF nas duas épocas de coleta (Figuras 3.3 a e b). A maior ou menor associação de cada espécie de FMA, em cada floresta com araucária, pode ser visualizada pelos valores absolutos assumidos por cada espécie de FMA no lado positivo ou negativo das CP1 e CP2, no inverno e no verão (Figuras 3.3 a e 3.3 b).

No inverno, observou-se que a NF favoreceu a abundância, principalmente das espécies *Glomus alonatum* e *Scutellospora pellucida* devido a solos com maior teor de fósforo (P), potássio (K) e macroporosidade (Ma) (Figura 3.3 a e Tabela 3.1). Já em RF, as espécies *Paraglomus brasilianum* e *Racocetra intraornata* foram as que apresentaram maior abundância, seguidas por *Acaulospora mellea*, *A. foveata*, *A. tuberculata*, *A. bireticulata* e *A. Koskei* (Figura 3.3 a). Outras espécies (*Acaulospora scrubiculata*, *Ambispora appendicula* e *Gigaspora decipiens*) não ficaram fortemente associadas a nenhuma das florestas estudadas.

A ACP ainda mostrou que a área RF esteve mais associada a solos, com maior teor de umidade (Umi) e porosidade total o que pode ter favorecido a maior riqueza de espécies de FMA associada com essa área (Figura 3.3 a e Tabela 3.1).

No verão, as espécies de FMA mais associadas à RF foram *Ambispora appendicula*, *Racocetra intraornata* e *Acaulospora mellea*, além de *Acaulospora foveata* (Figura 3.3 b). Estas espécies foram favorecidas pela maior porosidade total encontrada em RF, nesta época (Tabela 3.1 e Figura 3.3 b). Outras espécies, tais como *A. Scrobiculata*, *Scutellospora scutata* e *Glomus alonatum*, ficaram mais relacionadas com maiores valores de macroporosidade, teor de K, carbono orgânico e pH, mas pouco influenciaram na separação das áreas. O mesmo também ocorreu com as espécies *A. koskei* e *Gigaspora decipiens* que, embora correlacionadas aos maiores teores de carbono e enxofre da serapilheira, respectivamente, mostraram fraca associação com as florestas estudadas.

Figura 3.3 – Análise de Componente Principal 1 (CP1) e 2 (CP2), discriminando Floresta de Araucária nativa (**NF**) e reflorestada (**RF**), espécies de FMA (→ em itálico) e as variáveis ambientais explicativas (→ em negrito) em duas épocas contrastantes: a= inverno (agosto de 2009) e b= verão (fevereiro de 2010). A. scrobiculata: *Acaulospora scrobiculata*; A. lacunosa: *Acaulospora lacunosa*; A. bireticulata: *Acaulospora bireticulata*; A. foveata: *Acaulospora foveata*; A. mellea: *Acaulospora mellea*; A. tuberculata: *Acaulospora tuberculata*; A. koskei: *Acaulospora koskei*; S. pellucida: *Scutellospora pellucida*; Corg: Carbono orgânico; P: Fósforo; K: potássio; Mg: Magnésio; pHCaCl₂: pH em cloreto de cálcio; Cser: Carbono da serapilheira; SSer: Enxofre da serapilheira; Umi: Umidade; Pt: Porosidade total; Ma: Macroporosidade e MSS: Massa Seca de Serapilheira

A floresta nativa NF apresentou maior abundância de *A. spinosa* mais associada a solos com maior teor de P e quantidade de matéria seca de serapilheira (Figura 3.3 b). Além dessa espécie, também estiveram associadas à NF *Scutellospora pellucida*, *S. calospora*, e *A. lacunosa*, embora não fortemente correlacionada especificamente a nenhuma das variáveis ambientais explicativas estudadas.

A ACP mostrou que, além da separação espacial das florestas estudadas, existem diferenças na distribuição das espécies na comunidade de FMA entre elas no inverno e verão (Figuras 3.3 a e 3.3 b). Essa variação maior ou menor na associação de FMA em cada floresta indica a grande diferença no comportamento de cada espécie, principalmente quando se comparam duas estações do ano. O comportamento diferenciado de diferentes espécies de FMA em solo sob floresta de araucária também foi observado por Moreira et al. (2009) quando comparou a floresta em diferentes estádios de conservação e em duas épocas (inverno e verão). Os resultados, do presente estudo, ainda mostram que algumas espécies de FMA foram mais favorecidas pelo estado de conservação da Floresta e atributos físico-químicos do solo, enquanto que outras não (Figuras 3.3 a e 3b).

3.3 Conclusões

A percentagem de colonização radicular da araucária foi baixa, tanto na floresta com araucária nativa NF quanto na reflorestada RF, mas a maior densidade de esporos, riqueza de espécies e valores de diversidade de Shannon (H) encontrados na área reflorestada indicam que há maior atividade dos FMA nesse ambiente, embora em construção e mais sujeito às variações edafo-climáticas.

A maior diversidade de FMA, nas áreas estudadas, foi representada pelos gêneros *Glomus*, *Acaulospora*, *Scutellospora* e *Gigaspora*, mas o número total de espécies foi similar entre as áreas, indicando que tanto a NF quanto a RF estão compartilhando a maioria das espécies de FMA presentes.

Foram encontrados 36 táxons de FMA, independente do tipo de floresta, sendo um número superior aos demais estudos envolvendo araucária, o que ressalta a importância das repetições verdadeiras, do mesmo tratamento (floresta) em diferentes regiões do Estado de São Paulo para melhor estimar a comunidade de FMA.

Independente da época de amostragem, a espécie *Ambispora appendicula* apresentou alta distribuição nos ecossistemas estudados, indicando melhor adaptação dessa espécie às condições edafoclimáticas locais e hospedeiros nessas áreas.

No verão, as espécies mais abundantes, independente da área estudada, foram *A. appendicula* e *Acaulospora lacunosa*, enquanto que no inverno foram *A. appendicula* e *Acaulospora koskei*, indicando que essas espécies são mais adaptadas às condições edafo-climáticas nessas áreas.

Algumas espécies, como *Paraglomus brasilianum*, *Glomus* sp.6 e *Glomus* sp.9, foram exclusivas da época de inverno, enquanto que *Gigaspora* sp.4, *Glomus* sp.8, *Scutelospora* sp.2, *S. calospora* e *S. scutata* o foram de verão. Já, no inverno, a floresta nativa apresentou maior abundância, principalmente, das espécies *Glomus alonatum* e *Scutellospora pellucida* associadas a solos com maior teor de fósforo (P), potássio (K) e macroporosidade (Ma). Já no reflorestamento de araucária, as espécies *Paraglomus brasilianum* e *Racocetra intraornata* foram as espécies mais abundantes, seguidas por *Acaulospora mellea*, *A. foveata*, *A. tuberculata*, *A. bireticulata* e *A. Koskei*, associadas a solos com maior teor de umidade.

No verão, as espécies de FMA mais relacionadas ao reflorestamento foram *Ambispora appendicula*, *Racocetra intraornata* e *Acaulospora mellea*, além de *Acaulospora foveata*, associadas a solos com maior porosidade total, enquanto que, na floresta nativa, as espécies mais abundantes foram *A. spinosa* associadas a solos com maior teor de P e quantidade de matéria seca de serapilheira.

Referências

- AIDAR, M.P.M.; CARRENHO, R.; JOLY, C.A. Aspects of arbuscular mycorrhizal fungi in an Atlantic Forest chronosequence in Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), SP. **Biota Neotropica**, Campinas, v. 4, p. 1-15, 2004.
- BARETTA, D.; MALUCHE-BARETTA, C.R.D.M.; CARDOSO, E.J.B.N. Análise multivariada de atributos microbiológicos e químicos do solo em florestas com *Araucaria angustifolia*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, Campinas, v. 32, p. 2683-2691, 2008.
- BARETTA, D.; BROWN, G.G.; JAMES, S.W.; CARDOSO, E.J.B.N. Earthworm populations sampled using collection methods in Atlantic Forests with *Araucaria angustifolia*. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, p. 384-392, 2007.
- BOEGER, M.R.T.; WISNIEWSKI, C.; REISSMANN, C.B. Nutrientes foliares de espécies arbóreas de três estádios sucessionais de Floresta Ombrófila Densa no Sul do Brasil. **Acta Botânica Brasílica**, São Paulo, v. 19, p. 167-181, 2005
- BONFIM, J.A. **Diversidade de fungos micorrízicos arbusculares em áreas restauradas de Mata Atlântica, São Paulo, Brasil**. 2011. 99 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

BOWEN, G.D. The biology and physiology of infection and its development. In: SAFIR, G.R. (Ed.). **Ecophysiology of mycorrhizal plants**. Boca Raton: CRC Press, 1987. p. 27-70.

BREUNINGER, M.; EINIG, W.; MAGEL, E.; CARDOSO, E.J.B.N.; HAMPP, R. Mycorrhiza of Brazil Pine (*Araucaria angustifolia* Bert. O. Ktze.). **Plant Biology**, Freiburg, v. 2, p. 4-10, 2000.

CARDOSO, E.J.B.N.; CARDOSO, I.M.; NOGUEIRA, M.A.; MALUCHE-BARETTA, C.R.D.; ALESSANDRA, M.P. Micorrizas arbusculares na aquisição de nutrientes pelas plantas. In: SIQUEIRA, J.O.; SOUZA, F.A. de; CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M. **Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil**. Lavras: Editora ULFA, 2010. p. 153-214.

CHEN, X.; TANG, J.; ZHI, G.; HU, S. Arbuscular mycorrhizal colonization and phosphorus acquisition of plants: effects of coexisting plant species. **Applied Soil Biology**, Amsterdam, v. 28, p. 259-269, 2005.

DE SOUZA, F.A.; STÜMER, S.L.; CARRENHO, R.; TRUFEN, S.F.B. Classificação e taxonomia de fungos micorrízicos arbusculares e sua diversidade e ocorrência no Brasil. In: SIQUEIRA, J.O.; SOUZA, F.A. de; CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M. **Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil**. Lavras: Editora ULFA, 2010. p. 15-75.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solo, 1997. 212 p.

FARJON, A. *Araucaria angustifolia*. In: IUCN 2009. **IUCN Red List of Threatened Species**. 2006. Disponível em: <<http://www.iucnredlist.org/details/32975/>>. Acesso em: 06 mar. 2010.

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**, Cambridge, v. 6, p. 235-246, 1963.

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

GOTO, B.T.; MAIA, L.C.; SILVA, G.A.; OEHL, F. *Racocetra intraornata*, a new species in the Glomeromycetes with a unique spore wall structure. **Mycotaxon**, New York, v. 109, p. 483-491, 2009.

JANOS, D.P. Vesicular-arbuscular mycorrhizae affect lowland tropical rain forest plant growth. **Ecology**, Washington, v. 61, p. 151-162, 1980.

JENKINS, W.R. A rapid centrifugation technique for separating nematodes from soil. **Plant Disease Report**, Chicago, v. 48, p. 692, 1964.

KOSKE, R.E.; TESSIER, B. A convenient, permanent slide mounting medium. **Mycological Society of America Newsletter**, v. 34, p. 59, 1983.

KRONKA, F.J.N.; NALON, M.A.; MATSUKUMA, C.K.; KANASHIRO, M.M.; YWANE, M.S.S.; PAVÃO, M.; DURIGAN, G.; LIMA, L.M.P.R.; GUILLAUMON, J.R.; BAITELLO, J.B.; BORGO, S.C.; MANETTI, L.A.; BARRADAS, A.M.F.; FUKUDA, J.C.; SHIDA, C.N.; MONTEIRO, C.H.B.; PONTINHAS, A.A.S.; ANDRADE, G.G.; BARBOSA, O.; SOARES, A.P.; JOLY, C.A.; COUTO, H.T.Z. **Inventário florestal da vegetação natural do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Florestal, 2005. 200 p.

LAMBAIS, M.R.; CARDOSO, E.J.B.N. Avaliação da germinação de esporos de fungos micorrízicos vesículo-arbusculares e da colonização micorrízica de *Stylosanthes guianensis* em solo ácido e distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 12, p. 249-255, 1988.

MAIA, L.C.; SILVA, F.S.B.; GOTO, B.T. Estrutura, ultraestrutura e germinação de glomerosporos. In: SIQUEIRA, J.O.; SOUZA, F.A. de; CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M. **Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil**. Lavras: Editora ULFA, 2010. v. 1, p. 75-118.

