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

Mesofauna edáfica em plantios puros e mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium*

Maurício Rumenos Guidetti Zagatto

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2018**

Maurício Rumenos Guidetti Zagatto
Biólogo

Mesofauna edáfica em plantios puros e mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium*

Orientadora:

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

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Zagatto, Maurício Rumenos Guidetti

Mesofauna edáfica em plantios puros e mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* / Maurício Rumenos Guidetti Zagatto. - - Piracicaba, 2018.

86 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Invertebrados 2. Serapilheira 3. Solo 4. Mutualismo 5. Atividade microbiana I. Título

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder o direito à vida;

Aos meus familiares (Sandra, Luiz Carlos e Livia Zagatto) que sempre se fizeram presentes e me incentivaram;

À minha esposa, Simoni Maria de Lima, sempre dedicada e capaz de tornar os meus dias muito mais agradáveis.

À minha filha (o), que está por vir, já muito amada, principal motivo da luta diária para ser um homem cada vez mais responsável e bem sucedido.

À minha orientadora, professora Elke Jurandy Bran Nogueira Cardoso, que sempre se fez presente e me transmitiu inúmeros conhecimentos, não apenas na vida profissional, mas também me auxiliando a crescer como pessoa.

À ESALQ/USP e a todos os professores com que tive contato nessa bela instituição e que me transmitiram valiosos conhecimentos sobre os diversos aspectos do solo, em especial a vida no solo, que me desperta profundo interesse.

Aos estagiários, especialmente à Caroline Medrado e ao Renan Viccino Lopes, que muito me auxiliaram na árdua e gratificante tarefa de contar e identificar os invertebrados que habitam o solo;

Aos meus amigos, especialmente aqueles feitos na pós-graduação (Arthur Pereira, Adijailton Souza, Rafael Fabri, Pedro Andrade e Luis Fernando Baldesim), sempre presentes nos momentos de alegrias e de crise. Amizades verdadeiras que carregarei por toda a minha vida.

Aos técnicos do laboratório de Microbiologia do Solo, Luis Fernando Baldesim e Denise Mescolotti, sempre dispostos a ajudar nos experimentos que eu conduzi.

A CAPES e ao CNPQ, órgãos que me concederam bolsa de estudos e fomentaram a minha pesquisa.

A todos aqueles que de alguma forma torceram pela minha vitória.

Maurício Rumonos Guidetti Zagatto

“Fora da adversidade não há crescimento real”.

Maurício R. G. Zagatto

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUÇÃO.....	9
Referências	12
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1 Cultivo de <i>Eucalyptus sp</i>	15
2.2 <i>Acacia mangium</i> – aspectos relevantes	16
2.3 Consórcio entre <i>Eucalyptus grandis</i> e leguminosas	16
2.4 Mesofauna Edáfica	17
2.5 Indicadores de Qualidade do Solo.....	19
Referências	20
3 ABUNDÂNCIA E DIVERSIDADE DA MESOFAUNA EPIEDÁFICA CONDICIONADA PELA SERAPILHEIRA DE <i>Acacia mangium</i>	27
Resumo	27
Abstract	27
3.1 Introdução	28
3.2 Materiais e Métodos	29
3.2.1 Caracterização das áreas de estudo.....	29
3.2.2 Amostragem de serapilheira para avaliação da mesofauna epiedáfica	31
3.2.3 Amostragem da serapilheira para avaliação de atributos químicos e determinação da umidade	32
3.2.4 Cálculo de diversidade e densidade da mesofauna epiedáfica.....	32
3.2.5 Análise estatística	33
3.3 Resultados e Discussão	34
3.3.1 Aspectos químicos da serapilheira.....	34
3.3.2 Mesofauna epiedáfica e sua relação com a sazonalidade	36
3.3.3 Mesofauna epiedáfica e sua relação com os sistemas florestais	39
3.3.4 Relações entre atributos químicos da serapilheira, sistemas florestais e mesofauna epiedáfica	41
3.4 Conclusão	47
Referências	48
4 MESOFAUNA E QUALIDADE DO SOLO EM PLANTIOS PUROS E MISTOS DE <i>Eucalyptus grandis</i> e <i>Acacia mangium</i>	55
Resumo	55

Abstract.....	55
4.1 Introdução	56
4.2 Material e Métodos	58
4.2.1 Caracterização das áreas de estudo e delineamento experimental	58
4.2.2 Amostragem de solo para análises da mesofauna edáfica	58
4.2.3 Cálculo de diversidade, riqueza e densidade da mesofauna edáfica	60
4.2.4 Amostragem de solo para análises físico-químicas do solo	60
4.2.5 Amostragem de solo para análises microbiológicas do solo	61
4.2.6 Análises estatísticas	61
4.2.7 Criação do indicador geral de qualidade do solo	62
4.3 Resultados e Discussão.....	63
4.3.1 Análises químicas do solo	63
4.3.2 Análises microbiológicas e teor de umidade do solo	64
4.3.3 Relações entre mesofauna do solo, atributos microbiológicos, atributos químicos, sistemas florestais e sazonalidade	66
4.3.4 Indicador Geral de Qualidade do Solo.....	72
4.4 Conclusão	77
Referências.....	78
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
APÊNDICES	85

RESUMO

Mesofauna edáfica em plantios puros e mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium*

A mesofauna edáfica compreende pequenos invertebrados que vivem nos primeiros centímetros do solo e na serapilheira. Sabe-se que o plantio de leguminosas com espécies arbóreas não fixadoras de nitrogênio melhora a fertilidade do solo, porém não se conhece o efeito desses plantios nos invertebrados edáficos. Diante disso, objetivou-se, com este estudo, avaliar o efeito de plantios puros e mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* na mesofauna edáfica e estabelecer relações da mesofauna com os atributos químicos do solo e da serapilheira e os microbiológicos do solo, a fim de se construir um novo indicador de qualidade do solo. Para tanto, em outubro de 2015 (estação seca) e março de 2016 (estação chuvosa) foram avaliados os atributos físico-químicos da serapilheira (Ca, Mg, N, P, C, C/N, C/P, Mn, Cu, Fe, Zn, umidade), microbiológicos do solo (C mic, respiração do solo e atividade da desidrogenase), a umidade do solo e a mesofauna do solo e da serapilheira (riqueza, densidade e diversidade de mesofauna). Já os atributos químicos do solo (pH, Ca, Mg, C, N, P, Al, H+Al, Na, K) foram avaliados apenas em outubro. A média dos atributos foi comparada pelo teste de Tukey a 5%, enquanto que correlações, regressões e análises multivariadas foram feitas para estabelecer relações entre a mesofauna e os atributos do solo e da serapilheira e, posteriormente, construir um indicador geral de qualidade do solo. A fauna que habita a serapilheira, os atributos microbiológicos do solo e o indicador geral de qualidade do solo apresentaram maiores valores na estação chuvosa. A umidade foi muito correlacionada com os atributos biológicos do solo e da serapilheira. Foram também constatadas diferenças entre tratamentos, sendo que na estação seca há preferência da mesofauna pelo hábitat solo, possivelmente com a prevalência de relações mutualísticas entre microrganismos e mesofauna, enquanto há uma expressiva preferência da mesofauna pela serapilheira durante a estação úmida.

Palavras-chave: Invertebrados; Serapilheira; Solo; Mutualismo; Atividade microbiana

ABSTRACT

Soil mesofauna in pure and intercropped plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium*

Soil mesofauna comprises small invertebrates that live in the first centimeters of the soil and in the litter. The consortium between leguminous trees and non-nitrogen-fixing tree species improves soil fertility, but the effect of these plantations on edaphic invertebrates is not known yet. Thus, we aimed at evaluating the effect of pure and mixed plantation of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* on the invertebrates that inhabit the soil and litter. We looked for correlations between those plantations, soil and litter chemical attributes and soil microbiological attributes to create a general indicator of soil quality in *Acacia mangium* (AC), *Eucalyptus grandis* (EU) and mixed plantations of Acacia and Eucalyptus (M). The chemical litter attributes evaluated were Ca, Mg, N, P, C, C/N, C/P, Mn, Cu, Fe, Zn, besides soil and litter moisture, soil microbiology (microbial carbon, soil respiration and dehydrogenase activity) and soil and litter mesofauna (richness, density and diversity) in two seasons: October 2015 (dry season) and March 2016 (rainy season). Soil chemical analyses (pH, Ca, Mg, C, N, P, Al, H+Al, Na, and K) were from samples collected in October. We made comparisons of the means between forest systems, and established a general indicator of soil quality based on regressions and multivariate analyses, to identify correlations between mesofauna and chemical and microbiological attributes. Litter mesofauna, microbial activity and the general indicator of soil quality presented much higher values in the rainy season than in the dry season. Moisture correlated positively with most of the soil and litter biological attributes. There were few differences between the forest systems; although we observed a clear mesofauna preference for soil as habitat in the dry season, possibly linked to the prevalence of mutualistic interactions between soil mesofauna and microorganisms, while the mesofauna showed great preference for the litter as habitat during the moist season.

Keywords: Invertebrates; Litter; Soil; Mutualism; Microbial activity

1 INTRODUÇÃO

Um solo de boa qualidade é capaz de sustentar plantas e produtividade animal e manter ou aumentar a qualidade da água e do ar em locais manejados ou não, o que beneficia a saúde humana (Karlen et al., 1997). A degradação do solo em locais onde a agricultura é intensiva e predatória diminui a qualidade do solo, uma vez que existem perdas de matéria orgânica, entradas excessivas de nutrientes minerais, revolvimento intensivo do solo e monoculturas (Wander e Drinkwater, 2000).

É de grande dificuldade medir a qualidade do solo, uma vez que envolve diversos processos edáficos, tais como: compactação e infiltração de água, ciclagem de nutrientes e abundância e diversidade de organismos no solo (Cardoso et al., 2013). Para tanto são utilizados indicadores de qualidade do solo; porém, para que um indicador seja bom, ele deve apresentar alta sensibilidade, aplicabilidade e ter acesso facilitado a todos, principalmente aos pesquisadores, produtores e entidades governamentais, além de estar intimamente relacionado a propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, fatores esses que refletem no funcionamento do solo como um sistema (Doran e Zeiss, 2000; Paoletti et al., 1995).

Plantios florestais de *Eucalyptus* são preponderantes em projetos de reflorestamento no Brasil, uma vez que essas espécies se desenvolvem bem em qualquer tipo de solo, inclusive naqueles que são ácidos e pobres em nutrientes (Araújo et al., 2004). Adubar *Eucalyptus* para aumentar a produção é muito oneroso e, frequentemente, não há resposta da planta; assim, as árvores acabam dependendo muito da ciclagem de nutrientes mineralizados a partir da matéria orgânica, que é promovida pela ação conjunta de microrganismos e da fauna edáfica (Gonçalves et al., 2015).

Cultivar plantios florestais em consórcio com outras plantas, principalmente leguminosas, ajuda a manter a sustentabilidade do ecossistema e, com um manejo adequado, pode até aumentar a produção de madeira (Bedano et al., 2016). Mais recentemente têm-se estudado plantações de *Eucalyptus* spp. em consórcio com *Acacia* spp. na Austrália e no Brasil (Bouillet et al., 2008; Laclau et al., 2008; Nouvellon et al., 2012). Esses autores encontraram resultados positivos para este

consórcio no crescimento e biomassa das árvores, desenvolvimento de raízes, fixação biológica de N, deposição de liteira, entre outros benefícios para ambas as culturas.

Grupos de pesquisa vinculados à ESALQ estudaram a biologia desses sistemas e demonstraram grandes vantagens no consórcio *Eucalyptus grandis* com *Acacia mangium*, uma vez que há um aumento na produtividade, não existindo a necessidade de adubação nitrogenada, já que a leguminosa, em associação com a microbiota do solo, tem prestado esse serviço ambiental (Bini et al., 2013; De Araujo Pereira et al., 2017).

O acúmulo de N no consórcio entre *Eucalyptus* e *Acacia* e nos plantios puros de *Acacia mangium* favorece a diversidade e a abundância de microrganismos no solo associados à fixação biológica de nitrogênio, sobretudo aquelas pertencentes ao filo das Proteobactérias (De Araujo Pereira et al., 2017) porém, o efeito desses sistemas na comunidade da mesofauna edáfica ainda é desconhecido. Tais invertebrados são considerados agentes reguladores dos processos de decomposição, uma vez que eles fragmentam ativamente o resíduo vegetal e a matéria orgânica do solo, o que aumenta a ciclagem de nutrientes e consequentemente pode favorecer o crescimento das plantas (Anderson, 2009; Lavelle, 1997; Seastedt, 1984).

A mesofauna edáfica compreende pequenos invertebrados, tais como ácaros, colêmbolos, miriápodes, aranhas, pseudoescorpiões e diversas ordens de insetos, além de oligoquetos e crustáceos, que se caracterizam por apresentar diâmetro corporal entre 0,2 e 2 mm (Lavelle, 1997). Também conhecidos pelo termo “transformadores da liteira”, vivem no espaço poroso do solo e da serapilheira e ativamente fragmentam o resíduo vegetal, o que facilita os processos de decomposição e mineralização da matéria orgânica. Porém, é muito incipiente o estudo desses invertebrados, principalmente na serapilheira (Carrillo et al., 2011).

A densidade e a diversidade desses pequenos organismos podem ser consideradas indicadores de qualidade do solo, uma vez que se encontram intimamente relacionados com diversos processos químicos, físicos e biológicos no solo, tais como: mineralização e ciclagem de nutrientes; porosidade e agregação do

solo; transporte de organismos menores, criação de habitats para que outros organismos possam se estabelecer no solo e diversas relações de mutualismo e predação com outros organismos edáficos. Também são sensíveis a mudanças climáticas, sistemas de manejo, vegetação e tipos de solo (Anderson, 2009; Baretta et al., 2006; Gergócs e Hufnagel, 2009). Assim, a diversidade e a densidade de organismos edáficos são parâmetros que podem refletir a funcionalidade do sistema solo em seus principais aspectos (Karlen et al., 1997).

Por outro lado, para a avaliação da qualidade do solo é importante considerar também as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. Dessa forma, a utilização de indicadores multifuncionais é de extrema importância, pois é possível transformar uma série de variáveis em uma escala numérica que varia entre 0 e 1 e, a partir disso, inferir acerca da qualidade do solo. Nesse tipo de indicador, quanto mais próximo o resultado de 1, maior a qualidade do ecossistema (Velasquez et al., 2007).

Devido a maior diversidade de resíduos vegetais depositados na superfície do solo em plantios mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium*, é de se esperar que o consórcio dessas culturas favoreça maior diversidade de fauna, pois é possível que nessa condição exista maior quantidade de nichos para o desenvolvimento de uma comunidade de invertebrados mais complexa do que em plantios florestais simplificados.

Diante disso, objetiva-se com o presente estudo avaliar a densidade e a diversidade da mesofauna no solo e na serapilheira de plantios florestais puros e mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* a fim de estabelecer possíveis relações da fauna edáfica com atributos químicos e microbiológicos do solo e com as propriedades químicas da serapilheira, bem como com os referidos ecossistemas estudados. Pretende-se também selecionar grupos de organismos indicadores de qualidade ambiental e construir indicadores de qualidade do solo baseados em atributos físicos, químicos, microbiológicos e de mesofauna edáfica.