MANTOVANI, A.; MORELLATO, L.P.C.; REIS, M.S. Fenologia reprodutiva e produção de sementes em *Araucaria angustifolia* (Bert.) O.Kuntze. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 787-796, 2004.

McGONIGLE, T.P.; FITTER, A.H. Ecological specificity of vesicular arbuscular Mycorrhizal associations. **Mycological Research**, Oxford, v. 94, p. 120-122, 1990.

MILANEZ, F.R.; MONTEIRO NETO, H. Nota prévia sobre micorriza no pinho do Paraná. **Arquivos do Serviço Florestal**, Curitiba, v. 4, p. 87-93, 1950.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729 p.

MOREIRA, M.; BARETTA, D.; TSAI, S.M.; CARDOSO, E.J.B.N. Spore density and root colonization by mycorrhizal fungi in preserved or disturbed *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. ecosystems. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, p. 380-385, 2006.

_____. Arbuscular mycorrhizal fungi in a native forest and in reforested Araucaria Forest: a case study. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, p. 677-684, 2009.

MOREIRA, M.; BARETTA, D.; TSAI, S.M.; GOMES-DA-COSTA, S.M.; CARDOSO, E.J.B.N. Biodiversity and distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in *Araucaria angustifolia* forests. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, p. 393-399, 2007a.

MOREIRA, M.; NOGUEIRA, M.A.; TSAI, S.M.; GOMES-DA-COSTA, S.M.; CARDOSO, E.J.B.N. Sporulation and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in Brazil Pine in the Field and in the greenhouse. **Mycorrhiza**, New York, v. 17, p. 519-526, 2007b.

MOREIRA-SOUZA, M.; CARDOSO, E.J.B.N. Dependência micorrízica de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. sob doses de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 905-912, 2002.

MOREIRA-SOUZA, M.; TRUFEM, S.F.B.; GOMES-DA-COSTA, S.M.; CARDOSO, E.J.B.N. Arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Araucaria angustifolia* (Bert.) O.Ktze. **Mycorrhiza**, New York, v. 13, p. 211-215, 2003.

MORTON, J.B.; MSISKA, Z. Phylogenies from genetics and morphological characters do not support a revision of Gigasporaceae (Glomeromycota) into four families and five genera. **Mycorrhiza**, New York, v. 20, p. 483-496, 2010.

MORTON, J.B.; BENTIVENGA, S.P.; WHEELER, W.W. Germplasm in the International Collection of Arbuscular and Vesicular Arbuscular Mycorrhizal Fungi (INVAN) and procedures for culture development, documentation and storage. **Mycotaxon**, New York, v. 48, p. 491-528, 1993.

NEWSHAN, K.K; FITTER, A.H.; WATKINSON, A.R. Multi-functionality and biodiversity in arbuscular mycorrhizas. **Trends Ecology Evolution**, Amsterdam, v. 10, p. 407-41, 1995.

OLIVEIRA, M.; VENTURA, A. **A ocorrência de micorriza em *Araucaria angustifolia* (BERT.) O. Ktze e *Podocarpus lamberti***. Curitiba: Serviço Florestal, 1952. 25 p.

PEÑA-VENEGAS, C.P.; CARDONA, G.I.; ARGUELLES, J.H.; ARCOS, A.L. Micorrizas Arbusculares del Sur de La Amazonia Colombiana y su relación com algunos factores físicoquímicos y biológicos Del Suelo. **Acta Amazônia**, Manaus, v. 37, p. 327-336, 2007.

PIETROWSKI, J.S.; LEKBERG, Y.; HERNER, M.J.; RAMSEY, P.W.; RILLIG, M.C. Dynamics of mycorrhizae during development of riparian forests along an unregulated river. **Ecography**, Lund, v. 31, p. 245-253, 2008.

PURIN, S.; KLAUBERG-FILHO, O. Glomalina: nova abordagem para entendermos a biologia dos fungos micorrízicos arbusculares. In: SIQUEIRA, J.O.; SOUZA, F.A. de; CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M. **Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil**. Lavras: Editora ULFA, 2010. v. 1, p. 503-524.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285 p.

RIBEIRO, M.C.; METZGER, J.P.; MARTENSEN, A.C.; PONZONI, F.; HIROTA, M.; Brazilian Atlantic Forest: how much is left and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological and Conservation**, Oxford, v. 142, p. 1141-1153, 2009.

RILLIG, M.C. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 28, p. 355-363, 2004.

RILLIG, M.C.; MARDATIN, N.F.; LEIFHEIT, E.F.; ANTUNES, P.M. Mycelium of arbuscular mycorrhizal fungi increases soil water repellency and is sufficient to maintain water-stable soil aggregates. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 42, p. 1189-1191, 2010.

RILLIG, M.C.; WRIGHT, S.F.; NICHOLS, K.A.; SCHMITD, W.F.; TORN, M.S. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 233, p. 167-177, 2001.

RITCHER, M. (Org). **Conservação da biodiversidade e desenvolvimento sustentável de São Francisco de Paula – um plano preliminar**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 1998. 106 p.

SANTOS, R.L.R.; IVANAUSKAS, N.M. Estrutura do componente arbóreo de trecho de floresta de araucária na Estação Ecológica de Itaberá, Itaberá-SP, Brasil. **Instituto Florestal, Série Registros**, São Paulo, n. 42, p. 127-131, 2010.

SANTOS, R.L.R.; IVANAUSKAS, N.M.; POLISEL, R.T.; ESTEVES, R. Comunidade arbórea de trecho de floresta secundária com araucária na Estação Ecológica de Bananal, Bananal-SP. **Instituto Florestal**. Série Regional, São Paulo, n. 40, p. 137-142, jul. 2009.

SAS INSTITUTE. **SAS user's guide: statistics**. Versão 8.2. 6th ed. Cary, 2002.

SCHENCK, N.C.; PÉREZ, Y. **Manual for the identification of VA mycorrhizal fungi**. 3rd ed. Gainesville: University of Florida, 1990. 250 p.

SMITH, S.E.; BARKER, S.J. Plant phosphate transporter genes help harness the nutritional benefits of arbuscular mycorrhizal symbiosis. **Trends Plant Science**, Amsterdam, v. 75, p. 189-190, 2002.

SMITH, S.E.; READ, D.J. **Mycorrhizal symbiosis**. 3rd ed. New York; London: Academic Press, 2008. 800 p.

SOUZA, R.P.M. **Estrutura da comunidade arbórea de trechos de florestas de Araucária no estado de São Paulo, Brasil**. 2008. 101 p. Dissertação (Mestrado Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

STÜRMER, S.L.; SIQUEIRA, J.O. Diversidade de fungos micorrízicos arbusculares em ecossistemas brasileiros. In: MOREIRA, M.S.F.; SIQUEIRA, J.O.; BRUSSAARD, L. (Ed.). **Biodiversidade do solo em ecossistemas brasileiros**. Lavras: UFLA, 2008. p. 537-583.

STÜRMER, S.L.; KLAUBERG FILHO, O.; QUEIROZ, M.H.D.; MENDONÇA, M.M.D. Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in soils of early stages of a secondary succession of Atlantic Forest in South Brazil. **Acta Botanica Brasílica**, Feira de Santana, v. 20, p. 513-521, 2006.

TER BRAAK, C.J.F.; SMILAUER, P. **CANOCO reference manual and user's guide to Canoco for Windows: software for canonical community ordination (version 4)**. New York: Microcomputer Power, 1998.

TRUFEM, S.F.B. Aspectos ecológicos de fungos micorrízicos vesículo-arbusculares da mata tropical úmida da ilha do Cardoso, SP, Brasil. **Acta Botânica Brasileira**, Feira de Santana, v. 4, p. 31-45, 1990.

VAN DER HEIJDEN, M.; KLIRONOMOS, J.; URSIC, M.; MOUTOGLIS, P.; STREITWOLF-ENGEL, R.; BOLLER, T.; WIEMKEN, A.; SANDERS, I. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. **Nature**, London, v. 396, p. 69-72, 1998.

VIERHEILIG, H.; COUGHLAN, A.P.; WYSS, U.; PICHE, Y. Ink and vinegar, a simple staining technique for arbuscular-mycorrhizal fungi. **Applied Environmental Microbiology**, Washington, v. 64, p. 5004-5007, 1998.

VIOLI, H.; BARRIENTOS-PRIEGO, A.F.; WRIGHT, S.F.; ESCAMILLA-PRADO, E.; MORTON, J.B.; MENGE, J.A.; LOVATT, C.J. Disturbance changes arbuscular mycorrhizal fungal phenology and soil glomalin concentrations but not fungal spore composition in montane rainforests in Veracruz and Chiapas, Mexico. **Forest Ecology Management**, Amsterdam, v. 254, p. 276-290, 2008.

ZANDAVALLI, R.B.; STÜMER, S.L.; DILENBURG, L.R. Species richness of arbuscular mycorrhizal fungi in forests with Araucaria in Southern Brazil. **Hoehnea**, São Paulo, v.35(1): 63-68, 2008.

ZANGARO, W.; ASSIS, R.L.D.; GONÇALVES, M.C.; ANDRADE, G.; NOGUEIRA, M.A. Changes in arbuscular mycorrhizal associations and fine root traits in sites under different plant successional phases in Southern Brazil. **Mycorrhiza**, New York, v. 19, p. 37-45, 2008.

ZHAO, Z.W.; XIA, Y.M.; QIN, X.Z.; LI, X.W.; CHENG, L.Z.; SHA, T.; WAN, G.H. Arbuscular mycorrhizal status of plants and the spore density of arbuscular mycorrhizal fungi in the tropical rain forest of Xishuangbanna, Southwest China. **Mycorrhiza**, New York, v. 11, p. 159-162, 2001.

4 RELAÇÃO ENTRE ATIVIDADE MICROBIANA E ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS DO SOLO EM FLORESTA DE *Araucaria angustifolia* NATIVA E REFLORESTADA NO ESTADO DE SÃO PAULO

Resumo

A *Araucaria angustifolia* é a principal componente da Floresta Ombrófila Mista e, no Estado de São Paulo, está associada à alta diversidade de organismos edáficos, importantes na manutenção da qualidade do solo, o que torna a preservação desse ecossistema uma tarefa urgente e inadiável. O conhecimento gerado sobre os estudos edáficos desta floresta ainda são poucos e focados apenas numa determinada região. Este estudo tem como objetivo avaliar que atributos físico-químicos estão mais relacionados à atividade da enzima desidrogenase, à respiração basal e à biomassa microbiana do solo sob floresta nativa e reflorestada com *A. angustifolia* em duas épocas (inverno e verão), bem como quais destes atributos são os principais fatores discrepantes entre as áreas. Foram avaliadas florestas com *Araucaria angustifolia* nativa (NF) e reflorestada (RF) em três regiões distintas do Estado de São Paulo. Cada floresta foi representada por três repetições verdadeiras, nas quais, em cada floresta, foram coletadas, ao acaso, quinze amostras de solo para avaliação dos atributos físico-químicos e microbiológicos do solo. No mesmo ponto, foram coletadas amostras de serapilheira para avaliação de seu peso e atributos químicos. As coletas de solo e serapilheira foram realizadas no inverno e verão. Os atributos microbiológicos: carbono da biomassa microbiana (CBM), respiração basal (C-CO₂), quociente metabólico (qCO₂) e atividade da enzima desidrogenase (Desi) e os atributos físicos do solo (umidade, densidade, macroporosidade e porosidade total) e químicos [pH, carbono orgânico (C-org), P, Ca, K, Mg, Al, H+Al], além de massa seca de serapilheira e C, N e S da serapilheira foram submetidos à análise de variância (two-way ANOVA). Estes mesmos atributos microbiológicos, físico-químicos do solo, além de massa seca de serapilheira e químicos da serapilheira foram submetidos à Análise Canônica Discriminante (ACD) e à Análise de Correlação Canônica (ACC). O solo em NF apresentou maiores valores de K, P disponível, macroporosidade, massa seca de serapilheira e menores valores de qCO₂, independente de época de coleta, além de menor atividade da desidrogenase no inverno. Em RF, foram encontrados maiores valores de umidade, porosidade total e qCO₂, no inverno e verão, além da maior atividade da (Desi) no inverno. O CBM foi maior apenas na NF no verão, enquanto que o teor de C, N e S da serapilheira foi maior no inverno. No inverno, a ACC mostrou alta correlação da Desi e C-CO₂ entre os microbiológicos com o pH e H+Al, entre os atributos químicos, enquanto que no verão, C-org, umidade, Mg, pH e C da serapilheira se correlacionaram com a atividade da (Desi) e de C-CO₂. A ACD discriminou os atributos (H+Al), P disponível, porosidade total, teor de S da serapilheira e umidade do solo como sendo os de maior importância na separação das áreas NF e RF, sendo a umidade o mais relevante, independente de época de coleta, e C-CO₂ apenas no inverno. Na avaliação da ACC e ACD em conjunto percebe-se a pouca influência das variáveis microbiológicas na separação das áreas, nas duas épocas de coleta, indicando que o período de tempo decorrido da implantação da área RF já tenha sido suficiente para propiciar a recuperação da sua atividade microbiológica.