Referências

- Anderson, J.M., 2009. Why should we care about soil fauna? *Pesqui. Agropecuária Bras.* 44, 835–842. doi:10.1590/S0100-204X2009000800006
- Araújo, C.V.M., Alves, L. de J., Santos, O.M., Alves, J.M., 2004. Micorriza arbuscular em plantações de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell no litoral norte da Bahia, Brasil. *Acta Bot. Brasilica* 18, 513–520. doi:10.1590/S0102-33062004000300011
- Baretta, D., Mafra, Á.L., Santos, J.C.P., Do Amarante, C.V.T., Bertol, I., 2006. Análise multivariada da fauna edáfica em diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 41, 1675–1679. doi:10.1590/S0100-204X2006001100014
- Bedano, J.C., Dominguez, A., Arolfo, R., Wall, L.G., 2016. Effect of Good Agricultural Practices under no-till on litter and soil invertebrates in areas with different soil types. *Soil Tillage Res.* 158, 100–109. doi:10.1016/j.still.2015.12.005
- Bini, D., Santos, C.A. dos, Bouillet, J.P., Gonçalves, J.L. de M., Cardoso, E.J.B.N., 2013. *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in monoculture and intercropped plantations: Evolution of soil and litter microbial and chemical attributes during early stages of plant development. *Appl. Soil Ecol.* 63, 57–66. doi:10.1016/j.apsoil.2012.09.012
- Bouillet, J.P., Laclau, J.P., Gonçalves, J.L.M., Moreira, M.Z., Trivelin, P.C.O., Jourdan, C., Silva, E. V., Piccolo, M.C., Tsai, S.M., Galiana, A., 2008. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil. 2: Nitrogen accumulation in the stands and biological N₂ fixation. *For. Ecol. Manage.* 255, 3918–3930. doi:10.1016/j.foreco.2007.10.050
- Cardoso, E.J.B.N., Vasconcellos, R.L.F., Bini, D., Miyauchi, M.Y.H., Santos, C.A. dos, Alves, P.R.L., Paula, A.M. De, Nakatani, A.S., Pereira, J. de M., Nogueira, M.A., 2013. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? *Sci. Agric.* 70, 274–289. doi:10.1590/S0103-90162013000400009

- Carrillo, Y., Ball, B.A., Bradford, M.A., Jordan, C.F., Molina, M., 2011. Soil fauna alter the effects of litter composition on nitrogen cycling in a mineral soil. *Soil Biol. Biochem.* 43, 1440–1449. doi:10.1016/j.soilbio.2011.03.011
- De Araujo Pereira, A.P., De Andrade, P.A.M., Bini, D., Durrer, A., Robin, A., Bouillet, J.P., Andreote, F.D., Cardoso, E.J.B.N., 2017. Shifts in the bacterial community composition along deep soil profiles in monospecific and mixed stands of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium*. *PLoS One* 12, 1–15. doi:10.1371/journal.pone.0180371
- Doran, J.W., Zeiss, M.R., 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Appl. Soil Ecol.* 15, 3–11. doi:10.1016/S0929-Get
- Gergócs, V., Hufnagel, L., 2009. Application of oribatid mites as indicators. *Appl. Ecol. Environ. Res.* 7, 79–98.
- Gonçalves, M., Filho, O.K., Luise, M., Bartz, C., 2015. Divisão 2 - Processos e propriedades do solo Macrofauna Edáfica e Atributos Físicos e Químicos em Sistemas de Uso do Solo no Planalto Catarinense 1544–1553. doi:10.1590/01000683rbcs20150033
- Karlen, D.L., Mausbach, M.J., Doran, J.W., Cline, R.G., Harris, R.F., Schuman, G.E., 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 4. doi:10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x
- Laclau, J.P., Bouillet, J.P., Gonçalves, J.L.M., Silva, E. V., Jourdan, C., Cunha, M.C.S., Moreira, M.R., Saint-André, L., Maquère, V., Nouvellon, Y., Ranger, J., 2008. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil. 1. Growth dynamics and aboveground net primary production. *For. Ecol. Manage.* 255, 3905–3917. doi:10.1016/j.foreco.2007.10.049
- Lavelle, P., 1997. Faunal activities and soil processes: adaptative strategies that determine ecosystem function., *Advances in Ecological Research.*

Nouvellon, Y., Laclau, J.P., Epron, D., Le Maire, G., Bonnefond, J.M., Gonalves, J.L.M., Bouillet, J.P., 2012. Production and carbon allocation in monocultures and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil. *Tree Physiol.* 32, 680–695. doi:10.1093/treephys/tps041

Paoletti, M.G., Schweigl, U., Favretto, M.R., 1995. Soil macroinvertebrates, heavy metals and organochlorines in low and high input apple orchards and coppiced woodland. *Pedobiologia* (Jena).

Seastedt, T.R., 1984. The Role of Microarthropods in Decomposition and Mineralization Processes. *Annu. Rev. Entomol.* 29, 25–46. doi:10.1146/annurev.ento.29.1.25

Velasquez, E., Lavelle, P., Andrade, M., 2007. GISQ , a multifunctional indicator of soil quality 39, 3066–3080. doi:10.1016/j.soilbio.2007.06.013

Wander, M.M., Drinkwater, L.E., 2000. Fostering soil stewardship through soil quality assessment. *Appl. Soil Ecol.* 15, 61–73. doi:10.1016/S0929-1393(00)00072-X

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cultivo de *Eucalyptus* sp

Com o aumento na demanda por madeira, os plantios florestais vêm crescendo em média numa taxa de 2 – 2,5 milhões de hectares ao ano (FAO, 2006). *Eucalyptus* é o gênero florestal mais cultivado em regiões tropicais, ocupando cerca de 20 milhões de hectares no mundo, sendo que os países que mais cultivam *Eucalyptus* são a Índia e o Brasil (Iglesias-Trabado e Wilstermann, 2008), este último com cerca de 4,5 milhões de hectares plantados (ABRAF, 2013). A maioria das espécies dessa essência florestal é originária da Austrália e da Indonésia (Grattapaglia e Kirst, 2008).

O cultivo de *Eucalyptus* é favorecido por climas tropicais, e a sua madeira é muito utilizada para produção de celulose, além de ser fonte de carvão vegetal para geração de energia e de madeira para utilização em móveis, pisos e na construção civil. No entanto, o cultivo intensivo leva à depleção de N e de outros nutrientes no ecossistema, uma vez que não é uma cultura com potencial para fixação de N. Isso, em longo prazo, pode acarretar numa diminuição de produção da cultura e deficiência nos teores de nutrientes minerais no solo (Gonçalves et al., 1997; Laclau et al., 2005).

Além disso, muitas vezes a cultura pode não responder à adição de fertilizante nitrogenado e pouco é conhecido sobre os riscos da volatilização de amônia, de emissões de óxido nitroso e da lixiviação de nitratos no solo (Fisher e Binkley, 2000; Gonçalves et al., 1997).

O N e o P são os nutrientes que merecem atenção especial, pois são os que mais limitam a produção florestal em climas tropicais (Laclau et al., 2010). O N é encontrado principalmente na matéria orgânica do solo e é muito relacionado a processos de oxi-redução, podendo ocorrer como N_2 , NO, N_2O , NH_3/NH_4 , NO_2^- e NO_3^- (Jackson et al., 2008). Quando absorve N na forma de NH_4^+ a planta libera íons H^+ (acidifica o meio) ao passo que ao absorver N como NO_3^- , a planta libera íons OH^- (alcaliniza o meio). Por sua vez, o P, em solos altamente intemperizados, acaba sofrendo adsorção específica em óxidos e hidróxidos, tornando-se indisponível às plantas (Lair et al., 2009; Yerokun, 2008). Dessa forma, para manter a produtividade

de culturas florestais, sobretudo em regiões de clima tropical, onde há maior formação de oxi-hidróxidos, a utilização de adubos fosfatados se faz necessária (Goncalves et al., 2008).

Diante disso, é importante a busca de alternativas racionais para a produção de *Eucalyptus*, uma vez que essa é uma cultura que, se mal manejada, pode causar rápida degradação do solo.

2.2 *Acacia mangium* – aspectos relevantes

Acacia mangium é uma espécie florestal leguminosa, originária da Austrália e da Nova Guiné. Devido ao seu rápido crescimento e produção de madeira de qualidade, essa espécie é bastante utilizada na recuperação de áreas degradadas indústria de celulose, fabricação de móveis, construção civil e de quebra-ventos (Macedo et al., 2008; Wang et al., 2010).

Essa espécie possui grande adaptabilidade a climas tropicais, como na maior parte do Brasil, uma vez que é pouco exigente em nutrientes minerais, apresenta crescimento rápido, além de ser tolerante a condições de acidez (Balieiro et al., 2004). Outra característica importante de *Acacia mangium* é a sua capacidade de formar simbiose com rizóbios, e compor associações mutualísticas com fungos micorrízicos. Essas interações permitem adição de produtos nitrogenados no solo e maior capacidade de absorção de nutrientes e água pela raiz da planta, o que melhora a nutrição vegetal (Mendes et al., 2010).

Diante dessas características, *Acacia mangium* apresenta potencial para ser cultivada em consórcio com outras espécies arbóreas de alto valor econômico agregado, como *Eucalyptus grandis*, promovendo em muitos casos aumento na produtividade e melhora na qualidade do solo.

2.3 Consórcio entre *Eucalyptus grandis* e leguminosas

Tendo em vista as grandes necessidades de N e P para o desenvolvimento de culturas florestais como *Eucalyptus grandis* e o alto custo de fertilizantes

nitrogenados e fosfatados, os plantios mistos com leguminosas (fixadoras de nitrogênio) podem ser uma boa alternativa para aumentar a disponibilidade de nutrientes no solo, passíveis de serem absorvidos pela cultura comercial de elevado valor econômico agregado (Forrester et al., 2006).

A associação de *Eucalyptus* com leguminosas como *Acacia mangium* pode aumentar principalmente a disponibilidade de nitrogênio e fósforo no solo, uma vez que ocorrem processos de fixação biológica do N_2 e aumento na quantidade de liteira produzida, o que aumenta a ciclagem de nutrientes pela decomposição das folhas, e consequentemente aumenta a mineralização do nitrogênio para a solução do solo. Além disso, nesses plantios há acentuada produção de enzimas capazes de mobilizar o P associado à matéria orgânica do solo (Bouillet et al., 2008; Hinsinger et al., 2011; Laclau et al., 2008; Voigtlaender et al., 2012). Por outro lado, a associação de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* pode ter efeitos negativos no desenvolvimento das culturas consorciadas, uma vez que pode ocorrer competição por luz, água e nutrientes (da Silva et al., 2009; Hunt et al., 2006).

Portanto, o monitoramento de propriedades físicas, químicas e biológicas do solo se faz necessário nesses sistemas, pois, além de incrementar o crescimento de culturas com alto valor comercial, o consórcio com leguminosas pode representar uma maneira mais racional de exploração do solo.

2.4 Mesofauna Edáfica

A mesofauna edáfica compreende pequenos invertebrados, tais como ácaros, colêmbolos, miriápodes, aracnídeos e diversas ordens de insetos, além de oligoquetos e crustáceos, que se caracterizam por apresentar diâmetro corporal entre 0,2 e 2 mm (Lavelle, 1997). Também conhecidos pelo termo “transformadores da liteira”, vivem no espaço poroso do solo e da serapilheira.

Preferencialmente se alimentam de material orgânico que é fragmentado e misturado e, após passar pelo trato digestivo, é eliminado no solo na forma de “pellets fecais”. Nos pellets fecais ocorrem interações mutualísticas com bactérias, que irão decompor o material orgânico excretado. Dessa forma a coprofagia nesse

grupo é intensa (Hassall e Rushton, 1982). Porém, o aproveitamento de nutrientes para o desenvolvimento do organismo coprofágico depende da composição do material orgânico, da sua passagem pelo trato intestinal e da colonização dos pellets fecais por bactérias decompositoras (Kautz et al., 2002). Esse tipo de mutualismo extracorpóreo é um tipo de digestão denominada “rúmen externo” (Swift et al., 1979).

Uma das grandes limitações da mesofauna é a incapacidade de digerir complexos tanino–proteicos, porém possuem a habilidade de estimular a mineralização de nitrogênio com liberação de amônio, que pode ser nitrificado e tornar-se prontamente disponível para as plantas, ou pode ser temporariamente acumulado no solo, para depois ser perdido por volatilização ou ainda ficar imobilizado na biomassa microbiana (Carrillo et al., 2011).

Na maior parte dos solos, os colêmbolos e os ácaros oribatídeos são numericamente dominantes e diversos dentre os artrópodes. Os ácaros oribatídeos apresentam forte dominância nos solos de florestas de clima temperado, onde 10 – 150 espécies podem exceder 100.000 ind m⁻² (Norton e Behan-Pelletier, 2009), enquanto que em florestas tropicais, como a Amazônia, cerca de 90 – 210 espécies podem chegar a cerca de 15.000 ind m⁻² (Franklin et al., 2001). Eles se alimentam preferencialmente de material vegetal vivo ou morto e de cadáveres de pequenos animais e podem ser predadores de fungos, microalgas e nematóides (Siepel, 1990). Suas fezes representam uma substância importante para a decomposição primária por fungos e bactérias e auxiliam na estruturação do solo. Após a morte eles deixam resíduos nitrogenados no solo (Karyanto et al., 2010).

Os colêmbolos vivem em locais úmidos e geralmente em grupos (Coleman e Crossley-Junior, 1996). Alimentam-se de material em decomposição, fungos, líquens e, desta maneira, são mais frequentes nas camadas superiores do solo (Hatfield e Stewart, 1993). Os principais predadores deste grupo são os ácaros, besouros e as aranhas. De toda a liteira consumida, apenas 20-30% são absorvidos pelo corpo do animal, enquanto que o restante é devolvido para o solo (Seastedt, 1984).

Foi constatado acúmulo de cálcio, magnésio e potássio no corpo de colêmbolos, o que demonstra que esses artrópodes podem ser um grande

reservatório de nutrientes minerais para o solo e as plantas. Além disso, nas fezes desses invertebrados, foi verificada 10, 4 e 8 vezes maior disponibilidade de potássio, cálcio e magnésio do que na liteira, atribuídos a processos que ocorrem no trato gastrointestinal que resultam no desaparecimento da liteira e na liberação desses nutrientes nas fezes. A concentração de nitrato disponível nas fezes foi 42 vezes maior do que na liteira, ao passo que o amônio foi 10 vezes menor nas fezes do que na liteira. Esse incremento de nitrato nas fezes de colêmbolos foi atribuído a associações de mutualismo entre as bactérias nitrificantes no trato gastrointestinal desse inseto. Isso na prática poderia representar redução de adubação nitrogenada no solo, uma vez que os colêmbolos prestam valiosos serviços ambientais ao ecossistema (Teuben e Verhoef, 1992).

Sendo assim, devido às diversas funções que desempenham no ecossistema e à sensibilidade a variáveis abióticas, fatores como abundância, composição e diversidade de grandes grupos da mesofauna edáfica podem ser utilizados como bons indicadores da saúde do solo (Barbercheck et al., 2009; Gergócs e Hufnagel, 2009).

2.5 Indicadores de Qualidade do Solo

A qualidade do solo pode ser definida como a capacidade de um determinado solo, manejado ou não, de sustentar animais e plantas, o que mantém ou beneficia a qualidade do ar e da água e conseqüentemente a saúde humana, no entanto o sistema solo só atinge a qualidade quando se integra no modelo as plantas e a biota edáfica, e a avaliação do seu funcionamento deve ter como base os princípios da termodinâmica do não equilíbrio, ciência que rege os sistemas abertos (Doran e Zeiss, 2000; Vezzani e Mielniczuk, 2009).

É de extrema dificuldade medir a qualidade do solo, uma vez que se encontra muito ligada a características químicas, físicas e biológicas do solo. Portanto, com o intuito de avaliar a capacidade do solo em suportar a vida, faz-se uso de indicadores de qualidade do solo que podem ser de origem química (teor de matéria orgânica, nutrientes minerais e concentração de poluentes), física (estabilidade de agregados,

densidade e porosidade) e biológica (abundância, riqueza e funcionalidade de organismos do solo). Contudo, para que um indicador seja bom, ele deve apresentar sensibilidade ao clima e ao manejo, se correlacionar com processos que ocorrem no solo, auxiliar na tomada de decisões (preferivelmente escolha de sistemas de manejos que aumentem a produtividade e ao mesmo tempo beneficie as plantas e os animais) e que possa fazer parte de um banco de dados, tornando acessível a pesquisadores, estudantes, conservacionistas e principalmente produtores rurais, fazendo com que o conhecimento saia da academia e possa ser colocado em prática (Doran e Parkin, 1994; Doran e Zeiss, 2000).

É de grande importância a utilização de bioindicadores para verificar a qualidade do solo, uma vez que são os primeiros a responder a alguma perturbação no solo. Dessa forma, a meso e a macrofauna do solo podem ser considerados bioindicadores de qualidade do solo, uma vez que são sensíveis ao clima, tipo de solo e cobertura vegetal e pelo fato de se encontrarem intimamente associados a atributos físicos, químicos e biológicos do solo, ora tendo sua diversidade e abundância afetada por esses atributos, ora sua abundância e diversidade afetando esses atributos (Baretta et al., 2010; Cardoso et al., 2013).

Nos últimos anos, com o avanço em técnicas estatísticas multivariadas, torna-se possível a criação de indicadores de qualidade do solo com maior precisão, pois integra literalmente atributos químicos, físicos e biológicos do solo, tornando possível inferir numericamente acerca de ambientes de baixa qualidade, média qualidade e alta qualidade (Velasquez et al., 2007).