Palavras-Chave: Análise multivariada; Desidrogenase; Carbono da biomassa microbiana; Qualidade do solo; Atributos físico-químicos do solo; Atributos microbiológicos

Abstract

Araucaria angustifolia is the main component of the *Araucaria* Forest and, in the State of São Paulo, it is associated with high diversity of edaphic organisms, important in maintaining soil quality, which makes the preservation of this ecosystem an urgent and pressing task. The knowledge generated by means of the soil studies of this forest is still very scarce and focused only on a small geographic region. Our study aims to evaluate physical and chemical attributes that are correlated with the activity of the enzyme dehydrogenase, the basal respiration and microbial biomass under native and replanted *A. angustifolia* forests in two seasons (winter and summer). Also, the main attributes of these factors differing between areas, were studied. We evaluated native forest with *Araucaria angustifolia* (NF) and reforested areas (RF) in three regions of São Paulo State. Each forest was represented by three true replicates, where in each site, around the *Araucaria* trees, fifteen soil samples were collected at random, to evaluate the physical, chemical and microbiological attributes of the soil. At the same points, litter samples were collected to assess their weight and chemical attributes. The soil and litter samples were taken in winter and summer. The microbiological attributes: microbial biomass carbon (MBC), basal respiration ($\text{CO}_2\text{-C}$), metabolic quotient ($q\text{CO}_2$) and dehydrogenase enzyme activity (Desi) and the physical (moisture, density, macroporosity and total porosity) and chemical attributes of soil [pH, organic carbon (org-C), P, K, Mg, Al, H+Al], and dry mass of litter and C, N and S of the litter were subjected to analysis of variance (Two-way ANOVA) and the means were compared by the LSD test ($P < 0.05$). These same microbiological and physico-chemical soil attributes, the dry mass and chemical properties of litter were subjected to a Canonical Discriminant Analysis (CDA) and a Canonical Correlation Analysis (CCA). The soil in NF showed higher values of K, P, macroporosity, dry mass of litter and lower values of $q\text{CO}_2$ and dehydrogenase activity, regardless of sampling period. In RF higher levels of moisture, porosity, $q\text{CO}_2$ and activity of (Desi) were found. The MBC was higher only in NF in the summer, while the content of C, N and S were greater in winter. In winter, the CCA showed a high correlation of the Desi and $\text{CO}_2\text{-C}$ between the microbiological attributes, with pH and H+Al, between the chemical attributes, while in summer, org-C, moisture, Mg, pH and litter C are more associated with Desi and $\text{CO}_2\text{-C}$. The CDA discriminated the attributes (H+Al), available P, total porosity, S content of the litter and soil moisture as the most important in the separation of NF and RF, but moisture was the most relevant, regardless of the season, and $\text{CO}_2\text{-C}$ only in winter. In assessing the CCA and CDA together we see the little influence of the microbiological variables in the separation of areas in both sampling periods, which may indicate that the time passed since the installation of the reforested area has been long enough to allow for an almost complete recovery of the microbial activity.

Keywords: Multivariate analysis; Dehydrogenase; Carbon of microbial biomass; Soil quality; Attributes physico-chemical of soil; Microbiological attributes

4.1 Introdução

A *Araucaria angustifolia* (Bert). O. Kuntze é uma espécie arbórea típica da Floresta Ombrófila Mista no Brasil (VELOSO et al., 1991). O domínio da araucária, nessa formação, já foi muito exuberante na região sul e sudeste do país, mas a exploração inadequada desta

espécie resultou em redução significativa de sua área que, originalmente, cobria cerca de 253.000 km², e, atualmente cobrem apenas 12,6% (32.021 km²), sendo que 981 km² se encontram em área de preservação permanente, o que representa apenas 0,39% da área original da floresta (RIBEIRO et al., 2009).

A presença de alta biodiversidade encontrada na floresta de araucária tais como: fungos micorrízicos arbusculares (MOREIRA et al., 2009), bactérias diazotróficas (LAMMEL et al., 2007), diversidade microbiana (MALUCHE-BARETTA, 2007; BERTINI, 2010) e invertebrados de solo (MERLIM, 2005; BARETTA, 2010) associada a esse ecossistema, e fundamental à sua sustentação, tornou a sua preservação uma tarefa urgente e inadiável.

Recentemente, o estudo sobre qualidade do solo tem enfatizado a necessidade de seu uso não apenas como um componente crítico da biosfera terrestre para produção de alimento, madeira, combustível e fibras, mas também com ênfase à manutenção da biodiversidade e da qualidade ambiental (DORAN; ZEISS, 2000; BASTIDA et al., 2006; KASCHUK et al., 2010).

A qualidade do solo está intimamente relacionada com a manutenção e/ou melhoria de suas propriedades físicas, químicas e biológicas, as quais sofrem alterações com o tipo de manejo e uso da terra e pode ser medida pelo uso de indicadores sensíveis a essas alterações (DORAN; PARKIN, 1994; BARETTA et al., 2010). No entanto, o uso de indicadores para a medida da qualidade do solo deve incluir, além dos tradicionais atributos físicos e químicos, também os microbiológicos do solo para que, em conjunto, possam refletir melhor os processos que atuam na qualidade do solo (TÓTOLA; CHAER, 2002; BASTIDA et al., 2008; BARETTA et al., 2010).

Entre os indicadores microbiológicos de qualidade do solo, o carbono da biomassa microbiana (CBM) é um dos mais promissores e requeridos em função de sua rápida resposta às alterações ambientais, mais susceptível a mudanças do que os atributos físicos e químicos, inclusive o carbono orgânico do solo (POWLSON; JENKINSON, 1981; NOGUEIRA et al., 2006; BARETTA et al., 2005, 2010; KASCHUK et al., 2010).

A determinação da quantidade de carbono mineralizado na forma de CO₂, em virtude da decomposição da matéria orgânica, permite verificar se as condições climáticas, o manejo do solo e a presença de poluentes influenciam na atividade microbiana durante esse processo, podendo ser utilizado como indicador de qualidade do solo. Por exemplo, os ecossistemas em distúrbios tendem a se tornar fontes de CO₂ decorrente do aumento da taxa de decomposição e da interrupção ou diminuição da entrada de resíduos orgânicos (BARETTA et al., 2008).

Os resultados obtidos da respiração basal do solo e do CBM são também, utilizados no cálculo de outro importante indicador de qualidade do solo, o quociente metabólico (qCO_2). Este índice expressa a quantidade de C- CO_2 produzido por unidade de biomassa microbiana por unidade de tempo e, de acordo com Anderson; Domsch (1989) reflete uma situação de estresse por diferentes fatores.

Enzimas do solo são utilizadas como indicadoras de qualidade por sua alta sensibilidade e rápida resposta ao manejo e uso do solo, além de sua facilidade de determinação (TABATABAI, 1994). A enzima desidrogenase é muito susceptível a alterações na comunidade microbiana do solo e muito ativa em células vivas e responsável por reações de transferência de energia através da cadeia transportadora de elétrons (BASTIDA et al., 2006), refletindo assim a atividade oxidativa da biomassa do solo.

A comunidade microbiana do solo é fundamental em qualquer ecossistema porque atua na decomposição da matéria orgânica do solo e ciclagem de nutrientes com efeito sobre as propriedades químicas e físicas do solo e, conseqüentemente, na produtividade primária. Por outro lado, a comunidade microbiana do solo também é afetada por parâmetros físico-químicos do solo. Por exemplo, o pH do solo afeta tanto a atividade microbiana quanto a disponibilidade de nutrientes para micro-organismos e plantas. O carbono orgânico do solo é um componente crucial para a fertilidade do solo, utilizado como substrato pela microbiota e como fonte de nitrogênio e enxofre (IDOWU et al., 2008).

Em relação aos indicadores físicos de qualidade do solo, os mais utilizados e correlacionados com os atributos químicos e microbiológicos são densidade, porosidade, estabilidade de agregados, aeração, infiltração e capacidade de retenção de água, entre outros, (SCHOENHOLTZ et al., 2000). No intuito de melhor entender a qualidade do solo em florestas de araucária, relacionando diferentes indicadores, este trabalho tem como objetivo avaliar que atributos físico-químicos estão mais relacionados com a atividade da enzima desidrogenase, respiração basal e biomassa microbiana do solo sob floresta nativa e reflorestada com *A. angustifolia* em duas épocas contrastantes (inverno e verão) e quais destes atributos são os principais fatores discrepantes entre as áreas.

4.2 Desenvolvimento

4.2.1 Material e Métodos

4.2.1.1 Descrição das áreas de estudo

O estudo foi realizado em ambiente de Floresta Ombrófila Mista pertencente ao Bioma Mata Atlântica no Estado de São Paulo. Foram selecionadas áreas de florestas com *Araucaria angustifolia* nativa (NF) e reflorestada (RF) em três regiões distintas no Estado Figura 2.1 (Capítulo 2). Além de a região ser considerada como uma réplica verdadeira, em cada região, na NF e na RF foi delimitada uma parcela de 0,5 hectare, sendo está considerada uma repetição verdadeira de cada tipo de floresta.

Uma das regiões estudadas está localizada na Estação Ecológica de Bananal (EEB), na Serra da Bocaina entre os estados de São Paulo e Rio de Janeiro. A estação tem extensão de 884 hectares com elevação variável de 1200 a 1900 metros e temperaturas médias entre 20 e 33 °C, chegando à mínima de 0 °C no inverno (SANTOS et al., 2009) Figura 2.1 (Capítulo 2). Na primeira época de coleta (agosto de 2009) a temperatura média e pluviosidade foram de 17 °C e 40 mm respectivamente, enquanto que no verão (fevereiro de 2010) a temperatura média subiu para 22 °C e a maior pluviosidade foi observada no mês de janeiro, acima de 300 mm Figura 2.2 (Capítulo 2).

Distante 25 km da cidade de Bananal, a EEB apresenta clima mesotérmico úmido sem estação seca com verão brando, Cfb segundo a classificação de Köppen. A floresta com araucária nativa (NF) da EEB apresenta elevação de 1185 m (22°48'26" latitude Sul e 44°21'59" longitude Oeste) (floresta 1 da Figura 2.1, Capítulo 2). Além da *Araucaria angustifolia*, outras espécies vegetais fazem parte da composição arbórea, arbustiva e herbácea dessa área (Figura 2.3, Capítulo 2). Outras informações sobre a composição florística dessa área podem ser obtidas em Santos et al. (2009) e no Capítulo 2. A área reflorestada com araucária (RF), nessa mesma região, tem aproximadamente 38 anos e se encontra em estado de regeneração, com presença de outras espécies como *Dicksonia* sp, *Euterpe edulis* Mart., flora arbustiva, herbácea e de porte arbóreo, com presença de gramíneas em locais de menor densidade de cobertura vegetal. A área RF se encontra nas coordenadas 22° 48' 24" latitude Sul e 44° 22' 27" longitude Oeste, com elevação de 1126 m (floresta 2 das Figuras 2.1 e 2.4, Capítulo 2). O solo, em ambas as áreas de coleta, foi classificado como Cambissolo Háplico Tb Distrófico úmbrico (Anexos C e D). A caracterização físico-química do solo nos locais de coleta se encontra na Tabela 2.1 (Capítulo 2).

A segunda região estudada está localizada na Estação Ecológica de Itaberá (EEI) que se estende por 180 ha, no município de Itaberá-SP (Figura 2.1, Capítulo 2) e corresponde a um trecho de floresta secundária com presença de *Araucaria angustifolia* nativa. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é o Cfb mesotérmico úmido sem estação seca com verão brando. A temperatura média anual está entre 18-20 °C, sendo janeiro o mês mais quente (26 a 28 °C) e julho o mais frio, entre 8 a 16 °C, com índice pluviométrico de 1200 a 1400 mm anuais (SANTOS; IVANAUSKAS, 2010). No período da primeira coleta (agosto de 2009), foi verificada uma temperatura média de 17 °C e pluviosidade média de 45 mm, no mês de agosto, embora no mês de julho tenha sido 250 mm, atípica para essa época. No verão, o mês de fevereiro foi o mais quente e janeiro o de maior pluviosidade, 25 °C e 420 mm respectivamente (Figura 2.5, Capítulo 2). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico típico (Anexos C e D), relevo suave a ondulado. A floresta com araucária nativa (NF) localiza-se nas coordenadas 23° 50' 21" latitude Sul e 49° 08' 40" longitude Oeste, e altitude média de 678 metros (floresta 3 da Figura 2.1, Capítulo 2).

Além da araucária, outras espécies vegetais arbóreas e arbustivas estão presentes na composição florística dessa área, como descrito no Capítulo 2 e (Figura 2.6 do mesmo capítulo). Outras informações a respeito da florística dessa área podem ser obtidas em Santos ; Ivanauskas (2010). Nessa mesma região, a área reflorestada com *Araucaria angustifolia* (RF) está localizada na estação Experimental de Itapeva (EExI), petencente ao município de Itapeva-SP. Essa área, implantada em 1964, tem o predomínio de araucárias, presença de plântulas da espécie no sub-bosque, além de outras espécies arbustivas, herbáceas e baixa presença de espécies de porte arbóreo. Está localizada entre as coordenadas 24° 04' 19" latitude Sul e 49° 01' 07" longitude Oeste (floresta 4 da Figura 2.1 e Figura 2.7, Capítulo 2), numa altitude de 740 metros sob um Nitossolo Vermelho Eutroférico latossólico (Anexos C e D).

A terceira região está localizada no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), município de Iporanga-SP e em área particular nos arredores do parque, no município de Barra do Chapéu-SP (Figura 2.1, Capítulo 2). O clima da região é do tipo temperado brando sem estiagem (Cfb) segundo classificação de Köppen, sendo o mês de fevereiro o mais quente com temperatura média de 22,5 °C e entre maio e agosto, o período de temperaturas mais baixas, com média variando entre 15 e 16,7 °C (SOUZA, 2008). Na coleta de inverno (agosto de 2009), abril foi o mês de menor pluviosidade (< 50 mm) e julho, o mais frio com temperatura média de 17 °C, enquanto que, no verão, o mês de maior

pluviosidade foi janeiro (acima de 400 mm) e temperatura média próxima a 24 °C (Figura 2.8, Capítulo 2). A floresta com araucária nativa (NF) se encontra em propriedade particular coberta por 48 ha de floresta Ombrófila Mista com elevação de 785 m, localizada no município de Barra do Chapéu-SP. O solo foi classificado como Cambissolo Háplico Tb Distrófico úmbrico (Anexos C e D). A cobertura vegetal dessa área é composta, entre outras, por *Dicksonia sellowiana* no sub-bosque, *Allophylus edulis* é típica do sub-dossel, *Prunus myrtifolia* no dossel e *Araucaria angustifolia* como emergente. Outras informações sobre a florística dessa área se encontram no Capítulo 2 e são descritas em Souza (2008) (Figura 2.9, Capítulo 2). A área NF está situada entre as coordenadas 24° 28 '40" latitude Sul e 49° 01' 07" longitude Oeste (floresta 5 da Figura 2.1, Capítulo 2). A área reflorestada com araucária (RF), nessa mesma região, fica localizada no “Núcleo do Arreado”, dentro do PETAR, município de Iporanga-SP. A área tem presença de espécies arbóreas em regeneração, arbustivas e herbáceas, além de cobertura por gramíneas em locais de menor densidade vegetal (Figura 2.10, Capítulo 2). O solo foi identificado como Cambissolo Háplico Tb umbrico (Anexos C e D) e se encontra nas coordenadas 24° 20' 14" latitude Sul e 49° 36' 14" longitude Oeste (floresta 6 da Figura 2.1, Capítulo 2), com altitude média de 932 m. Na Tabela 2.1, (Capítulo 2) estão as informações sobre a média dos valores das características físico-químicas do solo na floresta NF e na reflorestada RF.

4.2.1.2 Avaliação dos atributos microbiológicos, químicos e físicos do solo

Em cada floresta (NF e RF) de, aproximadamente, 0,5 ha, nas três regiões selecionadas, e ao redor das árvores de araucária, foram coletadas, ao acaso, quinze amostras de solo para avaliação dos atributos microbiológicos, químicos e físicos do solo. Cada amostra foi proveniente de cinco subamostras. As coletas foram realizadas no inverno (agosto de 2009) e verão (fevereiro de 2010). O solo, coletado ao redor de cada árvore de araucária, na profundidade de 0-20 cm, foi acondicionado em sacos de polietileno, mantido sob refrigeração e transportado para o laboratório em caixas de isopor com gelo. No laboratório o solo foi mantido em câmara fria (4°C) até o momento das análises.

4.2.1.3 Carbono da biomassa microbiana, respiração basal do solo e atividade da desidrogenase (Desi)

O carbono da biomassa microbiana (CBM) foi determinado pelo método da fumigação-extração (VANCE et al., 1987), enquanto que a determinação da atividade microbiana foi avaliada pela respiração basal do solo Alef; Nannipieri (1995) e o $q\text{CO}_2$ calculado a partir dos resultados de C-CO_2 e do CBM, conforme descrito em Anderson e Domsch (1993). A atividade da enzima desidrogenase foi determinada em amostras de 5 g de solo conforme descrito em Casida et al. (1964). Estas metodologias estão descritas no subitem 2.2.1.6 (Capítulo 2).

4.2.1.4 Determinação da matéria seca da serapilheira e C, N e S

A massa seca de serapilheira foi determinada a 55 °C até peso constante. A seguir a serapilheira foi triturada, moída, passada em peneira de 100 mesh e o teor de C (Cser), N (Nser) e S (Ser) foi determinado por combustão seca em analisador elementar para C, N e S. Nos mesmos pontos de coleta dos monólitos, foram retiradas amostras de solo para avaliação da umidade (105 °C por 48 h) e atributos, físico-químicos e microbiológicos do solo

4.2.1.5 Determinação dos atributos físico-químicos do solo

Os atributos físico-químicos do solo foram determinados conforme metodologia descrita em Embrapa (1997) e Raij et al. (2001) respectivamente, conforme descrito no subitem 2.2.1.5 (Capítulo 2).

4.2.1.6 Análise estatística

Os atributos microbiológicos (CBM, C-CO_2 , $q\text{CO}_2$ e Desi) foram submetidos à análise de variância (ANOVA Two way) e as médias, comparadas pelo teste LSD ($P < 0,05$). Estes atributos (CBM, C-CO_2 , $q\text{CO}_2$ e Desi) também foram submetidos à análise canônica discriminante (ACD) para identificar quais deles foram mais relevantes para discriminar as áreas estudadas (CRUZ-CASTILLO et al., 1994; BARETTA et al., 2005). Quando observada diferença significativa entre as áreas, pela ACD, os valores dos coeficientes canônicos padronizados (CCP) foram submetidos a teste de comparação de médias LSD ($P < 0,05$), de

acordo com Cruz-Castillo et al. (1994). Adicionalmente, os atributos microbiológicos (CBM, C-CO₂, qCO₂ e Desi), químicos do solo [(pH CaCl₂, C-Org, P, K, Mg, Al, H + Al] e da serapilheira (Cser, Nser, Sser), físicos do solo (Ds, Ma, Pt e Umi) e MSS foram submetidos à Análise de Correlação Canônica (ACC). As análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa SAS versão 8.2 (SAS INSTITUTE, 2002).

4.2.2 Resultados e Discussão

4.2.2.1 Atributos físicos, químicos e microbiológicos

Foram encontradas diferenças significativas para alguns dos atributos físicos, químicos e microbiológicos, entre os ecossistemas avaliados, nas duas épocas de coleta (Tabela 4.1). Independentemente de época de coleta, o solo das áreas de floresta nativa com araucária (NF) apresentou valores mais elevados de potássio (K), fósforo disponível (P) e macroporosidade, enquanto que o solo sob áreas reflorestadas com araucária (RF) apresentou maiores valores de porosidade total e umidade do solo (Tabela 4.1).

No verão, foi observada uma redução das concentrações de potássio (K) e P disponível do solo, coincidindo com valores mais elevados de umidade do solo, o que pode favorecer a utilização desses elementos pela comunidade biológica do solo. Além das diferenças encontradas entre as florestas, foram observadas também diferenças significativas para alguns dos atributos dentro de época (Tabela 4.1). Nesse sentido, foram observados maiores conteúdos de C e N na serapilheira da floresta nativa com araucária (NF), no inverno, em comparação com o reflorestamento (RF).

Os maiores valores de massa seca de serapilheira também foram encontrados em NF, independente de época de coleta, provavelmente refletindo as condições de maior cobertura e diversificação vegetal e, conseqüentemente, maior aporte de restos vegetais em NF (Tabela 4.1). O aporte de restos vegetais ao solo está relacionado com o teor de C do solo, que não diferiu significativamente entre as áreas, provavelmente porque representa uma característica química mais estável e de pouca flutuação em curto período de tempo (época). Contudo, seu teor pode aumentar em determinadas épocas do ano, refletindo o aumento do teor de matéria orgânica e ciclagem de nutrientes, alimentando um ciclo de estímulo à atividade biológica edáfica (MALUCHE-BARETTA et al., 2007; CORREIA; ANDRADE, 2008).

De modo geral, em ambas as áreas estudadas, os solos são ácidos e, juntamente com os demais valores dos atributos químicos, estão na mesma faixa dos encontrados por Bertini (2010) em solos sob florestas de araucária nativa e reflorestada, no estado de São Paulo. A

macroporosidade do solo foi maior nas áreas preservadas com araucárias, em comparação com a área em reflorestamento, e os valores encontrados nos dois ecossistemas estudados, foram iguais ou superiores ao limite mínimo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Tabela 4.1), ideal para que ocorra a adequada difusão de oxigênio e capacidade de infiltração de água no solo, o que demonstra uma boa qualidade estrutural do solo, não comprometendo o bom desenvolvimento da comunidade biológica (GRABLE; SIEMER, 1968; ALVES et al., 2007).

Em relação à porosidade total, os maiores valores foram observados nas áreas de reflorestamento com araucária (RF) em comparação à NF, provavelmente em função dos valores mais elevados de microporosidade e de teor de argila dos solos em RF (Tabela 2.1 Capítulo 2).

Tabela 4.1 - Atributos químico-físicos do solo, químicos da serapilheira e microbiológicos do solo em Floresta de Araucária nativa e reflorestada no inverno e verão (n=45)

Variável ambiental	Unidades	Inverno		Verão	
		Nativa	Reflorestada	Nativa	Reflorestada
pH CaCl ₂	(0,01 mol L ⁻¹)	4,0 a	4,2 a	4,0 a	4,1 a
H + Al	(m mol _C kg ⁻¹)	113,2 a	127,0 a	117,80 a	137,69 a
K	(m mol _C kg ⁻¹)	2,3 a	1,5 b	1,6 a	1,2 b
Al	(m mol _C kg ⁻¹)	23,2 a	25,84 a	14,4 b	21,34 a
Mg	(m mol _C kg ⁻¹)	8,8 a	8,0 a	9,2 a	7,2 a
P disponível	(mg kg ⁻¹)	8,9 a	5,6 b	7,6 a	4,4 b
Carbono orgânico	(g kg ⁻¹)	32,6 a	35,5 a	34,3 a	33,3 a
Umidade	(%)	28,5 b	40,7 a	31,9 b	46,3 a
Densidade	(g cm ⁻³)	1,09 a	1,02 a	1,09 a	1,02 a
Porosidade total	(m ³ m ⁻³)	0,57 b	0,63 a	0,56 b	0,62 a
Macroporosidade	(m ³ m ⁻³)	0,15 a	0,11 b	0,15 a	0,11 b
MSS	(kg m ⁻²)	1,12 a	1,10 b	1,14 a	0,93 b
C serapilheira	(%)	43,8 a	40,0 b	33,03 a	34,44 a
N serapilheira	(%)	1,7 a	1,3 b	1,39 a	1,25 a
S serapilheira	(%)	0,18 a	0,14 b	0,20 a	0,17 a

Carbono orgânico= Corg; Porosidade total= P. total; Macroporosidade= Macro; MSS= Massa seca de serapilheira. Letras minúsculas iguais, seguidas na linha, não diferem entre si pelo teste de LSD ($P < 0,05$)

Os teores de carbono da biomassa microbiana (CBM) apresentaram diferenças significativas entre as áreas ($P < 0,05$) apenas no verão (Figura 4.1). O maior e o menor valor de CBM foram encontrados na amostragem de verão, onde a biomassa em NF foi (892,77 µg

C g⁻¹) aproximadamente 21% maior do que em RF (705,75 $\mu\text{g C g}^{-1}$), mostrando que a manutenção da cobertura vegetal nativa reúne melhores condições (macroporosidade, massa seca de serapilheira e teores de K e P que auxiliam no desenvolvimento e estabelecimento da microbiota edáfica (WARDLE, 1992) (Tabela 4.1). Além disso, mudanças sazonais na atividade microbiana podem ser decorrentes de aumento de temperatura e pluviosidade, principalmente em regiões tropicais, o que acelera os processos metabólicos e promove a atividade da comunidade microbológica do solo (JOERGENSEN et al., 1990; WARDLE, 1992; BASTIDA et al., 2006).