Essa é uma abordagem relativamente nova e muito promissora, uma vez que torna possível a avaliação da qualidade do solo com maior precisão na escala espaço-temporal.

Referências

ABRAF, 2013. Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas [WWW Document]. URL www.abraflor.org.br/estatisticas.asp (accessed 2.10.16).

- Balieiro, F. de C., Dias, L.E., Franco, A.A., Campello, E.F.C., Faria, S.M. de, 2004. Acúmulo de nutrientes na parte aérea, na serapilheira acumulada sobre o solo e decomposição de filódios de *Acacia mangium* Willd. *Ciência Florest.* 14, 59–65. doi:10.5902/198050981781
- Barbercheck, M.E., Neher, D.A., Anas, O., El-Allaf, S.M., Weicht, T.R., 2009. Response of soil invertebrates to disturbance across three resource regions in North Carolina. *Environ. Monit. Assess.* 152, 283–298. doi:10.1007/s10661-008-0315-5
- Baretta, D., Brown, G.G., Cardoso, E.J.B.N., 2010. Potencial da macrofauna e outras variáveis edáficas como indicadoras da qualidade do solo em áreas com *Araucaria angustifolia*. *Acta Zoológica Mex.* 2, 135–150.
- Bouillet, J.P., Laclau, J.P., Gonçalves, J.L.M., Moreira, M.Z., Trivelin, P.C.O., Jourdan, C., Silva, E. V., Piccolo, M.C., Tsai, S.M., Galiana, A., 2008. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil. 2: Nitrogen accumulation in the stands and biological N₂ fixation. *For. Ecol. Manage.* 255, 3918–3930. doi:10.1016/j.foreco.2007.10.050
- Cardoso, E.J.B.N., Vasconcellos, R.L.F., Bini, D., Miyauchi, M.Y.H., Santos, C.A. dos, Alves, P.R.L., Paula, A.M. De, Nakatani, A.S., Pereira, J. de M., Nogueira, M.A., 2013. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? *Sci. Agric.* 70, 274–289. doi:10.1590/S0103-90162013000400009
- Carrillo, Y., Ball, B.A., Bradford, M.A., Jordan, C.F., Molina, M., 2011. Soil fauna alter the effects of litter composition on nitrogen cycling in a mineral soil. *Soil Biol. Biochem.* 43, 1440–1449. doi:10.1016/j.soilbio.2011.03.011
- Coleman, D.C., Crossley-Junior, D.A., 1996. *Fundamentals of soil ecology*. Academic Press, San Diego.
- da Silva, E.V., de Moraes Gonçalves, J.L., de Freitas Coelho, S.R., e Moreira, R.M., de Miranda Mello, S.L., Bouillet, J.P., Jourdan, C., Laclau, J.P., 2009. Dynamics of fine root distribution after establishment of monospecific and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium*. *Plant Soil* 325, 305–318. doi:10.1007/s11104-009-9980-6

Doran, J.W., Parkin, T.B., 1994. Defining and assessing soil quality, in: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bédouze, D.F., Stewart, B.A. (Eds.), *Defining Soil Quality for Sustainable Environment*. Soil Science Society of America, Madison.

Doran, J.W., Zeiss, M.R., 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Appl. Soil Ecol.* 15, 3–11. doi:10.1016/S0929-Get

FAO, 2006. *Global Forest Resources Assessment 2005. Progress towards sustainable forest management*. FAO For. Pap. 147.

Fisher, R.F., Binkley, D., 2000. *Ecology and Management of Forest Soils*. John Wiley & Sons Inc, New York.

Forrester, D.I., Bauhus, J., Cowie, A.L., Vanclay, J.K., 2006. Mixed-species plantations of Eucalyptus with nitrogen-fixing trees: A review. *For. Ecol. Manage.* 233, 211–230. doi:10.1016/j.foreco.2006.05.012

Franklin, E., Morais, J.W., Santos, E.M.R., 2001. Density and biomass of Acari and Collembola in primary forest, secondary regrowth and polycultures in central Amazonia. *Andrias* 15, 141–153.

Gergócs, V., Hufnagel, L., 2009. Application of oribatid mites as indicators. *Appl. Ecol. Environ. Res.* 7, 79–98.

Gonçalves, J.L.M., Barros, N.F., Nambiar, E.K.S., Novais, R.F., 1997. Soil and stand management for short-rotation plantations, in: Nambiar, E.K.S., Brown, A.G. (Eds.), *Management of Soil, Nutrients and Water in Tropical Plantation Forests*. ACIAR, Canberra, pp. 379–418.

Goncalves, J.L.M., Stape, J.L., Laclau, J.P., Bouillet, J.P., Ranger, J., 2008. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. *South. For.* 70, 105–118. doi:10.2989/SOUTH.FOR.2008.70.2.6.534

Grattapaglia, D., Kirst, M., 2008. Eucalyptus applied genomics: from gene sequences to breeding tools. *New Phytol.* 179, 911–929. doi:10.1111/j.1469-8137.2008.02503.x.

Hassall, M., Rushton, S.P., 1982. The role of coprophagy in the feeding strategies of terrestrial isopods. *Oecologia* 53, 374–381. doi:10.1007/BF00389017

- Hatfield, J.L., Stewart, B.A., 1993. Soil biology: Effects on soil quality. CRC Press, Boca Raton.
- Hinsinger, P., Brauman, A., Devau, N., Gérard, F., Jourdan, C., Laclau, J.P., Le Cadre, E., Jaillard, B., Plassard, C., 2011. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? *Plant Soil* 348, 29–61. doi:10.1007/s11104-011-0903-y
- Hunt, M.A., Battaglia, M., Davidson, N.J., Unwin, G.L., 2006. Competition between plantation *Eucalyptus nitens* and *Acacia dealbata* weeds in northeastern Tasmania. *For. Ecol. Manage.* 233, 260–274. doi:10.1016/j.foreco.2006.05.017
- Iglesias-Trabado, G., Wilstermann, D., 2008. Global cultivated Eucalyptus Forest map [WWW Document]. URL [http://www.git-forestry.com/downloads/GIT_Forestry_Global_Eucalyptus_Map_2009.Brochure_EN G.pdf](http://www.git-forestry.com/downloads/GIT_Forestry_Global_Eucalyptus_Map_2009.Brochure_EN_G.pdf). (accessed 9.20.16).
- Jackson, L.E., Burger, M., Cavagnaro, T.R., 2008. Roots, Nitrogen Transformations, and Ecosystem Services. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59, 341–363. doi:10.1146/annurev.arplant.59.032607.092932
- Karyanto, A., Rhamadic, A., Franklin, E., Susilo, F.X., Morais, J.W., 2010. Collembola, Acari e outros grupos da mesofauna do solo – O método de Berlese, in: Moreira, F.M.S., Bignel, D.E., Huising, E.J. (Eds.), *Manual de Biologia Dos Solos Tropicais: Amostragem E Caracterização Da Biodiversidade*. Editora UFLA, Lavras, p. 367. doi:10.1111/j.1469-8137.2008.02503.x.
- Kautz, G., Zimmer, M., Topp, W., 2002. Does *Porcellio scaber* (Isopoda: Oniscidea) gain from coprophagy? *Soil Biol. Biochem.* 34, 1253–1259. doi:10.1016/S0038-0717(02)00065-2
- Laclau, J.P., Bouillet, J.P., Gonçalves, J.L.M., Silva, E. V., Jourdan, C., Cunha, M.C.S., Moreira, M.R., Saint-André, L., Maquère, V., Nouvellon, Y., Ranger, J., 2008. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil. 1. Growth dynamics and aboveground net primary production. *For. Ecol. Manage.* 255, 3905–3917. doi:10.1016/j.foreco.2007.10.049

Laclau, J.P., Ranger, J., de Moraes Gonçalves, J.L., Maquère, V., Krusche, A. V., M'Bou, A.T., Nouvellon, Y., Saint-André, L., Bouillet, J.P., de Cassia Piccolo, M., Deleporte, P., 2010. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations. Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. *For. Ecol. Manage.* 259, 1771–1785. doi:10.1016/j.foreco.2009.06.010

Laclau, J.P., Ranger, J., Deleporte, P., Nouvellon, Y., Saint-André, L., Marlet, S., Bouillet, J.P., 2005. Nutrient cycling in a clonal stand of Eucalyptus and an adjacent savanna ecosystem in Congo: 3. Input-output budgets and consequences for the sustainability of the plantations. *For. Ecol. Manage.* 210, 375–391. doi:10.1016/j.foreco.2005.02.028

Lair, G.J., Zehetner, F., Khan, Z.H., Gerzabek, M.H., 2009. Phosphorus sorption-desorption in alluvial soils of a young weathering sequence at the Danube River. *Geoderma* 149, 39–44. doi:10.1016/j.geoderma.2008.11.011

Lavelle, P., 1997. Faunal activities and soil processes: adaptative strategies that determine ecosystem function., *Advances in Ecological Research.*

Macedo, M.O., Resende, A.S., Garcia, P.C., Boddey, R.M., Jantalia, C.P., Urquiaga, S., Campello, E.F.C., Franco, A.A., 2008. Changes in soil C and N stocks and nutrient dynamics 13 years after recovery of degraded land using leguminous nitrogen-fixing trees. *For. Ecol. Manage.* 255, 1516–1524. doi:10.1016/j.foreco.2007.11.007

Mendes, P.F., Vasconcellos, R.L.F., de Paula, A.M., Cardoso, E.J.B.N., 2010. Evaluating the Potential of Forest Species Under “Microbial Management” for the Restoration of Degraded Mining Areas. *Water Air Soil Pollut.* 208, 79–89. doi:10.1007/s11270-009-0150-5

Norton, R.A., Behan-Pelletier, V., 2009. “Suborder Oribatida,” in: Krantz, G.W., Walter, D.E. (Eds.), *A Manual of Acarology*. Texas Tech University Press, Texas, p. 807.

Seastedt, T.R., 1984. The Role of Microarthropods in Decomposition and Mineralization Processes. *Annu. Rev. Entomol.* 29, 25–46. doi:10.1146/annurev.ento.29.1.25

- Siepel, H., 1990. Niche relationships between two panphytophagous soil mites, *Nothrus silvestris* Nicolet (Acari, Oribatida, Nothridae) and *Platynothrus peltifer* (Koch) (Acari, Oribatida, Camisiidae). *Biol. Fertil. Soils* 9, 139–144. doi:10.3130/aijsaxx.310.0_88
- Swift, M.J., Heal, O.W., Anderson, J.M., 1979. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*, 1st ed. University of California Press, Barkley.
- Teuben, A., Verhoef, H.A., 1992. Direct contribution by soil arthropods to nutrient availability through body and faecal nutrient content. *Biol. Fertil. Soils* 14, 71–75. doi:10.1007/BF00336253
- Velasquez, E., Lavelle, P., Andrade, M., 2007. GISQ , a multifunctional indicator of soil quality 39, 3066–3080. doi:10.1016/j.soilbio.2007.06.013
- Vezzani, F.M., Mielniczuk, J., 2009. Uma visão sobre qualidade do solo. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 33, 743–755.
- Voigtlaender, M., Laclau, J.P., de Gonçalves, J.L.M., de Piccolo, M.C., Moreira, M.Z., Nouvellon, Y., Ranger, J., Bouillet, J.P., 2012. Introducing *Acacia mangium* trees in *Eucalyptus grandis* plantations: Consequences for soil organic matter stocks and nitrogen mineralization. *Plant Soil* 352, 99–111. doi:10.1007/s11104-011-0982-9
- Wang, C., Feng, X., Guo, P., Han, G., Tian, X., 2010. Response of degradative enzymes to N fertilization during litter decomposition in a subtropical forest through a microcosm experiment. *Ecol. Res.* 25, 1121–1128. doi:10.1007/s11284-010-0737-8
- Yerokun, O.A., 2008. Chemical characteristics of phosphorus in some representative benchmark soils of Zambia. *Geoderma* 147, 63–68. doi:10.1016/j.geoderma.2008.07.007

3 ABUNDÂNCIA E DIVERSIDADE DA MESOFAUNA EPIEDÁFICA CONDICIONADA PELA SERAPILHEIRA DE *Acacia mangium*

Resumo

A mesofauna epi-edáfica compreende pequenos invertebrados que vivem na serapilheira e fragmentam o resíduo vegetal, o que facilita o ataque microbiano e a ciclagem de nutrientes. Esses organismos são influenciados pelo sistema de manejo, clima, cobertura vegetal e serapilheira. Diante disso, o presente estudo teve por objetivo avaliar a abundância e diversidade da mesofauna edáfica, bem como estabelecer possíveis relações entre os atributos químicos da serapilheira, a comunidade invertebrada epigeica e a sazonalidade em plantios puros de *Acacia mangium* (AC), plantios mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* (M) e plantios puros de *Eucalyptus grandis* (EU). Para tanto, foram selecionadas três parcelas de cada sistema florestal e delas retiradas 5 amostras equidistantes na primavera e no outono para avaliação de elementos químicos da serapilheira (Ca, Mg, N, P, C, C/N, C/P, Mn, Cu, Fe, Zn), umidade, abundância, densidade, riqueza e diversidade de mesofauna. As médias de cada atributo foram comparadas entre sistemas e entre épocas de coleta pelo teste de Tukey a 5%; correlações, regressões e análises multivariadas foram realizadas para estabelecer relações da mesofauna com atributos químicos da serapilheira e sistemas florestais. A maior abundância de invertebrados se deu em épocas de maior ocorrência de chuvas, enquanto poucas diferenças foram constatadas entre os sistemas florestais, porém *Acacia mangium* se correlacionou com a maioria dos elementos nutritivos às plantas e com a abundância e diversidade de invertebrados, mostrando que o consórcio dessa leguminosa com arbóreas Leguminosas (Fabaceae) deve ser estimulado, tendo em vista os benefícios que *Acacia mangium* traz ao ecossistema.

Palavras-chave: Serapilheira; Invertebrados; Abundância; Diversidade; Leguminosas

Abstract

The litter mesofauna comprises small invertebrates that actively contribute to moisten and comminute the plant residues, thus facilitating the decomposition by microorganisms. Mesofaunal organisms are influenced by management, weather, plant cover and litter. In this study, we aimed at evaluating the abundance and diversity of mesofauna in soil and litter and at establishing correlations between mesofaunal and soil and litter attributes in different seasons, in *Acacia mangium* (AC), *Eucalyptus grandis* (EU) and mixed plantations (M) composed by *Acacia* and *Eucalyptus*. Three plots for each forest system were selected and five litter samples were taken for chemical litter analyses (Ca, Mg, N, P, C, C/N and C/P ratio, Mn, Cu, Fe and Zn), moisture, richness, abundance, density and diversity of litter mesofauna. The means of the attributes measured when compared between forest systems, based on correlations, regressions and multivariate analyses to establish correlations between chemical litter attributes, mesofauna, forest systems and seasons. A much

higher mesofaunal abundance occurred in the rainy season, although few differences were found between forest systems. Most of the chemical litter attributes, and abundance, richness and diversity of mesofauna correlated with *Acacia mangium*. Thus, we recognize the importance of mixed plantations with *Acacia mangium* because of the diverse benefits this species brings to the ecosystem.

Keywords: Litter; Invertebrates; Abundance; Biodiversity; Legumes

3.1 Introdução

A mesofauna epiedáfica compreende invertebrados que vivem na superfície do solo e apresentam diâmetro corpóreo entre 0,2 e 2 mm. Esses pequenos organismos também são conhecidos como transformadores da serapilheira, uma vez que ativamente fragmentam e umedecem o resíduo vegetal, o que facilita a decomposição microbiana e consequentemente a mineralização e a ciclagem de nutrientes para o solo (Carrillo et al., 2011; Lavelle et al., 1997).

A abundância e a diversidade desses organismos podem ser alteradas em função da composição vegetal, clima, umidade, temperatura, utilização de agroquímicos e fertilizantes, entre outros, o que os torna excelentes bioindicadores, uma vez que a presença ou ausência de certos grupos e a quantidade de tais grupos nas amostras pode refletir os processos de saúde ou de degradação ambiental (Anderson, 2009; Cardoso et al., 2013).

Plantios florestais de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* depositam grande quantidade de serapilheira sobre o solo, que pode servir de habitat e fornecer nichos para a microbiota e fauna epiedáfica, evitar aquecimento e perda de solo por erosão, além de constituir importante reservatório de compostos orgânicos que podem ser liberados lentamente para a solução do solo, reação modulada principalmente pela ação de clima, microrganismos e fauna epiedáfica (Bachega et al., 2016). Essas culturas florestais possuem grande adaptabilidade a climas tropicais, predominantes no Brasil, uma vez que são tolerantes a condições de acidez, pouco exigentes em nutrientes minerais e apresentam crescimento rápido (Krisnawati et al., 2011; Temesgen et al., 2016). Além disso, a espécie *Acacia mangium* é uma leguminosa que possui a capacidade de fixar o nitrogênio atmosférico biologicamente, uma vez

que se associa a rizóbios, o que auxilia no desenvolvimento da parte aérea e radicular, sobretudo em solos oligotróficos, promovendo maior aporte de nutrientes, principalmente do nitrogênio, tanto em superfície, como no interior do solo (Voigtlaender et al., 2012), o que pode favorecer a comunidade de invertebrados edáficos.

Na tentativa de se aumentar a produtividade de Eucaliptos com sustentabilidade, tem se tentado cultivar Eucaliptos em consórcio com Acácia, uma vez que essa última pode contrabalançar as perdas de nitrogênio decorrentes da extração madeireira de eucaliptos (Bouillet et al., 2013; Santos et al., 2017). Essa associação promove maior diversidade de resíduos orgânicos no solo, o que nos leva a acreditar que exista maior diversidade de mesofauna na serapilheira em plantios mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* do que em plantios florestais puros.

Estudos que envolvem a dinâmica da comunidade invertebrada em serapilheira são muito escassos (Carrillo et al., 2011) e merecem muita atenção, tendo em vista o importante papel desse compartimento na ciclagem de nutrientes para o solo.

Diante disso, o presente estudo tem por objetivo avaliar a densidade e a diversidade de invertebrados epiedáficos na serapilheira de plantios puros e mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium*, visando encontrar diferenças entre tratamentos e sazonalidade, além de estabelecer possíveis relações de atributos químicos da serapilheira com a abundância, diversidade e sistemas florestais estudados.

3.2 Materiais e Métodos

3.2.1 Caracterização das áreas de estudo

As amostras de serapilheira foram provenientes da Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (EECFI), estado de São Paulo (23°02'01"S e 48° 97'30"W). A estação é vinculada ao Departamento de Ciências Florestais (LCF) da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ/USP. A região possui

clima mesotérmico úmido (Cwa) segundo a classificação de Koeppen e altitude média de 830 metros. As áreas de estudo foram cultivadas de 1940 até 1998 com *E. saligna* mantido como matagal sem aplicação de fertilizantes. Após o corte, foi estabelecido um plantio de *E. grandis* com fertilização de 300 kg ha⁻¹ NPK na proporção de 10:20:10 até 2002, para que em 2003 fosse plantada a primeira rotação de plantios puros e mistos de *E. grandis* e *A. mangium* com primeiro corte em 2009 (Bini et al., 2013).

Para o presente estudo foram avaliados três tratamentos de uma segunda rotação desses plantios: Plantio puro de *E. grandis* - 100E:0A (EU), plantio puro de *A. mangium* - 0E:100A (AC) e plantio misto de *E. grandis* e *A. mangium* - 50E:50A (M) com espaçamento entre árvores de três metros (Apêndice 1). O delineamento experimental consistiu de 3 parcelas para cada tratamento de 30 m x 30 m, dispostas em blocos ao acaso (le Maire et al., 2013).

Foram realizadas duas coletas, uma no dia 21 de outubro de 2015 (primavera), e outra no dia 31 de março de 2016 (outono). É possível observar que nos quatro meses que antecederam a primeira coleta (outubro de 2015) houve uma menor precipitação do que nos quatro meses que antecederam a segunda coleta (março de 2016) (Figura 3.1A), da mesma forma que nos dias que antecederam a primeira coleta também houve menor volume de chuva do que naqueles que antecederam a segunda coleta (Figura 3.1B e 3.1C). As temperaturas pouco variaram, porém foram ligeiramente menores nos meses de junho e julho do que nos demais meses (Figura 3.1A). Dessa forma é possível caracterizar um período de estiagem (Junho - Outubro), e outro de abundância de chuvas (Novembro - Março).

Figura 3.1- Temperatura média e precipitação mensal (A), temperatura média e precipitação diária no mês de outubro de 2015 (B) e temperatura média e precipitação diária no mês de março de 2016 (C) na estação experimental de Itatinga – SP.

3.2.2 Amostragem de serapilheira para avaliação da mesofauna epiedáfica

Em cada parcela foram retiradas cinco amostras equidistantes de serapilheira em um grid de amostragem para avaliação da mesofauna epiedáfica, com auxílio de um gabarito de 25 cm x 25 cm, em duas ocasiões (outubro de 2015 – primavera, e março de 2016 – outono), desconsiderando as bordas das parcelas (Apêndice 2). Esse método de amostragem consiste de uma adaptação do tradicional método para coleta de macrofauna edáfica “TSBF” proposto por Anderson e Ingram (1993), porém adaptou-se o método para avaliação de mesofauna em amostras de serapilheira para tornar possível a quantificação dos invertebrados epiedáficos. Posteriormente, essas amostras foram levadas a baterias extratoras (Aquino et al., 2006), montadas em casa de vegetação, onde permaneceram por sete dias

(Apêndice 3). Os invertebrados foram identificados em nível de ordem e conservados em álcool 90.

3.2.3 Amostragem da serapilheira para avaliação de atributos químicos e determinação da umidade

Nos mesmos pontos de coleta de amostras para avaliação da mesofauna epiedáfica foram tomadas amostras para avaliação de macronutrientes (C, N, P, Ca, Mg e S), micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn) e determinação da umidade na serapilheira.

O nitrogênio do resíduo vegetal foi extraído por meio de digestão sulfúrica e determinado por destilação semimicro Kjeldahl, ao passo que o fósforo, cálcio, magnésio, enxofre, cobre, ferro, manganês e zinco foram extraídos via digestão nítrico - perclórica. O fósforo foi determinado por colorimetria do metavanadato, o enxofre por gravimetria do sulfato de bário e o cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco por absorção atômica (Malavolta et al., 1997).

O carbono da serapilheira foi determinado pelo método de Yeomans e Bremner (1988), uma adaptação do método tradicional de extração de carbono do solo proposta por Walkey e Black, via oxidação do dicromato de potássio em meio ácido, porém mantendo-se o extrato na temperatura de 170°C, o que recupera cerca de 90% do carbono da serapilheira determinado por combustão (Carmo e Silva, 2012).

3.2.4 Cálculo de diversidade e densidade da mesofauna epiedáfica

Todos os dados de abundância de fauna foram extrapolados para número de indivíduos m⁻², com base na área do gabarito de 25 cm x 25 cm, constituindo assim a densidade de invertebrados.

A diversidade foi calculada por meio do Índice de Simpson ($Is=1-D$), sendo D a dominância expressa por $\sum pi^2$, onde pi representa a abundância relativa de cada grupo taxonômico amostrado. Quanto mais próximo o resultado de 1, maior a

diversidade do sistema, pois menor a dominância (Magurran, 2004). A riqueza foi determinada pelo número total e médio de grupos por sistema e número médio de grupos por amostra.

3.2.5 Análise estatística

Foi realizada uma análise de variância (ANOVA), complementada com o teste de Tukey a 5%, para comparar as médias dos atributos químicos da serapilheira, de abundância, riqueza e diversidade da mesofauna epiedáfica, obtidos nos cinco pontos coletados em cada parcela, nas duas datas de coleta e entre as datas de coleta (primavera vs outono), a fim de se verificar diferenças estatisticamente significativas provenientes dos tratamentos e da sazonalidade, respectivamente. Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, e quando não atingiam a normalidade eram transformados pela equação $\log(x+1)$. Caso após a transformação ainda não fosse alcançada a normalidade, fez-se uso da estatística não paramétrica de Kruskal-Wallis.

Posteriormente foi realizada uma análise de redundância (RDA), associada ao teste de permutação de Monte Carlo ($p < 0.05$) para cada estação do ano, a fim de se estabelecer possíveis relações entre as variáveis respostas (grupos de invertebrados) e as variáveis explicativas (atributos químicos da serapilheira) e verificar se existe formação de agrupamentos entre os sistemas florestais estudados. Também foi realizada análise de SIMPER para evidenciar quais os grupos de invertebrados que apresentaram maior capacidade de discriminar as áreas de estudo (Rodrigues et al., 2010).

Adicionalmente, foram utilizadas análises de correlação de Pearson e regressões visando estabelecer correlações entre atributos químicos e biológicos da serapilheira.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Aspectos químicos da serapilheira

Foi constatado, de maneira geral, maior teor de macro e micronutrientes na serapilheira dos sistemas florestais na época chuvosa (outono) do que na época de maior seca (primavera) (Tabela 3.1). Esse comportamento pode estar relacionado com o maior crescimento vegetal em épocas de maior quantidade de chuva e temperaturas mais amenas, o que reduz a evapotranspiração vegetal (González-Muñoz et al., 2014; Rodríguez et al., 2017). Dessa forma, o conjunto desses fatores deve promover maior acúmulo da maioria dos nutrientes, especialmente de Carbono, na parte aérea das plantas que, após a senescência, foi depositada principalmente no intervalo da primeira para a segunda coleta (outubro até março) (Figura 3.1).

Por outro lado, foi constatado maior teor de P na primavera, em EU e M, do que no outono, enquanto que para AC os níveis de P se mantiveram semelhantes nas duas coletas. O P é um elemento pouco móvel no solo, uma vez que se apresenta na maioria das vezes complexado com outros elementos ou adsorvido nos colóides do solo, porém, na planta é muito móvel, podendo em casos de deficiência migrar dos tecidos mais velhos para os tecidos mais jovens. Assim, é possível que o processo de micorrização ocorra com mais eficiência em plantios puros de AC, permitindo assim maior eficiência na extração de P do solo e consequentemente maior acúmulo no tecido vegetal (Mortimer et al., 2013; Tavares et al., 2016).

Tabela 3.1- Atributos químicos mensurados em serapilheira de *Acacia mangium* (AC), *Eucalyptus grandis* (EU) e plantios mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* (M) em outubro de 2015 (primavera) e em março de 2016 (outono).

		Outubro (Primavera)			Março (Outono)		
	Fatores	AC	M	EU	AC	M	EU
g kg ⁻¹	N	10.44 aA	7.95 abA	7.70 bA	11.36 aA	6.30 bA	5.44 bB
	Ca	4.54 aB	2.97 bB	3.10 bB	5.95 aA	5.38 aA	5.19 aA
	Mg	0.95 aB	0.79 aB	0.74 aB	1.25 aA	1.42 aA	1.31 aA
	S	0.68 aA	0.41 aA	0.45 aA	0.92 aA	0.72 abA	0.70 bA
	C	459.22 aB	494.86 aB	517.76 aB	573.97 aA	582.47 aA	578.66 aA
	P	0.32 aA	0.32 aA	0.32 aA	0.28 aA	0.25 aB	0.24 aB
mg kg ⁻¹	Cu	13.50 aB	12.67 aA	15.33 aA	17.40 aA	7.73 bB	5.33 bB
	Fe	4897.00 aA	5546.00 aA	5486.00 aA	2125.20 aB	1024.40 aB	999.00 aB
	Mn	148.13 bB	201.53 abB	256.20 aB	264.20 bA	311.07 abA	351.40 aA
	Zn	15.20 aB	14.20 aA	16.40 aA	21.94 aA	14.91 bA	13.99 bB
%	Umidade	12.99 aB	12.53 aB	9.60 aB	36.64 aA	42.38 aA	33.91 aA
	C/N	50.11 bA	54.14 abB	71.31 aB	51.96 bA	99.38 aA	109.41 aA
	C/P	1536.00 aB	1487.00 aB	1602.00 aB	2084.62 aA	2423.10 aA	2406.30 aA

* Letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre os sistemas florestais, enquanto que letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre as épocas de coleta pelo teste de Tukey a 5% de significância.

No período de primavera, poucos atributos diferiram entre os sistemas florestais estudados. Nessa época foi constatado maior teor de N e Ca em acácia do que nos demais sistemas florestais. Também foi encontrado menor teor de Mn e menor relação C/N na serapilheira de AC do que em M e EU. Tais resultados se repetiram no outono, porém, foi encontrado maior teor de S em serapilheira de plantios de AC e M do que em EU, da mesma forma que o teor de Cu e Zn foi maior nos plantios de AC do que nos demais sistemas florestais avaliados (Tabela 3.1).

A menor relação C/N encontrada na acácia sugere a existência de compostos orgânicos de maior qualidade na acácia do que nos demais sistemas florestais estudados (Lugo e Erickson, 2017). Isso ocorre porque a espécie leguminosa *Acacia mangium* é capaz de fixar o nitrogênio atmosférico por meio de associação mutualística entre a leguminosa e o rizóbio, com formação de nódulos nas raízes capazes de reduzir o gás nitrogênio a amônio (Kahindi et al., 1997; Mendes et al., 2010). O maior teor de nitrogênio acumulado nas plantas permite que essa cresça vigorosamente e com rapidez e extraia maiores quantidades de macro e micronutrientes do solo que, ao passar do tempo, se acumulam na biomassa vegetal (Mortimer et al., 2013; Png et al., 2017).

Por outro lado, o manganês é um elemento que, em excesso no solo, pode causar toxicidade e prejudicar o desenvolvimento das plantas (Santos et al., 2017); porém, este foi constatado em menor quantidade nas duas épocas de coleta na serapilheira de AC do que em M e EU. Além disso, o manganês é fundamental para o funcionamento da enzima manganês-peroxidase, produzida por algumas espécies de fungos micorrízicos e por plantas submetidas a altos níveis de Mn (Hatakka, 2001; Santos et al., 2017) . Tal enzima é muito importante para a degradação da lignina e formação de húmus (Berg et al., 2015; Steffen et al., 2002) e, possivelmente, esses processos podem estar ocorrendo em maior intensidade nos plantios mistos e nos plantios puros de *Eucalyptus grandis*, tendo em vista a maior relação C/N e o maior teor de manganês encontrado nesses sistemas florestais (Tabela 3.1). Berg (2014) constatou que a fração estável da serapilheira, de lenta decomposição, se correlaciona negativamente com o teor de Mn na serapilheira; logo, essa fração mais estável pode preponderar nos plantios de AC, onde o Mn foi encontrado em menores quantidades (Tabela 3.1).

3.3.2 Mesofauna epiedáfica e sua relação com a sazonalidade

A maioria dos grupos de invertebrados amostrados apresentou maior densidade no outono do que na primavera. Foram amostrados cerca de 20 vezes mais indivíduos em *Acacia mangium*, 10 vezes mais em plantio misto e 10 vezes mais em *Eucalyptus grandis* no outono do que na primavera. O índice de diversidade de Simpson em M foi menor no outono do que na primavera, enquanto a riqueza foi maior no outono do que na primavera nos três sistemas florestais estudados. No entanto, a maior quantidade total de ordens identificadas se deu na primavera (Tabela 3.2). É possível que o menor número de indivíduos amostrados na primavera permitiu menor índice de Simpson e maior dominância em M na primavera do que no outono, uma vez que na primavera a dominância pelos ácaros foi muito acentuada em M, enquanto que no outono foram amostradas quantidades muito maiores de ácaros (3 vezes mais no outono do que na primavera) e de colêmbolos (850 vezes mais no outono do que na primavera), o que permitiu uma distribuição mais uniforme de mesofauna no outono do que na primavera, constatada pela

menor dominância e maior diversidade de Simpson no outono quando comparado com a primavera (Tabela 3.2).

A maior abundância e riqueza média verificada no outono possivelmente se deve ao maior volume de chuvas observado em março do que em outubro, tanto pontualmente, uma vez que choveu mais nos dias que antecederam a segunda coleta (março), como mensalmente, já que houve maior volume de chuvas nos meses que antecederam a segunda coleta (novembro-março) do que naqueles que antecederam a primeira coleta (junho-outubro) (Figura 3.1). Esses resultados corroboram o trabalho de Wu et al., (2014), que encontraram correlações positivas entre o volume de precipitações e a abundância de mesofauna e também constataram que o efeito da precipitação altera mais a comunidade da mesofauna do que o aumento da temperatura.

Tabela 3.2- Diversidade e densidade de fauna (indivíduos m⁻²) em plantios de *Acacia mangium* (AC), *Eucalyptus grandis* (EU) e em plantios mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* (M) em outubro de 2015 (primavera) e março de 2016 (outono).