No inverno, os valores de CBM nas áreas NF e RF não diferiram entre si, sendo de 818,02 e 727,93 $\mu\text{g C g}^{-1}$ solo, respectivamente (Figura 4.1). O CBM é relatado na literatura como um bom indicador de alterações do equilíbrio do solo e do ecossistema (BARETTA et al., 2005, 2008, 2010; SILVA et al., 2009; KASCHUK et al., 2010). Os resultados de CBM são praticamente o dobro dos valores encontrados por Baretta (2007) e Bertini (2010) em solos sob floresta nativa e reflorestada de araucária no estado de São Paulo, mas dentro da faixa dos encontrados em ecossistemas florestais da Mata Atlântica, que variam de 683 a 1520 mg C kg⁻¹ solo (KASCHUK et al., 2010).

Figura 4.1 - Carbono da biomassa microbiana (CBM) em Floresta de Araucária nativa (NF) e reflorestada (RF), em agosto de 2009 (inverno) e fevereiro de 2010 (verão). Letras minúsculas e maiúsculas comparam entre florestas na mesma época. Teste LSD a 5%. (T): Desvio Padrão (n=45)

Contrariamente ao CBM, a respiração microbiana basal do solo (C-CO₂) não diferiu significativamente entre as áreas e épocas de amostragens (Figura 4.2). No inverno, em NF e RF foram encontrados valores de 63,82 e 75,54 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ solo d}^{-1}$, respectivamente, enquanto que no verão esses valores foram de 64,44 e 68,08 $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ solo d}^{-1}$, respectivamente. A proximidade entre os valores de C-CO₂ obtidos, nas diferentes áreas, pode indicar atividade microbiana similar entre as áreas. Os valores de C-CO₂ estão na mesma faixa dos encontrados por Bertini (2010) e por Bini (2009) em solo sob floresta de araucária nativa e reflorestada no estado de São Paulo e do Paraná respectivamente.

Figura 4.2 – Respiração basal microbiana do solo (C-CO₂), na Floresta de Araucária nativa (NF) e reflorestada (RF), em Agosto de 2009 (inverno) e fevereiro de 2010 (verão). Teste LSD a 5%. ns: não significativo. (T): Desvio Padrão (n=45)

Deve-se ressaltar que taxas mais elevadas de respiração podem ocorrer, também, como resultado de a microbiota do solo ter acesso a um “pool” maior de substratos de carbono prontamente assimilável, ou em função de uma rápida oxidação de um pequeno “pool” (ISLAM; WEIL, 2000). Outros autores também não encontraram diferenças significativas em relação à respiração basal do solo entre floresta nativa e reflorestada de araucária, em condições semelhantes às observadas neste estudo (BARETTA, 2007; BERTINI, 2010).

A taxa de respiração basal por unidade de biomassa microbiana por unidade de tempo ($q\text{CO}_2$) é um parâmetro que indica mais claramente as mudanças ocorridas em diferentes ecossistemas pelo aumento da atividade microbiológica (ISLAM; WEIL 2000; BARETTA et al., 2005; BASTIDA et al., 2008). Os valores de quociente metabólico $q\text{CO}_2$ diferiram significativamente ($P < 0,05$) entre as áreas amostradas nas duas épocas de coletas (Figura 4.3), sendo a única variável microbiológica que diferenciou a área NF da RF nas duas coletas. No inverno e no verão, os valores de $q\text{CO}_2$ encontrados em NF e RF foram de 3,27 e 4,46 e de 3,01 e 4,42 $\text{ng C-CO}_2 \mu\text{g}^{-1} \text{h}^{-1}$ respectivamente (Figura 4.3).

Os maiores valores de $q\text{CO}_2$ encontrados no reflorestamento (RF) podem indicar maior consumo de carbono prontamente assimilável pela comunidade microbiana, que requer maior necessidade energética para sua sustentação, associada a uma condição de distúrbio, com maiores perdas de CO_2 , característica de ecossistemas em construção (Figura 4.3). Valores mais elevados de $q\text{CO}_2$ em solos sob cultivo (maior estresse) comparados a solos de sistemas mais estáveis tais como florestas estáveis, foram relatados por Islam; Weil (2000), inclusive em florestas de araucária impactadas por fogo comparadas à floresta de araucária nativa e reflorestada (BARETTA, 2007; BERTINI, 2010) e cultivo agrícola com culturas anuais e Floresta Ombrófila Mista (BINI, 2009). Essa tendência dos maiores valores de $q\text{CO}_2$ pode indicar um ambiente de estresse ecológico e de degradação ou um alto nível de produtividade nessa área, o que corresponde ao histórico da área RF, mais sujeita à intervenção antrópica e a mudanças edafoclimáticas.

Contrariamente, (NF) apresentou menores valores de $q\text{CO}_2$ e, portanto, indica que são ecossistemas mais estáveis, com melhor eficiência dos micro-organismos em converterem os resíduos orgânicos em biomassa microbiana e maior sustentabilidade, o que condiz com o histórico da área em NF (TÓTOLA; CHAER, 2002; GIL-SOTRES et al., 2005; BARETTA, 2007).

A utilização do $q\text{CO}_2$, como indicador, está baseada na teoria de sucessão ecológica, proposta por Odum (1969) que, de acordo com esta teoria, o valor de $q\text{CO}_2$ sofre redução durante a sucessão, ou ao longo da regeneração, ocasionada por algum distúrbio. Já no estado sucessional clímax, como é o caso da floresta com araucária nativa (NF), um dos tratamentos deste estudo, a comunidade microbiana do solo se tornaria mais eficiente em conservar carbono no solo.

Figura 4.3 - Quociente metabólico (qCO_2), na Floresta de Araucária nativa (NF) e reflorestada (RF), em agosto de 2009 (inverno) e fevereiro de 2010 (verão). Letras minúscula e maiúscula comparam entre florestas na mesma época. Teste LSD a 5%. (T): Desvio Padrão (n=45)

Os valores de atividade da enzima desidrogenase (Desi) diferiram significativamente ($P < 0,05$), entre as áreas NF e RF, apenas no inverno (Figura 4.4). Nessa época, os valores de atividade em NF e RF foram de 10,9 e 10,1 $\mu\text{g TTF g}^{-1} \text{ solo d}^{-1}$, respectivamente, enquanto que no verão os valores de atividade da Desi, em NF e RF, foram de 10,3 e 9,8 $\mu\text{g TTF g}^{-1} \text{ solo d}^{-1}$. A maior atividade da Desi no reflorestamento, em comparação com a floresta com araucárias nativas, está relacionada com o metabolismo de micro-organismos viáveis do solo, indicando especificamente atividade oxidativa do solo, e, juntamente com CBM, C-CO₂ e qCO_2 tem sido utilizada como parâmetro bioquímico geral para medir a influência do manejo na qualidade do solo (GIL-SOTRES et al., 2005; BASTIDA et al., 2006; BINI, 2009).

No inverno, a menor densidade de cobertura vegetal e a maior exposição do solo em RF pode ter propiciado maior oscilação de temperatura, umidade do solo, entre outros fatores que influenciaram o aumento da atividade microbiológica, representada pelo maior valor de Desi, em relação à NF (Figura 4.4).

Figura 4.4 - Atividade da enzima desidrogenase (Desi), na Floresta de Araucária nativa (NF) e reflorestada (RF), em agosto de 2009 (inverno) e fevereiro de 2010 (verão). Letras minúsculas e maiúsculas comparam entre florestas na mesma época. Teste LSD a 5%. (T): Desvio Padrão (n=45)

Bini (2009) encontrou maior atividade da desidrogenase em solos de área agrícola ($16,46 \mu\text{g TTF g}^{-1} \text{ solo d}^{-1}$), comparada a solos sob Floresta Ombrófila Mista ($11,28 \mu\text{g TTF g}^{-1} \text{ solo d}^{-1}$) e sob área em reflorestamento com araucária ($10,65 \mu\text{g TPF g}^{-1} \text{ solo d}^{-1}$), no Paraná-PR. A situação de estresse metabólico, que possivelmente esteja ocorrendo em RF, indicado pelos valores mais elevados de $q\text{CO}_2$, é confirmada pela maior atividade da Desi, nessa área, principalmente no inverno (Figuras 4.3 e 4.4).

Embora os parâmetros de atividade microbiológica tenham indicado a separação das áreas, os seus valores foram próximos sob o ponto de vista da atividade microbiológica. Nesse sentido, reforça-se a necessidade de analisar a relação entre atributos físico-químicos e microbiológicos para melhor entendimento da separação entre os dois sistemas estudados. Por exemplo, a atividade de algumas enzimas, como a desidrogenase, avaliada em conjunto com a respiração basal do solo, biomassa microbiana e alguns parâmetros físico-químicos pode auxiliar na interpretação da condição funcional de diferentes ecossistemas (MATSUOKA et al., 2003; BARETTA et al., 2008)

4.2.2.2 Análise de Correlação Canônica (ACC)

Na ACC foram estudadas quatro correlações canônicas de atributos microbiológicos (CBM, $q\text{CO}_2$, respiração basal e desidrogenase) e 12 variáveis ambientais [(pH CaCl_2), H+Al, K, Al, C-org, P-disponível, Mg e umidade do solo], massa seca de serapilheira, carbono, nitrogênio e enxofre da serapilheira. As variáveis microbiológicas foram denominadas biológicas (BIO1) e as ambientais (físico-químicas) de químicas (QUIM1). Os atributos físicos do solo, densidade, macroporosidade e porosidade total não foram usadas na ACC porque só foram avaliados no inverno e poderiam diminuir a confiabilidade das correlações significativas. Algumas variáveis foram retiradas da ACC por apresentarem efeito de colinearidade (BARETTA et al., 2008). Além disso, apenas a primeira correlação canônica dos dados foi avaliada, considerando seu maior valor e nível de significância ($P < 0,0001$) em relação às demais correlações canônicas.

No inverno, a primeira correlação canônica entre os atributos físico-químicos (QUIM1) e microbianos (BIO1) foi de 0,91 ($P < 0,0001$), sendo 81% (VCFQ1 - 0,81) da variação dos escores da primeira variável canônica dos atributos BIO1 explicada pelos escores da primeira variável canônica dos atributos QUIM1 (Figura 4.5 a). O elevado valor de correlação canônica (CC) entre atributos microbiológicos e físico-químicos ocorreu pelos maiores valores de CC dos atributos microbiológicos, principalmente da desidrogenase (0,7410) e químicos tais como: pH (0,5936), magnésio (0,3466), carbono orgânico (0,1970) e nitrogênio da serapilheira (0,1306), além de físicos tais como: umidade do solo (0,2652) e massa seca da serapilheira (0,1756) (Tabela 4.2).

A variável canônica biológica 1 (VCB1) apresentou maiores valores de coeficientes canônicos padronizados (CCP) para o atributo microbiológico desidrogenase (1,0683), seguida da respiração basal do solo (0,4683) (Tabela 4.2), uma vez que a maior CC foi observada para desidrogenase (0,7470). Os sinais positivos de desidrogenase e C- CO_2 (CCP e CC) indicam que as áreas apresentaram valor elevado de atividade de desidrogenase e de emissões de CO_2 e alta sensibilidade aos atributos físico-químicos relacionados (Tabela 4.2). Diferentes atributos físico-químicos correlacionaram-se com a atividade da desidrogenase e respiração microbiana basal do solo (C- CO_2) no inverno.

Figura 4.5 - Análise de Correlação Canônica (ACC) entre os atributos físico-químicos do solo e da serapilheira (QUIM1) e microbiológicos (BIO1). Microbiológicos (C-CO₂, CBM, q CO₂ e Desi); químicos do solo [pHCaCl₂, C-org, teores de (H+Al), K, Al, P e Mg], químicos da serapilheira (C, N e S), umidade do solo e massa seca de serapilheira coletadas no inverno (A) e no verão (B) na Floresta de araucária nativa (NF) e reflorestada (RF), (n=45)

No inverno, no CCP destacam-se o pH (1,2746) e acidez trocável (H+Al) (0,6320). No verão, destacam-se com maior CCP o pH (0,5452), umidade (0,4561), Mg (0,2727) e o carbono orgânico (C-org) (0,2220) e carbono da serapilheira (0,1131), que estão associados à maior atividade da desidrogenase (0,7940) e C-CO₂ (0,3149) (Tabela 4.2). Neste sentido,

sugere-se que alterações nestes parâmetros físico-químicos, em função da época, podem mudar o comportamento metabólico dos micro-organismos e, desta maneira, modificar a funcionalidade do sistema.

Tabela 4.2 - Coeficientes Canônicos Padronizados (CCP) e Correlação Canônica (CC) quanto aos atributos microbiológicos das Variáveis Canônicas Biológicas¹ (VCB1) e Físico-Químicas (VCFQ1) do solo e da serapilheira em floresta de araucária nativa (NF) e reflorestada (RF), no inverno e verão, São Paulo, Brasil. (n=45)

Atributo	Inverno		Verão	
	CCP	CC	CCP	CC
Variável ambiental	VCB1		VCB1	
Carbono da biomassa microbiana (CBM)	-0,6796	0,0111	-0,4769	0,0055
Respiração basal do solo (C-CO ₂)	0,4683	0,0852	0,3149	0,3567
Quociente metabólico (<i>q</i> CO ₂)	-0,2349	0,0841	0,0694	0,4086
Desidrogenase (Desi)	1,0683	0,7470	0,7940	0,5952
	VCFQ1		VCFQ1	
pH do solo (CaCl ₂)	1,2746	0,5936	0,5452	0,5483
Hidrogênio + Alumínio (H + Al)	0,6320	0,0963	-0,3017	0,1996
Potássio (K)	-0,1805	0,0006	-0,0992	0,0837
Alumínio (Al)	-0,0191	0,0746	-0,0521	0,1490
Carbono orgânico (C-org)	0,0850	0,1970	0,2220	0,2070
Fósforo (P)	0,0271	0,0001	-0,0695	0,0001
Magnésio (Mg)	0,0274	0,3466	0,2727	0,3856
Massa seca de serapilheira (MSS)	-0,0384	0,1756	-0,2119	0,0188
Umidade do solo	0,0717	0,2652	0,4561	0,0402
Carbono da serapilheira (C ser)	0,0794	0,0290	0,1131	0,0181
Nitrogênio da serapilheira (N ser)	0,0119	0,1306	-0,0542	0,0605
Enxofre da serapilheira (S ser)	-0,2574	0,0898	-0,0899	0,0515

O *q*CO₂ apresentou valor negativo para CCP, no inverno, e, no verão, um valor positivo, mas baixo, pouco se relacionando positivamente com os atributos químicos do solo. O carbono da biomassa microbiana (CBM) apresentou valores de CCP negativos, tanto no inverno (-0,6796) quanto no verão (-0,4769), sendo considerado um atributo supressor e com pouca influência dos atributos químicos do solo e da serapilheira (Tabela 4.2). Contudo, tanto o CBM, quanto *q*CO₂ têm sido reportados como atributos microbiológicos importantes na indicação de qualidade do solo em diferentes ecossistemas (BARETTA et al., 2010; KASCHUCK et al., 2010).

As diferenças encontradas para os atributos físico-químicos indicam que passados, no mínimo, mais de 25 anos desde a implantação da área reflorestada com araucária (RF), esses atributos ainda são discriminantes em relação ao solo sob a floresta com araucária nativa (NF) (Figura 4.6).

Considerando-se a variável físico-química 1 (VCQ1), os atributos pH e H+Al apresentaram valores altos de CCP, indicando que esses atributos estão diretamente relacionados com os atributos microbiológicos, mantendo uma relação positiva, especialmente com os atributos desidrogenase e respiração basal microbiana do solo (C-CO₂) (Tabela 4.2). Os valores negativos de CCP e CC, tanto em VCFQ1 quanto na VCB1, indicam que tais atributos são semelhantes nas áreas estudadas, sendo considerados atributos supressores, com baixa contribuição na separação entre as áreas.

No verão, a primeira correlação canônica entre os atributos físico-químicos e microbiológicos foi de 0,86 ($p < 0,0001$), sendo que a variação microbiológica foi mais explicada pela primeira variável canônica dos atributos físico-químicos (0,73) (Figura 4.5 b). Este elevado valor de correlação canônica (0,86) entre atributos microbiológicos e físico-químicos ocorreu pelos maiores valores de CC dos atributos microbiológicos desidrogenase, C-CO₂ e $q\text{CO}_2$ e químicos pH, H+Al, alumínio, carbono orgânico e magnésio (Tabela 4.2).

A variável canônica biológica 1 (VCB1) foi semelhante à observada no inverno, uma vez que apresentou maiores valores de coeficientes canônicos padronizados (CCP) para o atributo microbiológico desidrogenase, seguidos da respiração basal do solo C-CO₂ (Tabela 4.2). Além disso, também foi observada maior correlação canônica (CC) para desidrogenase (0,60). Os sinais positivos de desidrogenase, C-CO₂ e $q\text{CO}_2$ indicam que as áreas apresentaram um valor elevado de atividade de desidrogenase e respiração microbiana, fato este mais pronunciado no verão. Na variável química 1 (VCFQ1), os atributos do solo pH, C orgânico, Mg, umidade e C da serapilheira apresentaram maiores valores de CCP, indicando que esses estão diretamente relacionados com os atributos microbiológicos (Tabela 4.2).

4.2.2.3 Análise Canônica Discriminante (ACD)

Em relação à Análise Canônica Discriminante (ACD), o teste estatístico multivariado de *Wilks Lambda* para os atributos microbiológicos do solo e físico-químicos do solo e químicos da serapilheira demonstrou haver diferença significativa entre épocas de amostragens e áreas estudadas ($P < 0,0001$) quanto à primeira e à segunda funções canônicas discriminantes (FCD1 e FCD2). O modelo estatístico utilizado na ACD explicou praticamente

a totalidade da variabilidade dos dados nos quais a primeira função canônica discriminante (FCD1) explicou 92,04% no inverno e 88,28% no verão (Figuras 4.6 a e b). Ainda foi observada alta correlação canônica para o inverno (0,90) e verão (0,86) ($P < 0,0001$).

Figura 4.6 - Coeficientes Canônicos Padronizados (CCP) da Função Canônica Discriminante 1 e 2 (FCD1 e FCD2), discriminando Floresta de Araucária nativa (NF) e reflorestada (RF), considerando os atributos microbiológicos, físico-químicos do solo e químicos da serapilheira coletados no inverno (agosto de 2009) (a) e verão (fevereiro de 2010) (a). São Paulo, Brasil. O símbolo cheio representa o valor médio de CCP (centróide) para cada área (n=45)

A contribuição individual de cada atributo para a discriminação das áreas é expressa pelos coeficientes da taxa de discriminação paralela (TDP), que resulta do produto dos coeficientes canônicos padronizados (CCP) e de correlação canônica (r) (BARETTA et al., 2010). Sendo assim, o coeficiente da Taxa de Discriminação Paralela (TDP) é considerado o parâmetro mais adequado para avaliar o efeito de discriminação pelos atributos edáficos analisados dentro das áreas. Valores positivos de TDP indicam efeitos de separação entre as áreas, em relação ao atributo analisado, enquanto que os negativos indicam semelhanças (CRUZ-CASTILLO et al., 1994; BARETTA et al., 2010). Os valores de r refletem informações univariadas e mostram a contribuição individual de cada atributo analisado na separação das áreas estudadas (Tabela 4.3 e Figura 4.6). Em geral, o valor de TDP de cada atributo foi diferenciado para cada época de amostragem (Tabela 4.3). Neste caso, serão analisadas apenas as variáveis que apresentaram TDP acima de 0,1 consideradas como boas indicadoras de qualidade para discriminar as áreas (BARETTA et al., 2010).

Tabela 4.3 - Coeficientes de Correlação (r), Coeficientes Canônicos Padronizados (CCP) e Taxa de Discriminação Paralela (TDP) da Função Canônica Discriminante 1 e 2 (FCD1 e FCD2), discriminando a Floresta de Araucária nativa (NF) e reflorestada (RF), considerando os atributos microbiológicos, físico-químicos do solo e químicos da serapilheira nas áreas de coleta, no inverno (agosto de 2009) (a) e verão (fevereiro de 2010) (b). (n=45)

Variável ambiental	FCD1 – Inverno			FCD1 – Verão		
	r	CCP	TDP	r	CCP	TDP
pH CaCl_2	-0,076	-0,812	0,062	-0,050	-1,089	0,054
H+Al	-0,052	-0,856	0,044	-0,088	-1,367	0,121
K	0,214	0,385	0,082	0,174	0,477	0,083
Al	-0,030	0,440	-0,013	-0,136	0,598	-0,081
C-org ¹	-0,050	0,008	0,000	-0,030	0,092	-0,003
P disponível	0,214	0,760	0,162	0,285	0,483	0,138
Mg	0,017	0,085	0,001	0,062	-0,078	-0,005
MSS ¹	-0,006	0,196	-0,001	0,133	0,190	0,025
Umidade	-0,435	-0,698	0,304	-0,388	-0,612	0,237
C-Serapilheira	0,099	-0,763	-0,075	0,131	-0,624	-0,082
N-Serapilheira	0,329	0,228	0,075	0,405	-0,013	-0,005
S-Serapilheira	0,212	0,550	0,116	0,277	0,643	0,178
Densidade	0,073	-0,359	-0,026	0,091	-0,654	-0,060
P.total ¹	-0,229	-0,665	0,152	-0,287	-0,824	0,236
Macro ¹	0,140	0,203	0,028	0,175	0,384	0,067
CBM ¹	0,071	1,103	0,079	0,188	0,300	0,056
Resp ¹	-0,088	-1,264	0,111	-0,038	-0,420	0,016
$q\text{CO}_2$ ¹	-0,202	0,511	-0,103	-0,256	-0,132	0,034
Desi ¹	-0,160	-0,012	0,002	-0,112	0,097	-0,011

¹C-org= Carbono orgânico; MSS= Massa seca de serapilheira; P. total= Porosidade total Macro= Macroporosidade; CBM= Carbono da biomassa microbiana; Resp= Respiração basal do solo; $q\text{CO}_2$ = Quociente metabólico; Desi= Desidrogenase

Independente da época de coleta (inverno e verão), os atributos P disponível (0,162 e 0,138), umidade (0,304 e 0,237), S da serapilheira (0,116 e 0,178) e porosidade total (0,152 e 0,236) foram, no inverno e verão, os principais responsáveis pela discriminação entre as áreas, devido aos seus maiores valores de TDP (Tabela 4.3). A respiração basal microbiana também contribuiu no inverno (0,111) e a acidez potencial (H+Al) no verão (0,121) (Tabela 4.3).

A primeira função canônica discriminante (FCD1) separou nitidamente, com maiores valores de CCP, a floresta com araucária nativa NF do reflorestamento RF. A disposição polarizada entre as áreas confirma a alta dissimilaridade em relação aos atributos microbiológicos e físico-químicos entre as áreas (Figuras 4.6 a e b).

A umidade do solo foi o atributo mais relevante na discriminação das áreas (maior TDP), independente de época, uma vez que esse atributo é muito influenciado por condições edafoclimáticas (pluviosidade e temperatura) e pela cobertura vegetal, apresentando pouca variação em áreas menos impactadas (ZORNOSA et al., 2007). Além disso, mudança na cobertura vegetal proporciona alterações nos resíduos que compõem a serapilheira, como observado, no inverno em NF, onde maiores teores de nutrientes como N e P, estão relacionados à maior qualidade e quantidade do resíduo (MSS) depositado em NF (Tabela 4.1). O teor de P-disponível no solo também foi relevante na discriminação entre as áreas (Tabelas 4.1 e 4.3). O P, juntamente com o N, é considerado um dos elementos mais limitantes à atividade biológica, principalmente em solos tropicais, onde a sua disponibilidade é naturalmente baixa. Ecossistemas que propiciem condições para a fixação do P na fase sólida, resultante do comportamento físico-químico dos colóides do solo, pH, cátions associados ao fosfato (Ca, Al e Fe) e baixo teor de matéria orgânica, estão, na maioria das vezes, associadas a dificuldades na ciclagem deste nutriente, muitas vezes, vinculada a alterações ocasionadas pelo tipo de manejo ou mudança do uso do solo, como no caso do reflorestamento com araucária (Tabela 4.1).