Tratamentos	Outubro (Primavera)			Março (Outono)		
	AC	M	EU	AC	M	EU
Acarina	572 aB	701 aB	322 aB	9520 aA	2911 abA	1150 bA
Colêmbola	59 aB	3 aB	15 aB	5494 aA	2508 aA	2887 aA
Hymenoptera	77 aB	17 aB	33 aA	374 aA	277 aA	65 aA
Coleoptera	47 aB	23 aB	34 aA	44 aA	165 aA	106 aA
Heteroptera	13 aA	14 aA	10 aA	103 aA	29 aA	11 aA
Araneae	57 aA	14 bA	3 bB	23 aB	10 bA	18 abA
Diptera	16 aB	6 aA	14 aA	167 aA	68 aA	48 aA
Isoptera	13 aA	4 aA	3 aA	26 aA	4 bA	10 abA
Blattodea	2 aA	0 aB	2 aA	4 aA	11 aA	1 aA
Thysanoptera	23 aB	9 aB	11 aA	237 aA	44 bA	9 bA
Lepidoptera	1 aA	1 aA	3 aA	0 aA	0 aA	0 aA
Pseudoscorpionida	2 aA	1 aA	0 aA	0 aA	0 aA	0 aA
Protura	2 aA	1 aA	0 aA	0 aA	0 aA	0 aA
Isopoda	0 aB	0 aB	3 aB	30 aA	43 aA	17 aA
Opilionida	0 aA	0 aA	1 aA	0 aA	0 aA	0 aA
Simphyla	3 aA	0 aA	0 a	1 aA	42 aA	0 aA
Chilopoda	1 aA	0 aB	0 aA	12 aA	4 aA	2 aA
Total	884 aB	795 aB	454 aB	16194 aA	6115 bA	4323 bA
Riqueza	5.80 aB	3.53 aB	4.80 aB	8.27 aA	8.07 abA	6.87 bA
Dominância	0.45 bA	0.56 aA	0.48 abA	0.45 aA	0.45 aB	0.51 aA
Simpson	0.55 aA	0.37 bB	0.52 bA	0.55 aA	0.55 aA	0.49 aA
Riqueza s ⁻¹	9.33 aA	8.00 aB	9.33 aA	12.00 aA	12.00 aA	10.33 aA
Dominância s ⁻¹	0.44 bA	0.77 aA	0.52 bA	0.49 aA	0.40 aB	0.51 aA
Simpson s ⁻¹	0.56 aA	0.23 bB	0.48 aA	0.51 aA	0.60 aA	0.49 aA
Riqueza Total	15	12	13	13	13	12
Dominância Total	0.44	0.78	0.52	0.46	0.4	0.52
Simpson Total	0.56	0.22	0.48	0.54	0.6	0.48

* Letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre os sistemas florestais, enquanto que letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre as épocas de coleta pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Dessa forma, a condição climática permitiu maior umidade da serapilheira (Tabela 3.1) e, conseqüentemente, favoreceu o desenvolvimento de um maior número de indivíduos no outono do que na primavera (Tabela 3.2), sendo que a abundância total de fauna amostrada, bem como a riqueza de grupos se correlacionaram positivamente com a umidade e com o teor de carbono da serapilheira (Figura 3.2). A água é um componente indispensável para que se processem a maior parte das reações químicas relacionadas ao metabolismo dos

invertebrados e é fundamental para que ocorra a fotossíntese, permitindo assim maior acúmulo de carbono no tecido vegetal (Da Rosa et al., 2015; Novriyanti et al., 2012). Além do mais, o material orgânico, à base de carbono, é a principal fonte de energia, constituinte de moléculas que servem de alimento para os invertebrados epiedáficos, auxiliando no desenvolvimento e reprodução dos mesmos (Hendrix, 2000; Lavelle, 1997).

Figura 3.2- Análise de regressão entre carbono total da serapilheira e abundância total de fauna (A), carbono total da serapilheira e riqueza de grupos (B), umidade da serapilheira e abundância total de fauna (C) e umidade da serapilheira e riqueza de grupos (D). n = 90 amostras.

3.3.3 Mesofauna epiedáfica e sua relação com os sistemas florestais

Na primavera, poucas diferenças foram constatadas entre os sistemas florestais estudados. Apenas o índice de diversidade de Simpson foi maior em acácia e, conseqüentemente, a dominância foi menor em acácia do que nos demais

sistemas estudados. Ordens como Lepidoptera, Pseudoscorpionida, Protura e Opilionida foram encontradas somente na primavera. Isopoda e Opilionida foram constatados na primavera somente em *Eucalyptus grandis*, ao passo que Simphyla e Chilopoda foram constatados somente em *Acacia mangium*. Por outro lado, a ordem Pseudoscorpionida foi constatada somente em AC e em plantios mistos (Tabela 3.2). O fato de não se amostrar determinada ordem não significa que aquele sistema necessariamente não a possua, mas se deve frequentemente à distribuição desuniforme dos invertebrados no ambiente (Yunfeng et al., 2015).

No outono, houve maior densidade de ácaros em AC do que em EU, e a abundância de aranhas, bem como a densidade total de invertebrados foi maior em AC do que nos demais sistemas florestais avaliados. Além disso, a densidade de colêmbolos foi cerca de 2 vezes maior em AC do que nos demais sistemas florestais.

Ácaros e colêmbolos são os principais representantes da mesofauna edáfica (Yunfeng et al., 2015). Esses organismos desenvolveram uma espécie de rúmen externo, onde as interações mutualísticas com os microrganismos é muito intensa (Swift et al., 1979). Assim, primeiramente esses invertebrados fragmentam e umedecem o resíduo vegetal fresco, que é liberado ao ecossistema como “pellets fecais”. Isso facilita o ataque microbiano, e então os invertebrados reingerem esse material, de menor relação C/N, que é mais facilmente assimilável para o seu desenvolvimento. Dessa forma, a coprofagia nesses grupos é bastante acentuada (Hassall e Rushton, 1982; Lavelle, 1997). Porém, o aproveitamento de nutrientes para o desenvolvimento do organismo coprofágico depende da composição do material orgânico, da sua passagem pelo trato intestinal e da colonização dos “pellets fecais” por bactérias decompositoras (Kautz et al., 2002), cujo processo parece estar intensificado nos plantios de AC, uma vez que apresentou maior densidade total de invertebrados, sobretudo de ácaros e colêmbolos.

Ordens como Isopoda, que na primavera foi encontrada somente em EU, e Chilopoda, somente em AC, no outono foram encontradas nos três sistemas florestais avaliados (Tabela 3.2). A ordem Isopoda, muito dependente do teor de água no ambiente, uma vez que seus representantes respiram por meio de

brânquias (Correia et al., 2008), foi amostrado nos três sistemas florestais avaliados no outono, quando a umidade da serapilheira era maior, da mesma forma que os Chilopoda. Por outro lado, a ordem Simphyla, que na primavera foi amostrada somente em AC, no outono também se fez presente em M e, em nenhuma ocasião, foi amostrada em EU (Tabela 3.2). Predadores ativos, como a ordem Pseudoscorpionida, e detritívoros como Simphyla e Protura foram encontrados somente em AC e em M, o que indica melhores condições edáficas nessas áreas do que em EU, porque, para que tais invertebrados predominem no ecossistema, é necessário que as cadeias alimentares estejam bem estabelecidas (Menta et al., 2014, Da Rosa et al., 2015).

3.3.4 Relações entre atributos químicos da serapilheira, sistemas florestais e mesofauna epiedáfica

A análise de redundância foi significativa para a explicação do primeiro e dos demais eixos formados (teste de monte Carlo $p < 0.05$) para as duas datas de coleta. Na primavera as variáveis químicas significativas pelo teste de monte Carlo ($p < 0.05$) foram Mn, Zn e Mg, ao passo que no outono foram N e Cu. A soma dos dois primeiros eixos das RDA explicaram mais de 22% da variabilidade dos dados (Figura 2.3), ao passo que a relação entre mesofauna e os atributos mensurados na serapilheira explicaram mais de 90% da variabilidade dos dados, indicando que os atributos químicos da serapilheira determinam a composição da comunidade invertebrada epigeica. Foi possível por meio dessa análise, verificar a formação de dois agrupamentos distintos que se mantiveram nas duas épocas de coleta: 1) Amostras provenientes de *Acacia mangium*; e 2) Amostras provenientes de plantios puros de *Eucalyptus grandis* e de plantios mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium*. É possível observar correlações positivas entre a abundância de elementos químicos, diversidade e abundância de mesofauna epigeica na serapilheira de *Acacia mangium* (Figura 3.3). Dessa forma, o maior “turnover” de nutrientes da liteira para o solo, sobretudo do N, em *Acacia mangium*, como retratado por Tchichelle et al. (2017), a baixa relação C/N da serapilheira e a

diversidade elementos químicos nesse plantio florestal favoreceu a abundância, riqueza e diversidade de grupos em AC.

Além disso, recentemente foi reportado na literatura que a rizosfera de *Eucalyptus grandis* emite alguns compostos voláteis, tais como 2,4-dimetil-heptano, 2,2,4,6-pentametil heptano e 2,4- di-tert-butilfenol, que causam alterações nas enzimas acetilcolinesterase (relacionada a sinapses neuronais), superóxido dismutase (relacionada a transformações de radicais superóxidos em H_2O_2 e O_2) e glutatona-S transferase (relacionada à proteção de tecidos ao stress oxidativo), resultando em efeitos extremamente tóxicos para com a fauna edáfica (Zhiquan et al., 2017). Sendo assim, é possível que esses compostos voláteis emitidos por *Eucalyptus grandis* sejam responsáveis pela menor abundância registrada em M e em EU.

Figura 3.3- Análise de redundância (RDA). Vetores roxos correspondem a variáveis respostas (atributos biológicos), enquanto que vetores azuis correspondem a variáveis explicativas (atributos físico-químicos) da serapilheira.

A análise de SIMPER mostrou que para as duas coletas, a ordem Acarina foi a que mais contribuiu para a dissimilaridade entre os plantios puros de AC para com os demais sistemas florestais estudados (Tabela 3.3). No entanto, na primavera, junto com Acarina, os demais grupos que mais contribuíram para a dissimilaridade foram Hymenoptera, Araneae, Collembola, Coleoptera, Riqueza e Diptera, ao passo que no outono, além do grupo Acarina, os demais foram Collembola, Hymenoptera, Thysanoptera, Coleoptera, Diptera e Heteroptera. A ordem Collembola passou a discriminar mais de 36% os plantios puros de AC dos demais sistemas florestais avaliados no outono, ao passo que na primavera a ordem Collembola discriminava menos de 7%, tendo Hymenoptera e Araneae maior importância na discriminação dos plantios puros de AC para com os demais sistemas, do que a ordem Collembola (Tabela 3.3). Essa mudança na estrutura da comunidade invertebrada no outono, sobretudo a enorme contribuição da ordem Collembola na dissimilaridade dos tratamentos se deve a maior umidade da serapilheira no outono, uma vez que esses invertebrados são muito correlacionados positivamente com o teor de água do substrato (Figura 3.4), o que favorece a sua reprodução e desenvolvimento (Choi et al., 2006; Gómez-Anaya et al., 2010).

Tabela 3.3. Análise de SIMPER para grupos de mesofauna e riqueza com suas respectivas contribuições para com a dissimilaridade entre dois agrupamentos: 1) plantios puros de *Acacia mangium*; e 2) plantios puros de *Eucalyptus grandis* e mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* em outubro de 2015 (primavera) e março de 2016 (outono).

Grupos	Primavera (Seca)		Outono (Chuvosa)	
	Contribuição	%	Contribuição	%
Acarina	30.64	54.17	32.54	51.95
Hymenoptera	5.89	10.42	1.92	3.06
Araneae	3.80	6.72	0.16	0.25
Collembola	3.70	6.52	22.87	36.51
Coleoptera	3.01	5.47	0.98	1.57
Riqueza	2.58	4.56	0.17	0.28
Diptera	1.89	3.33	0.97	1.55
Heteroptera	1.62	2.85	0.63	1.01
Thysanoptera	1.47	2.60	1.67	2.66
Isoptera	0.81	1.43	0.15	0.24
Simphyla	0.24	0.42	0.17	0.27
Lepidoptera	0.21	0.37	-	-
Protura	0.20	0.35	-	-
Pseudoscorpionida	0.19	0.34	-	-
Blattodea	0.17	0.30	0.05	0.09
Opilionida	0.05	0.10	-	-
Chilopoda	0.03	0.05	0.06	0.09
Isopoda	-	-	0.29	0.47

Figura 3.4. Análise de regressão entre umidade da serapilheira e abundância da ordem Collembola. n = 90 amostras.

Nas duas épocas de coleta foi constatada correlação positiva entre a mesofauna epiedáfica e o teor de N da serapilheira e correlações negativas entre mesofauna e o teor de Mn e a relação C/N da serapilheira. Os micronutrientes, exceto o Mn, se correlacionaram, na maioria das vezes positivamente com os atributos da mesofauna (Tabelas 3.4 e 3.5). Dessa forma, fica evidente a preferência dos grupos de mesofauna edáfica por material orgânico mais facilmente decomponível, e que possivelmente já sofreu algum ataque microbiano, o que reduz a sua relação C/N. Além disso, a correlação negativa do Mn com alguns grupos amostrados indica preferência da mesofauna epiedáfica para com material orgânico de melhor qualidade (Berg, 2014).

Por outro lado, estudos envolvendo minhocas em solos com grande quantidade de manganês demonstram que esse elemento inviabiliza os ovócitos, causando dessa forma redução na população de anelídeos sob tais condições (Maleri et al., 2007). Sendo assim, é possível que o manganês exerça também algum efeito tóxico na comunidade de mesofauna epiedáfica, uma vez que foi observada correlação negativa entre manganês e a maioria de grupos amostrados tanto na primavera, como no outono (Tabelas 3.4 e 3.5).

Foi observado um número muito maior de correlações no outono (período de maior chuva) do que na primavera (período de maior seca). Assim, a umidade mesmo não se correlacionando com nenhum grupo de fauna em cada período de amostragem separadamente (Tabelas 3.4 e 3.5) parece ter um papel fundamental no funcionamento do ecossistema, permitindo até mesmo um maior número de correlações no outono, quando foi amostrada maior densidade de fauna (Tabela 3.2). As análises de regressão com todas as amostras sugerem isso, uma vez que, tanto a riqueza de grupos amostrados, como a abundância total de fauna apresentaram valores mais elevados em amostras com maior teor de água (Figuras 3.2C e 3.2D).

Tabela 3.4. Correlações de Pearson significativas ($p < 0.05$) entre atributos químicos da serapilheira e grupos de mesofauna amostrados em outubro de 2015 (primavera). $n = 45$ amostras.

Grupos	N	Ca	S	Cu	Mn	Zn	C/N	P	C/P
Collembola	-	-	0.30	-	-	-	-	-	-
Hymenoptera	-	-	-	-	-	-	-	-0.33	-
Simphyla	-	-	0.33	-	-	-	-	-	-
Protura	-	-	-	-	-	-0.34	-	-	-
Araneae	0.46	-	-	-	-0.46	-	-0.44	-0.41	0.33
Isoptera	-	-	-	-	-0.30	-	-0.31	-	-
Blattodea	-	-	-	0.38	-	-	-	-	-
Total	0.30	-	-	0.02	-	-	-	-	0.32
Riqueza	0.34	0.40	0.39	-	-0.35	-	-0.30	-	-

O P se correlacionou negativamente com Hymenoptera e com Araneae e a relação C/P se correlacionou positivamente com Araneae e com o total de fauna amostrada na primavera (Tabela 3.4). Por outro lado, no outono a relação C/P se correlacionou negativamente com Acarina, Chilopoda e com a abundância total de mesofauna, enquanto que o P se correlacionou positivamente com estes mesmos atributos (Tabela 3.5). É de se esperar que a mesofauna se correlacione negativamente com a relação C/P do material orgânico e positivamente com o P, como foi constatado para alguns grupos e até mesmo para o total de fauna na segunda coleta (Tabela 3.5), tendo em vista a preferência da mesofauna por materiais de mais fácil decomposição (Swift et al., 1979).

Tabela 3.5. Correlações de Pearson significativas ($p < 0.05$) entre atributos químicos da serapilheira e grupos de mesofauna amostrados em março de 2016 (outono). $n = 45$ amostras.