A porosidade total do solo foi importante na discriminação das áreas e está relacionada com a capacidade de oxigenação e retenção de umidade do solo mantendo condições ideais para organismos e sistema radicular, garantindo os processos químicos e biológicos do solo (DEXTER, 1988). Desta maneira, este parâmetro foi importante para a discriminação das áreas. No entanto, essas variáveis, mesmo que no presente estudo não tenham sido correlacionadas, podem ser importantes para a microbiota do solo (SCHOENHOLTZ et al., 2000; IDOWU et al., 2008).

Analisando a contribuição das variáveis biológicas, pode-se perceber que elas pouco auxiliaram na discriminação das áreas nas duas épocas, com exceção da respiração microbiana basal do solo ($C-CO_2$) no inverno (Tabela 4.3). Sendo assim, mesmo a ACD mostrando que as duas áreas são distintas, sobretudo pelas variáveis físico-químicas já comentadas, pouco pode ser argumentado quando se consideram as variáveis microbiológicas, dada a pouca influência delas, especialmente CBM, Desi e qCO_2 , em discriminar as áreas nas duas épocas, demonstrando que a área reflorestada apresenta atividade microbiológica semelhante à encontrada na floresta com araucária nativa, muitas vezes, resultante da redundância metabólica dos microrganismos, além do teor de matéria orgânica nestes dois ecossistemas. Contudo, ressalta-se a importância da avaliação integrada das propriedades físico-químicas e microbiológicas do solo, para uma avaliação mais precisa da qualidade do solo, devido à estreita interação entre elas (SPARLING et al., 2004; BARETTA et al., 2008).

Além disso, as observações em conjunto das análises da ACC e ACD revelam que as variáveis físico-químicas de maior correlação na ACC com os atributos microbiológicos não foram as mesmas discriminantes das duas áreas estudadas na ACD. Ou seja, as florestas com araucária nativa (NF) e reflorestada (RF) apresentam conteúdos de carbono orgânico do solo, serapilheira, pH, K, Al, Mg, CBM, qCO_2 , desidrogenase, densidade e macroporosidade do solo muito próximos, não sendo estes os grandes responsáveis pela dissimilaridade das áreas na ACD (Tabela 4.3) e, conseqüentemente, não alterando significativamente os parâmetros microbiológicos de forma a apresentar grandes distinções entre as áreas, independente da época (inverno ou verão). Alterações em atributos físico-químicos altamente correlacionados com a atividade microbiana do solo podem ocasionar mudanças na funcionalidade dos ecossistemas devido ao envolvimento dos micro-organismos nos processos de mineralização e decomposição da matéria orgânica, estruturação e agregação do solo, remoção de toxinas, associações simbióticas com as raízes de plantas, bem como sua atuação nos ciclos do C, N, P e S entre outros (VAN ELSAS; TREVOR, 1997).

As poucas alterações na atividade microbiológica observadas entre as áreas NF e RF sugerem que não apenas o tempo já decorrido na área com araucária em reflorestamento, mas também a presença de outras espécies vegetais tenha contribuído para a recomposição da comunidade microbiológica do solo em RF, visto que o reflorestamento com araucária está inserido em área de Mata Atlântica mesmo que em condições físico-químicas discrepantes. Outro aspecto importante é a contribuição do conteúdo de carbono orgânico do solo e a serapilheira, que servem de estímulo à microbiota do solo, em razão de sua alta correlação,

além de outros fatores como o pH do solo. Esses parâmetros são considerados chave para a modulação da biota do solo, em detrimento às variáveis de menor correlação canônica, porque auxiliam na interpretação mais acurada do ponto de vista microbiológico sobre a saúde e processos de recuperação do solo.

Considerando que são inexistentes, no Brasil, trabalhos relacionando atributos físico-químicos e microbiológicos, no mesmo ponto de coleta e utilizando-se de repetições verdadeiras, essas informações tornam-se importantes para a formulação de novas hipóteses entre os atributos que envolvem a qualidade do solo, visto que o conceito desta qualidade sugere que os atributos físico-químicos e microbiológicos devem ser utilizados em conjunto porque estão relacionados, como demonstrado no presente estudo.

4.3 Conclusões

Dentre os indicadores microbiológicos estudados e analisados individualmente, apenas o qCO_2 foi sensível na separação entre as florestas com araucária nativa NF e reflorestada RF, independente de época de amostragem. Contudo, o CBM e a atividade da Desi também separaram as duas florestas, no verão e inverno, respectivamente.

Houve correlação significativa entre os atributos químicos e microbiológicos do solo, com destaque, no inverno, para desidrogenase e respiração basal do solo (C-CO₂), entre os microbiológicos, e para pH e acidez trocável (H+Al) entre os atributos químicos, enquanto que, no verão, o teor de carbono orgânico do solo (C-org), umidade do solo, teor de Mg, pH e teor de carbono da serapilheira estão mais associados à atividade da desidrogenase e respiração basal do solo (C-CO₂).

A ACD discriminou, por meio da Taxa de Discriminação Paralela (TDP), os atributos P disponível, porosidade total, teor de S na serapilheira e umidade do solo como os mais importantes para a separação entre as florestas NF e RF, sendo este último o mais relevante, independente da época de coleta.

Avaliando-se os resultados da ACC e ACD em conjunto, percebe-se que há pouca contribuição das variáveis microbiológicas na discriminação das áreas, nas duas épocas de coleta, indicando que ambas as áreas já possuem atividades microbiológicas semelhantes, embora distintas, em termos de atributos físico-químicos, o que demonstra a recuperação das áreas de reflorestamento com araucária, principalmente devido à formação de uma cobertura e crescente diversificação vegetal na área.

Referências

- ALEF, K.; NANNIPIERI, P. (Ed.). **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. London: Academic Press, 1995. 576 p.
- ALVES, M.C.; SUZUKI, L.G.A.S.; SUZUKI, L.E.A.S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um latossolo vermelho distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 617-625. 2007.
- ANDERSON, T.H.; DOMSCH, K.H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 21, p. 471-479. 1989.
- _____. The metabolic quotient for CO₂ ($q\text{CO}_2$) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 25, p. 393-395, 1993.
- BARETTA, D. **Fauna do solo e outros atributos edáficos como indicadores da qualidade ambiental em áreas com Araucaria angustifolia no Estado de São Paulo**. 2007. 158 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- BARETTA, D., BROWN, G.G., CARDOSO, E.J.B.N. Potencial da Macrofauna e outras variáveis edáficas como indicadores da qualidade do solo em áreas com *Araucaria angustifolia*. **Acta Zoológica Mexicana**, México, v.2, 135-150, 2010.
- BARETTA, D.; MALUCHE-BARETTA, C.R.D.M.; CARDOSO, E.J.B.N. Análise multivariada de atributos microbiológicos e químicos do solo em florestas com *Araucaria angustifolia*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2683-2691, 2008.
- BARETTA, D.; SANTOS, J.C.P.; FIGUEIREDO, S.R.; KLAUBERG-FILHO, O. Efeito do monocultivo de pinus e da queima do campo nativo em atributos biológicos do solo no planalto sul catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 715-724, 2005.
- BASTIDA, F.; ZSOLNAY, A.; HERNANDEZ, T.; GARCIA, C. Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective. **Geoderma**, Amsterdam, v. 147, n. 3/4, p. 159-171, 2008.
- BASTIDA, F.; MORENO, J.L.; HERNANDEZ, T.; GARCIA, C. Microbiological activity in a soil 15 years after its devegetation. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 38, p. 2503-2507.2006.
- BERTINI, S.C.B. **Indicadores microbiológicos de qualidade do solo em Florestas de Araucária no Estado de São Paulo**. 2010. 108 p. Tese (Doutorado em Microbiologia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”- Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2010.
- BINI, D. **Bioindicadores de qualidade do solo em diferentes ecossistemas**. 2009. 75 p. Dissertação (Mestrado em Microbiologia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2009.

CASIDA JR., L.E.; KLEIN, D.A.; SANTORO, T. Soil dehydrogenase activity. **Soil Science**, Philadelphia, v. 98, p. 371-376, 1964.

CORREIA, M.E.F.; ANDRADE, A.G. Formação de serapilheira e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 137-158.

CRUZ-CASTILLO, J.G.; GANESHANANDAM, S.; MACKEY, B.R.; LAWES, G.S.; LAWOKO, C.R.O.O.; WOOLLEY, D.J. Applications of canonical discriminant analysis in horticultural research. **HortScience**, Alexandria, v. 29, p. 1115-1119, 1994.

DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 199-238, 1998.

DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.B.; CLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. (Ed). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21. (SSSA. Special Publication, 35).

DORAN, J.W.; ZEISS, M.R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 15, p. 3-11, 2000.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solo, 1997. 212 p.

GIL-SOTRES, F.; TRASAR-CEPEDA, C.; LEIRÓS, M.C.; SEOANE, S. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 37, p. 877-887, 2005.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 32, p. 180-186, 1968.

IDOWU, O.J.; VAN ES, H.M.; ABAWI, G.S.; WOLFE, D.W.; BALL, J.I.; GUGINO, B.K.; MOEBIUS, B.N.; SCHINDELBECK, R.R.; BILGILI, A.V. Farmer-oriented assessment of soil quality using field, laboratory, and VNIR spectroscopy methods. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 307, p. 243-253, 2008.

ISLAM, K.R.; WEIL, R.R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 79, p. 9-16, 2000.

JOERGENSEN, R.G.; BROOKES, P.C.; JENKINSON, D.S. Survival of the soil microbial biomass at elevated temperatures. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 22, p. 1129-1136, 1990.

KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 42, p. 1-13, 2010.

LAMMEL, D.R.; BRANCALION, P.H.S.; DIAS, C.T.S.; CARDOSO, E.J.B.N. Rhizobia and other legume nodule bacteria richness in Brazilian *Araucaria angustifolia* forest. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 4, p. 400-408, 2007.

MALUCHE-BARETTA, C.R.D. **Diversidade microbiana em solos sob florestas de *Araucaria angustifolia***. 2007. 184 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007

MALUCHE-BARETTA, C.R.D.; KLAUBERG-FILHO, O.; AMARANTE, C.V.T.; RIBEIRO, G.M.; ALMEIDA, D. Atributos microbianos e químicos do solo em sistemas de produção convencional e orgânico de maçãs no estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 655-665. 2007.

MATSUOKA, M.; MENDES, I.C.; LOREIRO, M.F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 425-433.2003.

MERLIM, A.O. **Macrofauna edáfica em ecossistemas preservados e degradados no Parque Estadual de Campos de Jordão, SP**. 2005. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

MOREIRA, M.; BARETTA, D.; TSAI, S.M.; CARDOSO, E.J.B.N. Arbuscular mycorrhizal fungi in a native forest and in reforested *Araucaria* Forest: a case study. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, p. 677-684, 2009.

NOGUEIRA, M.A.; ALBINO, U.B.; BRANDÃO-JUNIOR, O.; BRAUN, G.; CRUZ, M.F.; DIAS, B.A.; DUARTE, R.T.D.; GIOPPO, N.M.R.; MENNA, P.; ORLANDI, J.M.; RAIMAN, M.P.; RAMPAZO, L.G.L.; SANTOS, M.A.; SILVA, M.E.Z.; VIEIRA, F.P.; TOREZAN, J.M.D.; HUNGRIA, M.; ANDRADE, G. Promising indicators for assessment of agroecosystems alteration among natural, reforested and agricultural land use in Southern Brazil. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 115, p. 237-247, 2006.

ODUM, E.P. The strategy of ecosystem development. **Science**, Washington, v. 164, p. 262-270, 1969.

POWLSON, D.S.; JENKINSON, D.S. A comparison of the organic matter, biomass, adenosine triphosphate and mineralizable nitrogen contents of ploughed and direct-drilled soils. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 97, p. 713-721, 1981.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285 p.

RIBEIRO, M.C.; METZGER, J.P.; MARTENSEN, A.C.; PONZONI, F.; HIROTA, M.; Brazilian Atlantic Forest: how much is left and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological and Conservation**, Oxford, v. 142, p. 1141-1153, 2009.