Grupos	N	Ca	S	Cu	Mn	Zn	C/N	P	C/P	Mg	Fe
Acarina	0.62	-	-	0.53	-0.41	0.61	-0.55	0.36	-0.34	-	-
Collembola	0.45	0.33	-	0.32	-	0.30	-0.40	-	-	-	-
Hymenoptera	-	-	-	-	-	0.36	-0.31	-	-	-	0.31
Simphyla	-	0.32	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chilopoda	0.47	-	-	0.36	-	0.36	-0.33	0.44	-0.33	-	-
Araneae	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.40	-
Diptera	0.33	-	-	0.31	-	0.30	-0.34	-	-	-	-
Isoptera	0.40	-	-	0.35	-	0.35	-0.34	-	-	-	-
Isopoda	-	-	-	0.04	-	-	-	-	-	0.41	-
Thysanoptera	0.50	-	0.31	0.52	-0.37	0.42	-0.44	-	-	-	-
Total	0.61	0.30	-	0.50	-0.36	0.55	-0.55	0.32	-0.30	-	-
Riqueza	0.37	-	-	-	-	0.31	-0.31	-	-	-	-

No entanto, na primeira coleta esse fato não ocorreu possivelmente devido ao menor número de indivíduos amostrados e ao fato de terem sido amostradas maior quantidade de aranhas, que se correlacionaram positivamente com C/P e negativamente com P, e formigas que se correlacionaram negativamente com P. Esses organismos, que apresentam muita mobilidade, influenciaram na forte correlação positiva da abundância total com a relação C/P, diferente do que ocorreu na segunda coleta. Dessa forma é possível que outro fator, como o teor de nitrogênio, que também se correlacionou positivamente com aranhas, com a abundância total de fauna e com a riqueza de ordens (Tabela 3.5) tenha maior importância na distribuição dos invertebrados nas amostras de serapilheira do que o P e a relação C/P no período da primavera.

3.4 Conclusão

O estudo da mesofauna epiedáfica permite inferir sobre diversos processos que podem estar ocorrendo em sistemas florestais, tais como decomposição e ciclagem de nutrientes na serapilheira. Períodos de maior abundância de chuvas permitem o desenvolvimento de uma comunidade de invertebrados mais abundante

e mais complexa do que períodos de maior estiagem. Propriedades químicas da serapilheira modulam a comunidade de invertebrados edáficos em sistemas florestais, tanto que a abundância e diversidade de mesofauna se correlacionaram com a maioria dos elementos químicos que nutrem as plantas, sobretudo nos plantios puros de *Acacia mangium*. Sendo assim, é evidente que a leguminosa *Acacia mangium* seleciona grupos de invertebrados, porém estudos mais específicos se fazem necessários para o conhecimento das espécies que são exclusivas de *Acacia mangium*, para possíveis usos de tais espécies como bioindicadores. Diante disso, o consórcio de arbóreas com leguminosas deve ser estimulado, tendo em vista os diversos benefícios que as leguminosas inserem no ecossistema.

Referências

- Anderson, J.M., 2009. Why should we care about soil fauna? *Pesqui. Agropecuária Bras.* 44, 835–842. doi:10.1590/S0100-204X2009000800006
- Anderson, J.M., Ingram, J.S.I., 1993. *Tropical Soil Biology and Fertility*, 2nd ed. C.A.B. International, Wallingford.
- Aquino, A.M., Correia, M.E.F., Badejo, M.A., 2006. Amostragem da mesofauna edáfica utilizando funis de Berlese-Tulgren. *Embrapa Agrobiologia, Seropédica*.
- Bachega, L.R., Bouillet, J.P., Picollo, M.C., Saint-André, L., Bouvet, J.M., Nouvellon, Y., Gonçalves, J.L.M., Robin, A., Laclau, J.P., 2016. Decomposition of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* leaves and fine roots in tropical conditions did not meet the Home Field Advantage hypothesis. *For. Ecol. Manage.* 359, 33–43. doi:10.1016/j.foreco.2015.09.26
- Berg, B., 2014. Decomposition patterns for foliar litter - A theory for influencing factors. *Soil Biol. Biochem.* 78, 222–232. doi:10.1016/j.soilbio.2014.08.005
- Berg, B., Erhagen, B., Johansson, M.B., Nilsson, M., Stendahl, J., Trum, F., Vesterdal, L., 2015. Manganese in the litter fall-forest floor continuum of boreal and temperate pine and spruce forest ecosystems - A review. *For. Ecol. Manage.* 358, 248–260. doi:10.1016/j.foreco.2015.09.021

Bini, D., Santos, C.A. dos, Bouillet, J.P., Gonçalves, J.L. de M., Cardoso, E.J.B.N., 2013. *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in monoculture and intercropped plantations: Evolution of soil and litter microbial and chemical attributes during early stages of plant development. *Appl. Soil Ecol.* 63, 57–66. doi:10.1016/j.apsoil.2012.09.012

Bouillet, J.P., Laclau, J.P., Gonçalves, J.L. de M., Voigtlaender, M., Gava, J.L., Leite, F.P., Hakamada, R., Mareschal, L., Mabiala, A., Tardy, F., Levillain, J., Deleporte, P., Epron, D., Nouvellon, Y., 2013. *Eucalyptus* and *Acacia* tree growth over entire rotation in single- and mixed-species plantations across five sites in Brazil and Congo. *For. Ecol. Manage.* 301, 89–101. doi:10.1016/j.foreco.2012.09.019

Cardoso, E.J.B.N., Vasconcellos, R.L.F., Bini, D., Miyauchi, M.Y.H., Santos, C.A. dos, Alves, P.R.L., Paula, A.M. De, Nakatani, A.S., Pereira, J. de M., Nogueira, M.A., 2013. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? *Sci. Agric.* 70, 274–289. doi:10.1590/S0103-90162013000400009

Carmo, D.L., Silva, C.A., 2012. Quantification methods of carbon and organic matter in organic residues. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 36, 1211–1220. doi:10.1590/S0100-06832012000400015.

Carrillo, Y., Ball, B.A., Bradford, M.A., Jordan, C.F., Molina, M., 2011. Soil fauna alter the effects of litter composition on nitrogen cycling in a mineral soil. *Soil Biol. Biochem.* 43, 1440–1449. doi:10.1016/j.soilbio.2011.03.011

Choi, W. Il, Moorhead, D.L., Neher, D.A., Ryoo, M. Il, 2006. A modeling study of soil temperature and moisture effects on population dynamics of *Paronychiurus kimi* (Collembola: Onychiuridae). *Biol. Fertil. Soils* 43, 69–75. doi:10.1007/s00374-005-0062-5

Correia, M.E.F., Aquino, A.M., Aguiar-Menezes, E.L., 2008. Ecological aspects of terrestrial isopoda. *Embrapa Agrobiologia, Seropédica*.

- Da Rosa, M.G., Filho, O.K., Bartz, M.L.C., Mafra, Á.L., De Sousa, J.P.F.A., Baretta, D., 2015. Macrofauna edáfica e atributos físicos e químicos em sistemas de uso do solo no planalto catarinense. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 39, 1544–1553. doi:10.1590/01000683rbc20150033
- Gómez-Anaya, J.O., Palacios-Vargas, J.G., Castaño-Menezes, G., 2010. Abundance of springtails (Hexapoda: Collembola) and edaphic parameters from a deciduous dry forest. *Rev. Colomb. Entomol.* 36, 96–105.
- González-Muñoz, N., Linares, J.C., Castro-Díez, P., Sass-Klaassen, U., 2014. Predicting climate change impacts on native and invasive tree species using radial growth and twenty-first century climate scenarios. *Eur. J. For. Res.* 133, 1073–1086. doi:10.1007/s10342-014-0823-5
- Hassall, M., Rushton, S.P., 1982. The role of coprophagy in the feeding strategies of terrestrial isopods. *Oecologia* 53, 374–381. doi:10.1007/BF00389017
- Hatakka, A., 2001. Biodegradation of lignin, in: Hoffman, A., Steins, A. (Eds.), *Biopolymers, Lignin, Humic Sub-Stances and Coal*. Wiley-Blackwell, Michigan, pp. 129–180.
- Hendrix, P.F., 2000. Soil Fauna, in: Sunmer, E. (Ed.), *Handbook of Soil Science*. CRC Press, Boca Raton, p. 2148.
- Kahindi, J.H.P., Woome, P., George, T., de Souza Moreira, F.M., Karanja, N.K., Giller, K.E., 1997. Agricultural intensification, soil biodiversity and ecosystem function in the tropics: the role of nitrogen-fixing bacteria. *Appl. Soil Ecol.* 6, 55–76. doi:10.1016/S0929-1393(96)00151-5
- Kautz, G., Zimmer, M., Topp, W., 2002. Does *Porcellio scaber* (Isopoda: Oniscidea) gain from coprophagy? *Soil Biol. Biochem.* 34, 1253–1259. doi:10.1016/S0038-0717(02)00065-2
- Krisnawati, H., Kallio, M., Kanninen, M., 2011. *Acacia mangium* Willd. Ecology, silviculture and productivity. *Cent. Int. For. Res.* 15.
- Lavelle, P., 1997. Faunal activities and soil processes: adaptative strategies that determine ecosystem function., *Advances in Ecological Research*.

- Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, W., Roger, P., Ineson, P., Heal, O.W., Dhillon, S., 1997. Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *Eur. J. Soil Biol.* 33, 159–193. doi:35400007052344.0010
- le Maire, G., Nouvellon, Y., Christina, M., Ponzoni, F.J., Gonçalves, J.L.M., Bouillet, J.P., Laclau, J.P., 2013. Tree and stand light use efficiencies over a full rotation of single- and mixed-species *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* plantations. *For. Ecol. Manage.* 288, 31–42. doi:10.1016/j.foreco.2012.03.005
- Lugo, A.E., Erickson, H.E., 2017. Novelty and its ecological implications to dry forest functioning and conservation. *Forests* 8, 1–18. doi:10.3390/f8050161
- Magurran, A.E., 2004. Measuring biological diversity. Wiley-Blackwell, Oxford.
- Malavolta, E., Vitti, G.C., Oliveira, S.A., 1997. Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações. Associação Brasileira para pesquisa da Potassa e do Fosfato, Piracicaba.
- Maleri, R., Reinecke, S.A., Mesjasz-Przybylowicz, J., Reinecke, A.J., 2007. Growth and reproduction of earthworms in ultramafic soils. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 52, 363–370. doi:10.1007/s00244-005-0132-6
- Mendes, P.F., Vasconcellos, R.L.F., de Paula, A.M., Cardoso, E.J.B.N., 2010. Evaluating the Potential of Forest Species Under “Microbial Management” for the Restoration of Degraded Mining Areas. *Water Air Soil Pollut.* 208, 79–89. doi:10.1007/s11270-009-0150-5
- Menta, C., Conti, F.D., Pinto, S., Leoni, A., Lozano-Fondón, C., 2014. Monitoring soil restoration in an open-pit mine in northern Italy. *Appl. Soil Ecol.* 83, 22–29. doi:10.1016/j.apsoil.2013.07.013
- Mortimer, P.E., Le Roux, M.R., Pérez-Fernández, M.A., Benedito, V.A., Kleinert, A., Xu, J., Valentine, A.J., 2013. The dual symbiosis between arbuscular mycorrhiza and nitrogen fixing bacteria benefits the growth and nutrition of the woody invasive legume *Acacia cyclops* under nutrient limiting conditions. *Plant Soil* 366, 229–241. doi:10.1007/s11104-012-1421-2

- Novriyanti, E., Watanabe, M., Makoto, K., Takeda, T., Hashidoko, Y., Koike, T., 2012. Photosynthetic nitrogen and water use efficiency of acacia and eucalypt seedlings as afforestation species. *Photosynthetica* 50, 273–281. doi:10.1007/s11099-012-0033-7
- Png, G.K., Turner, B.L., Albornoz, F.E., Hayes, P.E., Lambers, H., Lalibert, E., 2017. Greater root phosphatase activity in nitrogen-fixing rhizobial but not actinorhizal plants with declining phosphorous availability. *Plant Soil* 366, 229–241. doi:10.1111/1365-2745.12758
- Rodrigues, N.E.L., Mendoca Jr, M.D.S., Rosado, J.L.O., Loeck, A.E., 2010. Soil spiders in differing environments: Eucalyptus plantations and grasslands in the Pampa biome, southern Brazil. *Rev. Colomb. Entomol.* 36, 277–284.
- Rodríguez, J., Lorenzo, P., González, L., 2017. Different growth strategies to invade undisturbed plant communities by *Acacia dealbata* Link. *For. Ecol. Manage.* 399, 47–53. doi:10.1016/j.foreco.2017.05.007
- Santos, E.F., Kondo Santini, J.M., Paixão, A.P., Júnior, E.F., Lavres, J., Campos, M., Reis, A.R. dos, 2017. Physiological highlights of manganese toxicity symptoms in soybean plants: Mn toxicity responses. *Plant Physiol. Biochem.* 113, 6–19. doi:10.1016/j.plaphy.2017.01.022
- Santos, F.M., Chaer, G.M., Diniz, A.R., Balieiro, F. de C., 2017. Nutrient cycling over five years of mixed-species plantations of Eucalyptus and Acacia on a sandy tropical soil. *For. Ecol. Manage.* 384, 110–121. doi:10.1016/j.foreco.2016.10.041
- Steffen, K.T., Hatakka, A., Hofrichter, M., 2002. Degradation of Humic Acids by the Litter-Decomposing Basidiomycete *Collybia dryophila* 68, 3442–3448. doi:10.1128/AEM.68.7.3442
- Swift, M.J., Heal, O.W., Anderson, J.M., 1979. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*, 1st ed. University of California Press, Barkley.
- Tavares, S.R.L., Franco, A.A., Silva, M.R., 2016. Production of seedlings *Acacia mangium* Wild in different substrates with rhizobium and mycorrhiza. *Holos* 4, 56–66. doi:10.15628/holos.2016.3931

- Tchichelle, S. V, Epron, D., Mialoudama, F., Koutika, L.S., Harmand, J.M., Bouillet, J.P., Mareschal, L., 2017. Differences in nitrogen cycling and soil mineralisation between a eucalypt plantation and a mixed eucalypt and *Acacia mangium* plantation on a sandy tropical soil. *South. For.* 79, 1–8. doi:10.2989/20702620.2016.1221702
- Temesgen, D., Gonzalo, J., Turrion, M., 2016. Effects of short-rotation eucalyptus plantations on soil quality attributes in highly acidic soils of the central highlands of Ethiopia. *Soil Use Manag.* 32, 210–219. doi:10.1111/sum.12257
- Voigtlaender, M., Laclau, J.P., de Gonçalves, J.L.M., de Piccolo, M.C., Moreira, M.Z., Nouvellon, Y., Ranger, J., Bouillet, J.P., 2012. Introducing *Acacia mangium* trees in *Eucalyptus grandis* plantations: Consequences for soil organic matter stocks and nitrogen mineralization. *Plant Soil* 352, 99–111. doi:10.1007/s11104-011-0982-9
- Wu, T., Su, F., Han, H., Du, Y., Yu, C., Wan, S., 2014. Responses of soil microarthropods to warming and increased precipitation in a semiarid temperate steppe. *Appl. Soil Ecol.* 84, 200–207. doi:10.1016/j.apsoil.2014.07.003
- Yeomans, J.C., Bremner, J.M., 1988. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 19, 1467–1476. doi:10.1080/00103628809368027
- Yunfeng, J., Xiuqin, Y.I.N., Fubin, W., 2015. Composition and Spatial Distribution of Soil Mesofauna Along an Elevation Gradient on the North Slope of the Changbai Mountains , China. *Pedosph. An Int. J.* 25, 811–824. doi:10.1016/S1002-0160(15)30062-X
- Zhiqun, T., Jian, Z., Junli, Y., Chunzi, W., Danju, Z., 2017. Chemosphere Allelopathic effects of volatile organic compounds from *Eucalyptus grandis* rhizosphere soil on *Eisenia fetida* assessed using avoidance bioassays , enzyme activity , and comet assays. *Chemosphere* 173, 307–317. doi:10.1016/j.chemosphere.2017.01.004

4 MESOFAUNA E QUALIDADE DO SOLO EM PLANTIOS PUROS E MISTOS DE *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium*

Resumo

O cultivo de leguminosas com espécies arbóreas não fixadoras de nitrogênio promove melhoria nas propriedades químicas do solo, porém o efeito desses cultivos nos invertebrados que habitam o solo ainda é desconhecido. Portanto, este trabalho teve por objetivo avaliar a mesofauna edáfica e suas relações com atributos químicos e microbiológicos do solo a fim de se estabelecer possíveis correlações entre essas variáveis e criar indicadores de qualidade do solo para plantios puros e mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium*. Para tanto se avaliou nesses plantios a abundância, diversidade, riqueza, densidade de mesofauna, carbono microbiano, respiração basal do solo, atividade da enzima desidrogenase, qCO_2 e $Cmic/Ct$ em duas ocasiões: outubro de 2015 (seca) e março de 2016 (chuvosa), enquanto que as análises químicas do solo foram feitas em outubro. Foi realizada análise de variância com teste de Tukey a 5% para verificar diferenças entre tratamentos, enquanto que análises multivariadas e regressões foram realizadas para a construção de indicadores de qualidade do solo e estabelecimento de relações entre fauna edáfica e atributos químicos e microbiológicos do solo. Poucas diferenças foram constatadas entre os tratamentos, porém entre épocas foi constatada maior atividade microbiana e qualidade do solo na época chuvosa do que na seca. Na estação seca, foi possível obter forte correlação entre mesofauna e microbiologia do solo, evidenciando que nessa estação as relações mutualísticas mesofauna-microrganismos sejam mais intensas, porém estudos são necessários para verificar quais os principais grupos microbianos associados à comunidade invertebrada edáfica e como tais relações afetam a qualidade do solo.