SANTOS, R.L.R.; IVANAUSKAS, N.M. Estrutura do componente arbóreo de trecho de floresta de araucária na Estação Ecológica de Itaberá, Itaberá-SP, Brasil. **Instituto Florestal, Série Registros**, São Paulo, n. 42, p. 127-131, 2010.

SANTOS, R.L.R.; IVANAUSKAS, N.M.; POLISEL, R.T.; ESTEVES, R. Comunidade arbórea de trecho de floresta secundária com araucária na Estação Ecológica de Bananal, Bananal-SP. **Instituto Florestal. Série Regional**, São Paulo, n. 40, p. 137-142, jul. 2009.

SAS INSTITUTE. **SAS user's guide: statistics**. Versão 8.2. 6th ed. Cary, 2002.

SCHOENHOLTZ, S.H.; VAN MIEGROET, H.; BURGER, J.A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 138, p. 335-356, 2000.

SILVA, L.G.; MENDES, I.C.; REIS-JUNIOR, F.B.; FERNANDES, M.F.; MELO, J.T.; KATO, E. Atributos físicos, químicos e biológicos de um Latossolo de cerrado em plantio de espécies florestais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 6, p. 613-620, 2009.

SOUZA, R.P.M. **Estrutura da comunidade arbórea de trechos de florestas de Araucária no estado de São Paulo, Brasil**. 2008. 101 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

SPARLING, G.P.; SCHIPPER, L.A.; BETTJEMAN, W.; HILL, R. Soil quality monitoring in New Zealand: practical lessons from a 6-year trial. **Agriculture Ecosystems Environmental**, Amsterdam, v. 104, p. 523-534, 2004.

TABATABAI, M.A. Soil enzymes. In: WEAVER, R.W.; SCOTT, A.; BOTTOMELEY, P.S.; BEZDICEK, D.; SMITH, S.; TABATABAI, A.; WOLLUM, A. (Ed). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. pt. 2: Microbiological and biochemical properties, p.778-833.

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

WARDLE, D.A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. **Biological Review**, Oxford, v. 67, p. 321-358. 1992.

VAN ELSAS, J.D.; TREVORS, J.T. **Modern soil microbiology**. New York: Marcel Dekker, 1997. 683 p.

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

VELOSO, H.P.; RANGEL, F.A.L.R.; LIMA, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991. 123 p.

ZORNOZA, R.; MATAIX-SOLERA, J.; GUERRERO, C.; ARCENEGUI, V.; MAYORAL, A.M.; MORALES, J.; MATAIX-BENEYTO, J. Soil properties under natural forest in the Alicante Province of Spain. **Geoderma**, Amsterdam, v. 142, p. 334–341, 2007.

ANEXOS

ANEXO A - Densidade (indivíduos por metro quadrado) dos grupos mais frequentes de organismos da macrofauna invertebrada do solo, nas florestas de Araucária nativa (NF) e reflorestada (RF) nas áreas estudadas, São Paulo, Brasil. Valores médios, n=45

Grupos mais frequentes	Inverno		Verão	
	NF	RF	NF	RF
Coleoptera	116 (± 87,8)	95 (± 97,0)	268 (± 157,8)	166 (± 168,4)
Orthoptera	1 (± 5,7)	0	1 (± 3,3)	1 (± 3,3)
Hymenoptera	399 (± 779,9)	223 (± 498,6)	1162 (± 1621,5)	540 (± 796,0)
Blattodea	4 (± 11,5)	1 (± 4,0)	22 (± 39,4)	12 (± 16,1)
Grilloblatodea	10 (± 15,7)	5 (± 9,0)	0	0
Isopoda	16 (± 26,5)	4 (± 9,6)	16 (± 31,3)	15 (± 25,7)
Opilionida	5 (± 18,6)	5 (± 10,6)	5 (± 13,9)	5 (± 14,4)
Diplopoda	33 (± 42,1)	27 (± 58,4)	82 (± 189,2)	80 (± 209,6)
Isoptera	579 (± 975,2)	479 (± 1069,3)	1097 (± 1899,2)	618 (± 2220,9)
Chilopoda	78 (± 81,2)	25 (± 26,9)	114 (± 117,7)	46 (± 52,8)
Oligochaeta	27 (± 48,3)	129 (± 155,4)	47 (± 94,0)	144 (± 131,7)
Enchytraeidae	14 (± 36,9)	61 (± 178,7)	25 (± 45,8)	362 (± 878,2)
Pseudoscorpionida	2 (± 8,1)	1 (± 4,0)	1 (± 4,6)	3 (± 15,1)
Mollusca	23 (± 30,6)	8 (± 17,9)	41 (± 50,4)	14 (± 27,3)
Outros ⁽¹⁾	66 (± 79,4)	70 (± 79,2)	139 (± 86,8)	108 (± 106,5)

⁽¹⁾ Outros = Somatório dos grupos de organismos menos frequentes

ANEXO B - Teste de significância dos índices ecológicos, taxa de colonização micorrízica e densidade de esporos entre os tratamentos, épocas e épocas x tratamentos

Variáveis	Inverno	Verão	Época	Epoca x Tratamento
	Trat ²	Trat		
	P valor	P valor	P valor	P valor
R ¹	0,041	0,330	0,631	0,027
H	0,033	0,821	0,236	0,081
Is	0,137	0,732	0,299	0,375
E	0,085	0,506	0,166	0,429
Col.	0,093	0,755	0,016	0,283
N.E	0,050	0,336	0,129	0,033

¹R=riqueza, H=índice de diversidade de Shannon, Is=de Simpson, e=de equitabilidade de Pielou, Col.= Colonização radicular e N.E= número de esporos. ² Trat= Tratamento

ANEXO C - Caracterização física dos horizontes do solo coletado em cada área de estudo e suas respectivas classificações

Horizontes	Profundidade	A. Grossa	A. Fina	A. Total	Silte	Argila
	(cm)	g/kg				
Estação Ecológica de Bananal-SP						
Floresta com araucária nativa - NF- Cambissolo Haplico Tb Distrófico úmbrico						
A	0 – 20	258	241	499	167	334
AB	20 – 30	247	295	542	115	343
Bi1	30 – 60	201	288	489	142	369
Bi2	60 – 100	78	166	244	335	421
Cr	100 – 180	20	150	170	447	383
Área reflorestada com araucária - RF- Cambissolo Haplico Tb Distrófico úmbrico						
A1	0 – 8	245	285	530	187	283
A2	8 – 20	235	348	583	150	267
AB	20 – 45	140	335	475	181	344
Bi	45 – 60	120	321	441	215	344
C	60 – 90	133	465	598	187	215
Estação Ecológica de Itaberá-SP						
Floresta com araucária nativa-NF - Latossolo Vermelho Distróférico típico						
A	0 – 10	104	239	343	73	584
BA	10 – 40	62	213	275	36	689
Bw1	40 – 80	56	212	268	17	715
Bw2	80 – 125	62	200	250	13	737
Estação Experimental de Itapeva-SP						
Área reflorestada com araucária- RF- Nitossolo Vermelho Eutroférico latossólico						
A	0 – 15	62	250	312	153	535
BA	15 – 40	45	203	248	125	627
Bt1	40 – 60	35	184	219	64	717
Bt2	60 – 100	38	181	219	83	698
Município de Barra do Chapéu-SP						
Floresta com araucária nativa-NF - Cambissolo Háplico Tb Distrófico úmbrico						
A	0 - 17	224	295	519	126	355
AB	17 - 30	206	270	476	144	380
Bi	30 - 60	176	211	387	121	492
C1	60 - 85	150	182	332	118	550
C2	85 - 120	151	204	355	161	484
Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR)-Iporanga-SP						
Área reflorestada com araucária - RF - Cambissolo Háplico Tb umbrico						
A	0 - 20	23	71	94	506	400
Bi	20 - 60	10	54	64	505	431
C1	60 - 120	10	46	56	437	507
Cr	120 - 145	11	43	54	437	509

A. Fina= areia fina; A. grossa= areia grossa; A. total= areia total

ANEXO D - Caracterização química dos horizontes do solo coletados em cada área de estudo e suas respectivas classificações

Horizontes	Profundidade	pH	pH	pH	C	P	SO ₂	Ca	Mg	K	Al	H + Al	SB	T	V	m
	(cm)	H ₂ O	KCl	CaCl ₂	g/kg	mg/kg	m molc/kg							%		
Estação Ecológica de Bananal-SP																
Floresta com araucária nativa - NF - Cambissolo Háplico Tb Distrófico úmbrico																
A	0 - 20	3,7	3,3	3,4	88	42	49	20	8	2,6	57	136	30,6	166,1	18	65
AB	20 - 30	4	3,7	3,7	29,4	14	26	3	3	0,6	45	71	6,6	77,6	9	87
Bi1	30 - 60	4,4	4,1	4	15,4	15	32	7	3	0,1	24	61	10,1	70,1	14	70
Bi2	60 - 100	4,5	4,1	4,1	7,9	6	34	5	2	0,2	29	42	7,2	48,8	15	80
Cr	100 - 180	4,5	3,9	4	5,6	14	25	8	2	0,3	35	37	10,3	46,9	22	77
Área reflorestada com araucária - RF - Cambissolo Háplico Tb Distrófico úmbrico																
A1	0 - 8	3,6	3,2	3,3	83,8	34	58	6	5	2,9	86	139	13,9	153,2	9	86
A2	8 - 20	4,2	3,8	3,9	33,1	13	24	9	4	0,5	34	62	13,5	75	18	72
AB	20 - 45	4,4	4,2	4,3	19	8	31	1	1	0,2	21	42	2,2	44,2	5	90
Bi	45 - 60	4,4	4,1	4,1	15,4	5	67	1	1	0,1	16	35	2,1	36,6	6	88
C	60 - 90	4,5	4,2	4,4	7,5	7	29	1	1	0,1	16	24	2,1	26,4	8	88
Estação Ecológica de Itaberá-SP																
Floresta com araucária nativa - NF - Latossolo Vermelho Distroférrico típico																
A	0 - 10	4,1	3,6	3,7	32,9	16	22	12	5	1,2	31	70	18,2	88,5	21	63
BA	10 - 40	4,3	3,8	3,9	17	5	8	1	1	0,2	15	42	2,2	43,7	5	87
Bw1	40 - 80	4,5	4	4,1	10,2	5	4	1	1	0,1	10	32	2,1	33,8	6	83
Bw2	80 - 125	4,5	4,1	4,2	11,1	3	6	4	2	0,1	7	26	6,1	31,9	19	53
Estação Experimental de Itapeva-SP																
Área reflorestada com araucária - RF - Nitossolo Vermelho Eutroférrico latossólico																
A	0 - 15	6,69	6,19	6,39	34	21	17	70	50	3,8	2	10	123,8	134,1	92	1
BA	15 - 40	6,25	5,58	5,78	13,9	6	6	55	16	1	1	13	72	85,1	85	1
Bt1	40 - 60	6,13	5,49	5,69	10,3	5	4	36	10	0,3	1	11	46,3	57,3	81	1
Bt2	60 - 100	5,94	5,51	5,61	7,08	4	3	27	7	0,4	0	9	34,4	43,2	80	0
Município de Barra do Chapéu-SP																
Floresta com araucária nativa - NF - Cambissolo Háplico Tb Distrófico úmbrico																
A	0 - 17	4,29	3,7	3,73	18,3	12	11	9	7	0,7	17	42	16,7	58,8	28	50
AB	17 - 30	4,02	3,64	3,71	10,7	5	9	7	4	0,4	21	32	11,4	43,7	26	65
Bi	30 - 60	4,28	3,78	3,84	8,1	3	7	6	3	0,2	20	33	9,2	42	22	69
C1	60 - 85	4,61	3,95	4,07	8	2	6	7	6	0,2	11	24	13,2	37,2	35	46
C2	85 - 120	4,8	4	4,1	5,8	3	6	6	5	0,2	10	21	11,2	32,1	35	47
Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR) - Iporanga-SP																
Área reflorestada com araucária - RF – Cambissolo Háplico Tb umbrico																
A	0 - 20	4,5	3,5	3,9	29,8	15	21	26	10	0,7	20	53	36,7	90	41	36
Bi	20 - 60	4	3,3	3,6	7,3	3	11	5	2	0,2	32	34	7,2	40,9	18	82
C1	60 - 120	4,1	3,6	3,8	7	2	34	1	1	0,1	29	33	2,1	35,3	6	93
Cr	120 - 145	4,5	4	4	4,8	4	89	1	1	0,1	16	27	2,1	29,3	7	88