Palavras-chave: Invertebrados; Microrganismos; Mutualismo; Sazonalidade

Abstract

Intercropping *Eucalyptus* with leguminous nitrogen-fixing tree species improves soil chemical properties, but the effect of these mixed crops on the soil invertebrates is still unknown. Thus, we aimed at evaluating soil mesofauna and establishing relations between them and soil chemical and microbiological attributes to create a general indicator of soil quality in *Acacia mangium* (AC), *Eucalyptus grandis* (EU) and mixed plantations of *Acacia* and *Eucalyptus* (M). Therefore, we evaluated abundance, diversity and richness of soil mesofauna, microbial carbon, soil respiration, dehydrogenase activity, qCO_2 and $Cmic / Ct$ in two occasions: October 2015 (dry season) and March 2016 (rainy season), while soil chemical analyses were performed in October. The mean values for each attribute were compared between forest systems; regressions and multivariate analyses were performed to build up the general indicator of soil quality and to establish correlations between mesofauna, chemical and microbiological attributes. Few differences were

observed among the treatments, but we observed higher microbial activity and soil quality in the rainy season relative to the dry season. In the dry season, we verified positive correlation between mesofauna and soil microbiology, evidencing that in dry periods prevail mutualistic interaction between mesofauna and microorganisms, but more studies are necessary to verify the main microbial groups associated with the soil mesofauna and how such relations affect soil quality.

Keywords: Soil invertebrates; Microorganisms; Mutualism; Seasonality

4.1 Introdução

O cultivo de *Eucalyptus* é favorecido por climas tropicais, e a sua madeira pode ser utilizada como fonte de carvão vegetal para geração de energia, produção de celulose, construção civil, móveis e pisos. Porém, o cultivo intensivo leva à depleção de N e de outros nutrientes no ecossistema, uma vez que não é uma cultura com potencial para fixação de N. Isso, em longo prazo, pode acarretar numa diminuição de produção da cultura e deficiência nos teores de nutrientes minerais no solo (Goncalves et al., 2008).

Uma alternativa para mitigar a deficiência nutricional ao solo em decorrência das monoculturas de *Eucalyptus* é o plantio combinado com a leguminosa *Acacia*. Sabe-se que *Acacia mangium* se associa a rizóbios, e tal associação é capaz de reduzir o N atmosférico a NH_4^+ , prontamente disponível para as plantas. Devido principalmente à senescência das folhas e a morte do vegetal, o N retorna ao solo, podendo ser utilizado por outras plantas, microrganismos, ou até mesmo ser lixiviado para outras áreas ou ainda volatilizado em condições anaeróbicas (Bini et al., 2013; Dias et al., 2006). O acúmulo de N no consórcio entre *Eucalyptus* e *Acacia* e nos plantios puros de *Acacia mangium* favorece a diversidade e a abundância de microrganismos no solo associados à fixação biológica de nitrogênio, sobretudo aquelas pertencentes ao filo das Proteobactérias (De Araujo Pereira et al., 2017), porém o efeito desses sistemas na comunidade da mesofauna edáfica ainda é desconhecido.

A mesofauna edáfica compreende pequenos invertebrados que possuem de 0.2 a 2 mm de diâmetro corpóreo, e vivem permanentemente ou passam ao menos uma fase do seu desenvolvimento no solo. Ácaros e colêmbolos, além de pequenos

insetos, pertencentes às mais diversas ordens de invertebrados terrestres e são os principais representantes dessa guilda (Lavelle, 1997).

Esses organismos desenvolveram um tipo de digestão denominada “rúmen externo”, no qual a matéria orgânica do solo, passa pelo trato gastrointestinal do invertebrado, onde é fragmentada e umedecida para que posteriormente seja excretada no ecossistema. Dessa forma microrganismos quimiorganotróficos presentes no ecossistema solo passam a decompor a matéria orgânica e liberar nutrientes para a solução do solo e para o próprio aproveitamento da fauna edáfica, que passa a ingerir várias vezes o material previamente excretado. Esse processo de digestão contribui muito para a ciclagem de nutrientes, agregação do solo e ainda pode selecionar maior abundância de microrganismos nesses pontos de intensa atividade da mesofauna do que no solo adjacente, tanto que o conjunto de tais pontos localizados principalmente até os 5 cm de profundidade no solo é denominado “detritosfera” (Beare et al., 1995; Hendrix, 2000; Lavelle et al., 2006).

A capacidade que a fauna edáfica possui de atuar nas propriedades, físicas, químicas e biológicas do solo, sensibilidade a clima e a cobertura vegetal e a facilidade com que é coletada e identificada, faz com que tenha grande potencial para ser utilizada como bioindicadora de qualidade do solo (Barbercheck et al., 2009; Baretta et al., 2010; Bedano et al., 2016; Cardoso et al., 2013; Doran e Zeiss, 2000).

Foi constatada maior diversidade de macrofauna edáfica em reflorestamento de *Eucalyptus grandis* quando comparado a sistemas de pastagem, integração-lavoura-pecuária e plantio direto (Da Rosa et al., 2015), porém não se conhece o efeito de plantios puros, nem consorciados com *Acacia mangium* na comunidade de invertebrados menores, como aqueles pertencentes à mesofauna edáfica. No entanto, devido a maior atividade microbiana relatada em plantios mistos após os vinte meses de idade (Bini et al., 2013), e levando em consideração o elevado sinergismo existente entre microrganismos e mesofauna edáfica, acredita-se que haja maior abundância e diversidade de mesofauna em plantios mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* do que nos sistemas puros de *Eucalyptus grandis*.

Diante disso, o presente estudo tem como objetivo avaliar a densidade e diversidade da mesofauna do solo, verificar relações da mesofauna edáfica com características químicas e microbiológicas do solo em plantios puros e mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* e criar um indicador geral de qualidade do solo para os plantios florestais estudados, baseado nos atributos químicos, microbiológicos e na mesofauna edáfica.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Caracterização das áreas de estudo e delineamento experimental

As amostras de solo foram provenientes da Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (EECFI), estado de São Paulo (23°02'01"S e 48° 97'30"W). A região possui clima mesotérmico úmido (Cwa) segundo a classificação de Koeppen e altitude média de 830 metros. O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico de textura arenosa (FAO) com cerca de 85% de areia e 12% de argila (Apêndice 4).

As áreas de estudo foram cultivadas de 1940 até 1998 com *E. saligna* mantido como matagal sem aplicação de fertilizantes. Após o corte, foi estabelecido um plantio de *E. grandis* com fertilização de 300 kg ha⁻¹ NPK 10:20:10 em 2002, para que em 2003 fosse plantada a primeira rotação de plantios puros e mistos de *E. grandis* e *A. mangium* com primeiro corte em 2009 (Bini et al., 2013).

Para o presente estudo foram avaliados três tratamentos de uma segunda rotação desses plantios: Plantio puro de *E. grandis* -100E:0A (EU), plantio puro de *A. mangium* - 0E:100A (AC) e plantio misto de *E. grandis* e *A. mangium* - 50E:50A (M) (Apêndice 1). O delineamento experimental consistiu de três parcelas para cada tratamento de 30 m x 30 m, dispostas em blocos ao acaso.

4.2.2 Amostragem de solo para análises da mesofauna edáfica

As coletas de fauna edáfica se deram em duas datas: 21 de outubro de 2015 (Primavera) e 31 de março de 2016 (Outono) (Figura 4.1). É possível observar que

nos quatro meses que antecederam a primeira coleta (outubro de 2015) houve uma menor precipitação do que nos quatro meses que antecederam a segunda coleta (março de 2016) (Figura 4.1A), da mesma forma que nos dias que antecederam a primeira coleta também houve menor volume de chuva do que naqueles que antecederam a segunda coleta (Figura 4.1B e 4.1C). As temperaturas pouco variaram, porém foram ligeiramente menores nos meses de junho e julho do que nos demais meses (Figura 4.1A). Dessa forma é possível caracterizar um período de estiagem (Junho - Outubro), e outro de abundância de chuvas (Novembro - Março).

Figura 4.1- Temperatura média e precipitação mensal (A), temperatura média e precipitação diária no mês de outubro de 2015 (B) e temperatura média e precipitação diária no mês de março de 2016 (C) na estação experimental de Itatinga – SP.

Para cada parcela foram retiradas cinco amostras de solo em um grid de amostragem, desconsiderando as bordas das parcelas com auxílio de um gabarito de 25 cm x 25 cm x 5 cm de profundidade (adaptado de Anderson e Ingram, 1993) (Apêndice 2 e Apêndice 3) Tais amostras foram levadas a baterias extratoras de Berlese (adaptadas de Aquino et al., 2006), montadas em casa de vegetação, onde permaneceram por 7 dias para a extração da mesofauna edáfica (Apêndice 3). Posteriormente, os invertebrados foram contados e identificados em nível de ordem.

4.2.3 Cálculo de diversidade, riqueza e densidade da mesofauna edáfica

Todos os dados de abundância de fauna foram extrapolados para número de indivíduos m^{-2} , com base na área do gabarito de 25 cm x 25 cm, constituindo assim a densidade de invertebrados.

Para o cálculo da diversidade foi utilizada a riqueza (número total e médio de grupos por sistema e número médio de grupos por amostra) e o Índice de Simpson ($Is=1-D$), sendo D a dominância expressa por $\sum pi^2$, onde pi representa a abundância relativa de cada grupo taxonômico amostrado. Quanto mais próximo o resultado de 1, mais diverso o sistema, pois menor a dominância (Magurran, 2004).

4.2.4 Amostragem de solo para análises físico-químicas do solo

Em um raio de um metro das amostras para a mesofauna, foram retiradas quatro subamostras para compor uma amostra para análises físico-químicas do solo (Apêndice 2). Essas amostras foram peneiradas em malha de 2 mm e homogeneizadas para posterior determinação dos seguintes atributos, conforme compilado pela Embrapa, 2011: umidade gravimétrica, pH em $CaCl_2$ e em H_2O , Fósforo (P) (extração com Mehlich 1), Potássio (K) e Sódio (Na) (Extração com HCl diluído), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Alumínio (Al) (extração com KCl 1 N), acidez potencial (H+Al) (extração com Acetato de Cálcio), Carbono orgânico total (Ct) pelo método da oxidação da matéria orgânica via úmida e Nitrogênio total (Nt) por destilação. A partir desses valores, foi calculada a Capacidade de troca catiônica (CTC), saturação de bases (V%) e Soma de bases (SB).

Tendo em vista o curto intervalo de tempo entre as duas datas de coleta, e que propriedades químicas do solo pouco se alteram num período de cinco meses, as avaliações químicas do solo foram determinadas somente em outubro de 2015.

4.2.5 Amostragem de solo para análises microbiológicas do solo

Simultaneamente a amostragem para as avaliações físico-químicas do solo, porém nas duas datas de coleta, foram retiradas quatro subamostras para compor uma amostra composta para avaliação do carbono da biomassa microbiana (Vance et al., 1987), respiração basal do solo (Allef e Nannipieri, 1995) e atividade da enzima desidrogenase (Casida et al., 1964), afim de se verificar a atividade microbiana no solo.

Foi calculada a relação entre C microbiano e C total (C_{mic}/C_t – quociente microbiano), e a partir da razão entre a respiração edáfica e o carbono da biomassa microbiana, obteve-se o quociente metabólico (qCO_2). Esses dois parâmetros auxiliam a melhor compreensão da dinâmica da matéria orgânica do solo (Santos et al., 2011).

4.2.6 Análises estatísticas

Foi realizada uma análise de variância (ANOVA), complementada com o teste de Tukey a 5%, para comparar as médias dos atributos físico – químicos, microbiológicos e de mesofauna edáfica entre os sistemas florestais avaliados em cada data de coleta para estabelecer diferenças entre tratamentos, e entre datas de coletas, para verificar possíveis alterações nos atributos mensurados devido a sazonalidade. Previamente os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, e quando não atingiam a normalidade eram transformados pela equação $\log(x+1)$. Caso após a transformação ainda não fosse alcançada a normalidade, fez-se uso da estatística não paramétrica de Kruskal-Wallis.

Para a obtenção de correlações significativas entre a mesofauna edáfica e atributos físico-químicos e microbiológicos do solo foi realizada uma análise de

redundância (RDA) com teste de Monte Carlo ($p < 0.05$) para cada data de coleta. Também foi realizada análise de SIMPER para evidenciar quais os grupos de invertebrados que apresentaram maior capacidade de discriminar as áreas de estudo (Rodrigues et al., 2010).

Adicionalmente, foram utilizadas regressões visando estabelecer correlações entre atributos químicos e biológicos (mesofauna e microbiologia) do solo.

4.2.7 Criação do indicador geral de qualidade do solo

A partir das variáveis microbiológicas, físico-químicas e da mesofauna edáfica foram gerados indicadores gerais de qualidade do solo (GISQ) para verificar qual o estado de conservação das áreas estudadas (modificado de Velasquez et al., 2007). Inicialmente, estes autores propuseram o GISQ relacionando atributos químicos, físicos, de macroestruturas do solo e de macrofauna. Porém, o presente trabalho aborda a mesofauna edáfica que pouco se relaciona com atributos físicos, e muito com microbiológicos do solo. Dessa forma, foi adicionado ao GISQ um conjunto de dados microbiológicos do solo, e como atributo físico, apenas a umidade foi mensurada, e incorporada ao conjunto de dados químicos, gerando então um conjunto de dados físico-químicos do solo. Assim para a criação do GISQ no presente estudo, foi utilizado conjunto de dados físico-químicos, microbiológicos e de mesofauna do solo.

Resumidamente, o indicador de qualidade foi calculado primeiro pela realização de uma análise de componentes principais (ACP) individualmente para os conjuntos de dados das variáveis de solo (fauna edáfica, atributos físico-químicos e microbiológicos do solo) para gerar subindicadores de qualidade do solo baseado em cada conjunto de dados do solo. Para tanto, por meio de transformação homotética, quando as variáveis se correlacionam positivamente com a qualidade do solo foi utilizada a equação: 1) ($[y = 0.1 + (\text{valor-mínimo})/(\text{máximo-mínimo}) \times 0.9]$); ao passo que para aquelas que se correlacionam negativamente com a qualidade do solo foi utilizada a equação: 2) ($[y = 1.1 - (0.1 + (\text{valor-mínimo})/(\text{máximo-mínimo}) \times 0.9)]$). Essas transformações foram utilizadas para dimensionar as variáveis em uma

escala que varie entre 0 a 1. As variáveis dominância, respiração do solo, quociente metabólico, acidez potencial, hidrogênio livre no solo, sódio e relação C/N foram selecionadas como variáveis que se relacionam inversamente com a qualidade do solo, enquanto que as demais variáveis foram categorizadas como àquelas que se relacionam diretamente com a qualidade do solo.

Posteriormente, esses valores foram multiplicados pela contribuição da explicação de cada variável nos dois primeiros eixos da ACP individualmente e então somados. Por meio de nova transformação homotética foram criados tais subindicadores. Estes conjuntos de subindicadores foram examinados por uma nova ACP, e de acordo com a contribuição de cada variável nos dois primeiros eixos multiplicados pela coinércia, dividido por 1000, e somados chegou-se a um valor, que novamente dimensionado por transformação homotética na escala de 0 a 1 gerou o indicador geral de qualidade do solo baseado na combinação de atributos físico-químicos, microbiológicos e de mesofauna edáfica. Dessa forma, foram obtidos valores entre 0,1 a 0,4 (considerados como representativos para baixa qualidade), 0,4 a 0,7 (qualidade média) e 0,7 a 1,0 (alta qualidade do solo) (Velasquez et al., 2007).

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Análises químicas do solo

Poucas diferenças entre os atributos químicos do solo foram constatadas entre os tratamentos quando as variáveis foram analisadas isoladamente. Apenas o plantio puro de *Acacia mangium* apresentou maior acidez potencial, e consequentemente maior CTC do que os demais sistemas florestais avaliados (Tabela 4.1).

Percebe-se que o solo em que os diferentes sistemas de uso foram implantados é oligotrófico, ou seja, apresenta quantidade muito baixa de nutrientes. Nesse tipo de solo, geralmente prevalecem as relações entre os microrganismos e a fauna para que haja um aporte de nutrientes necessários para o desenvolvimento das plantas e dos próprios organismos edáficos (Andreote et al., 2014; Ferris e

Tuomisto, 2015). Esse aspecto pode estar relacionado com a textura do solo, uma vez que o solo em que os sistemas florestais foram implantados apresenta mais de 80% de areia em sua composição (Apêndice 4), logo retém menos matéria orgânica e menos cátions do que um solo argiloso (Ellert e Bettany, 1995). Essa característica pode justificar a baixa quantidade de nutrientes que o solo apresentou.

Tabela 4.1- Atributos químicos de um Latossolo vermelho amarelo distrófico sob plantio puro de *Acacia mangium* (AC), *Eucalyptus grandis* (EU) e misto de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* (M).

Atributos do Solo		AC	M	EU
	pH (H ₂ O)	4,59a*	4,88a	4,81a
	pH (CaCl ₂)	3,88a	3,95a	3,93a
mmolc kg ⁻¹	Na	0,15a	0,14a	0,16a
	K	0,44a	0,44a	0,36a
	Al	7,45a	7,16a	7,62a
	H + Al	44,47a	37,72bc	33,51c
	Ca	3,40a	3,28a	3,13a
	Mg	3,74a	3,38a	2,62a
	SB	8,94a	7,24a	6,27a
	CTC	53,40a	44,96bc	39,78c
%	V	14,28a	15,96a	15,76
	C	15,49a	15,50a	14,62a
g kg ⁻¹	N	1,00a	1,03a	0,94a
	C/N	15,44a	15,14a	15,69a

* Letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre os sistemas florestais, enquanto que letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre as épocas de coleta pelo teste de Tukey a 5% de significância.

4.3.2 Análises microbiológicas e teor de umidade do solo

Para as variáveis microbiológicas, foi possível observar forte influencia da sazonalidade nos resultados obtidos, porém poucas diferenças entre os tratamentos foram constatadas. Apenas em outubro, na época que choveu menos, foi constatado maior quociente metabólico no plantio misto do que em *Acacia mangium*, e nesse período, a umidade do solo foi maior em *Acacia mangium* do que nos demais sistemas avaliados (Tabela 4.2).

O carbono microbiano foi maior em outubro, porém a atividade desses microrganismos foi menor nessa época, evidenciado pela menor respiração do solo e pelo menor quociente metabólico observado quando comparado com o mês de março. Durante esse período de seca, quando o teor de água estava mais baixo (Tabela 4.2), provavelmente a comunidade microbiana estava imobilizando nutrientes em sua biomassa, tendo em vista os elevados valores de carbono microbiano, e consequentemente a elevada relação carbono microbiano/carbono total do solo e os baixos valores de respiração do solo (Tabela 4.2).

Tabela 4.2- Atributos microbiológicos e umidade gravimétrica de um Latossolo vermelho amarelo distrófico sob plantio puro de *Acacia mangium* (AC), *Eucalyptus grandis* (EU) e misto de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* (M).

Variáveis	Outubro 2015 (Primavera)			Março 2016 (Outono)		
	AC	M	EU	AC	M	EU
C mic (mg kg ⁻¹)	380.63aA	354.32aA	380.89aA	235.02aB	210.80aB	270.52aB
C-CO ₂ (mg kg ⁻¹)	11.33aB	15.35aB	15.58aB	41.70aA	41.54aA	43.90aA
qCO ₂ (mg kg ⁻¹)	0.058bB	0.083aB	0.077abB	0.19aA	0.25aA	0.17aA
Desidrogenase (µg g ⁻¹)	21.79aB	21.84aA	21.70aB	22.63aA	22.45aA	22.69aA
C mic/ Ct (%)	2.55aA	2.33aA	2.63aA	1.51aB	1.36aB	1.85aB
Umidade do solo (%)	5.55aB	4.39bB	4.36bB	8.97aA	8.24aA	8.43aA

* Letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre os sistemas florestais, enquanto que letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre as épocas de coleta pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Por outro lado, é possível que em março predominem os processos de mineralização de nutrientes para a solução do solo, uma vez que foram encontrados baixos valores de carbono microbiano, e consequentemente menor relação carbono microbiano/carbono total do solo e elevados valores de respiração do solo e quociente metabólico (Tabela 4.2). Seria de se esperar maior respiração do solo onde há maior carbono da biomassa microbiana e vice e versa (Da Gama-Rodrigues et al., 2008), o que não é retratado no presente estudo, reforçando a tese de que em outubro predominem processos de imobilização de nutrientes na biomassa microbiana e em março predominem processos de mineralização de nutrientes para

a solução do solo. Dessa forma, as condições climáticas, principalmente a umidade, é um fator que governa a atividade microbiana no solo (Figura 4.2).

Figura 4.2. Análise de regressão entre umidade do solo e desidrogenase (A), respiração basal do solo (B) e quociente metabólico (C). n = 90 amostras.

4.3.3 Relações entre mesofauna do solo, atributos microbiológicos, atributos químicos, sistemas florestais e sazonalidade

Poucas diferenças foram constatadas entre os meses avaliados com relação a densidade e diversidade de fauna amostrada (Tabela 4.3). Apenas a densidade de ácaros e consequentemente a densidade total e a dominância foram maiores em Eucalyptus em outubro do que em março. Pseudoscorpionida e Blattodea foram constatados somente em outubro, enquanto que Lepidoptera, Gastropoda e Scorpionida foram encontrados em março. É válido ressaltar que o fato de determinada ordem ser encontrada em uma determinada ocasião ou sistema não significa que seja exclusiva de dado sistema ou data de coleta, mas se deve a heterogeneidade com que a fauna se distribui no solo (Yunfeng et al., 2015).

Nenhuma diferença foi constatada entre sistemas florestais, possivelmente devido a proximidade dos pontos de coleta dentro das parcelas, o que sugere alguma autocorrelação entre as amostras devido ao alto poder de dispersão da mesofauna no solo.

Tabela 4.3- Diversidade e densidade de fauna (indivíduos m⁻²) em plantios de *Acacia mangium* (AC), *Eucalyptus grandis* (EU) e em plantios mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* (M) em outubro de 2015 (primavera) e março de 2016 (outono).

Variáveis	Outubro 2015 (Primavera)			Março 2016 (Outono)		
	AC	M	EU	AC	M	EU
Ácaro	4452aA	4469aA	4313aA	3120aA	939aA	1275aB
Colêmbola	2291aA	1910aA	1783aA	1191aA	450aB	818aA
Diplura	105aA	12bA	4bA	11aA	0aA	0aA
Paupoda	110a	0aA	53aA	0a	4aA	0aA
Hymenoptera	96aB	464aA	1039aA	277aA	192aA	171aA
Simphyla	83aA	135aA	41aA	102aA	0bA	0bA
Protura	183aA	127aA	36aA	1aA	0aA	0aA
Coleoptera	100aA	99aA	63aA	80aA	71aA	82aA
Oligochaeta	4aA	1aA	2aA	5aA	12aA	6aA
Heteroptera	6aA	10aA	35aA	19aA	9aA	11aA
Nematoide	27aA	17aA	36aA	5aA	0aB	0aA
Chilopoda	18aA	9aA	3aA	16aA	6aA	4aA
Aranae	2aA	10aA	20aA	1aA	2aA	0aA
Diptera	4aA	23aA	5aA	6aA	12aA	4aA
Isoptera	4aA	77aA	2aA	68aA	4aA	4aA
Dermaptera	1aA	0aA	0aA	0aA	0aA	0aA
Diplopoda	1aA	0aA	26aA	0aA	0aA	0aA
Enchy	1aA	2aA	0aA	0aA	0aA	0aA
Isopoda	0aA	3aA	1aA	0aA	4aA	3aA
Thysanoptera	0aA	3aA	1aA	0aA	5aA	0aA
Pseudoscorpionida	0aA	0aA	1aA	0aA	0aA	0aA
Blattodea	0aA	0aA	1aA	0aA	0aA	0aA
Lepidoptera	0aA	0aA	0aA	0aA	1aA	0aA
Gastropoda	0aA	0aA	0aA	0aA	0aA	1aA
Scorpiones	0aA	0aA	0aA	0aA	0aA	1aA
Total	7490aA	7372aA	7467aA	4688aA	1713aB	2381aB
Riqueza amostra ⁻¹	8.3aA	7.2aA	6.9aA	6.9aA	6.1aA	5.6aA
D amostra ⁻¹	0.45aA	0.45aA	0.55aA	0.51aA	0.41aA	0.47aB
Simpson amostra ⁻¹	0.55aA	0.55aA	0.45aA	0.49aA	0.59aA	0.53aA
Riqueza sistema ⁻¹	14.3aA	14.7aA	12.3aA	12aA	12aA	9aA
D sistema ⁻¹	0.44aA	0.43aA	0.46aA	0.45aA	0.44aA	0.41aA
Simpson sistema ⁻¹	0.56aA	0.57aA	0.54aA	0.55aA	0.56aA	0.59aA
Riqueza total	18	17	17	15	15	12
D total	0.45	0.44	0.41	0.47	0.38	0.41
Simpson total	0.55	0.56	0.59	0.53	0.62	0.59

* Letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre os sistemas florestais, enquanto que letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre as épocas de coleta pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Além disso, em outubro foi constatado maior densidade de mesofauna no solo, enquanto que em março, foi observado maior densidade na serapilheira (Figura 4.3). Esses dados sugerem preferência da mesofauna pelo solo durante a estação seca (outubro), e pela serapilheira na estação chuvosa (março).

Figura 4.3- Densidade média de mesofauna no solo e na serapilheira. Letras diferentes indicam diferenças entre solo e serapilheira pelo teste de Tukey a 5% de significância.

A análise de redundância foi significativa para a explicação do primeiro e dos demais eixos formados (teste de monte Carlo $p < 0.05$) para as duas datas de coleta. Na primavera as variáveis químicas significativas pelo teste de monte Carlo ($p < 0.05$) foram Na e umidade, ao passo que no outono foram pH, Ca e umidade. Foi constatada correlação positiva entre a espécie de Collembola *Folsonia cândida* e o pH do solo, uma vez que essa espécie tem preferência alimentar por fungos ectomicorrizicos, que preferem condições de pH mais elevado (Krivtsov et al., 2003). Dessa forma, é possível que esse mesmo processo possa estar ocorrendo no presente estudo potencializado pelo maior teor de água do solo, sobretudo no outono.

A soma dos dois primeiros eixos das RDA explicou mais de 19% da variabilidade dos dados (Figura 4.4), ao passo que a relação entre os atributos biológicos (mesofauna e microbiológicos) e os atributos químicos mensurados no solo explicaram mais de 78% da variabilidade dos dados, indicando que os atributos químicos do solo determinam a composição da comunidade microbiana e da mesofauna do solo. É possível notar alguma separação entre as amostras provenientes de plantios puros de *Eucalyptus grandis* e de *Acacia mangium* (Figura 4.4). Nas duas datas de coletas foi possível observar correlações positivas entre as amostras de *Acacia mangium* com a maioria dos elementos químicos mensurados no solo e com a riqueza e abundância de diversas ordens de mesofauna amostradas. Por outro lado, os atributos microbiológicos mensurados estiveram mais correlacionados com as amostras de plantios puros de *Eucalyptus grandis* e com aquelas dos plantios mistos.

Tanto em outubro, como em março, foi possível constatar correlações positivas entre carbono microbiano, qCO_2 e CO_2 com a relação C/N do solo. Assim, é provável que exista maior emissão de CO_2 em solos com maior relação C/N, do que naqueles em que essa relação é menor. Além disso, é importante salientar que a biomassa microbiana é um dos componentes da fração ativa da matéria orgânica do solo e tem grande importância na decomposição dos resíduos orgânicos, ciclagem de nutrientes e fluxo de energia dentro do solo, uma vez que atua na imobilização e mineralização de nutrientes, exercendo forte influência na transformação da matéria orgânica e na estocagem do carbono e nutrientes no solo em um curto período de tempo (Moreira e Siqueira, 2002).

A atividade da enzima desidrogenase nas duas datas de coleta foi correlacionada positivamente com o teor de umidade do solo. Tal correlação já foi observada e atribuída ao acentuado metabolismo microbiano sob tais condições, uma vez que a desidrogenase é a principal responsável pelos processos de oxirredução na cadeia transportadora de elétrons (Nannipieri et al., 1990). Além disso, a atividade da desidrogenase parece estar condicionada à quantidade de matéria orgânica decomponível e intimamente relacionada à biomassa quando fontes externas de carbono são adicionadas ao solo (Cerri et al., 1990; Tabatai, 1994).

Figura 4.4- Análise de redundância (RDA). Vetores roxos correspondem a variáveis respostas (atributos biológicos), enquanto que vetores azuis correspondem a variáveis explicativas (atributos físico - químicos) do solo.

As principais variáveis biológicas que mais contribuíram para a dissimilaridade entre as amostras de EU e AC na primavera e no outono foram: Acarina, Collembola, Carbono microbiano e Hymenoptera. É importante salientar que o grupo Collembola, que na primavera era o segundo responsável pela dissimilaridade na primavera, no outono é apenas o terceiro, enquanto que o carbono microbiano, que na primavera era o terceiro, no outono passou a ser a segunda variável mais responsável pela dissimilaridade das amostras de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* (Tabela 4.3).

Sabe-se que Collembola e o carbono da biomassa microbiana são muito correlacionados com o teor de água do solo (Choi et al., 2006; Gómez-Anaya et al., 2010; Xu e Yuan, 2017), no entanto, o presente estudo revela que sob menor teor de água no solo, a ordem Collembola é mais importante na dissimilaridade das amostras, porém sob maior teor de água, o carbono microbiano é mais importante na dissimilaridade das amostras do que a ordem Collembola. Esses resultados

sugerem que o carbono microbiano é mais sensível ao teor de água no solo do que a ordem Collembola.

Tabela 4.3- Análise de SIMPER para grupos de mesofauna e riqueza com suas respectivas contribuições para com a dissimilaridade entre dois agrupamentos: 1) plantios puros de *Eucalyptus grandis*; e 2) plantios puros de *Acacia mangium* em outubro de 2015 (primavera) e março de 2016 (outono).

Fatores	Outubro (Primavera)		Março (Outono)	
	Contribuição	%	Contribuição	%
Acarina	15.11	42.79	13.69	43.26
Collembola	7.43	21.04	5.206	16.44
C mic	5.88	16.65	7.781	24.58
Hymenoptera	3.43	9.71	1.825	5.77
Protura	0.73	2.07	-	-
Outros	0.49	1.4	0.58	1.83
Simphyla	0.44	1.24	0.58	1.82
Paupoda	0.43	1.23	-	-
C-CO2	0.37	1.05	1.06	3.35
Coleoptera	0.35	1.00	0.48	1.52
Diplura	0.35	0.97	-	-
Riqueza	0.24	0.68	0.14	0.44
Desidrogenase	0.03	0.1	0.04	0.14
Simpson	0.01	0.04	0.01	0.04
Dominância	0.01	0.03	0.01	0.05
qCO2	0.0008	0.00	0.007	0.02
Heteroptera	-	-	0.10	0.32
Chilopoda	-	-	0.09	0.28
Diptera	-	-	0.05	0.14

4.3.4 Indicador Geral de Qualidade do Solo

As análises de componentes principais para as variáveis de fauna, atributos microbiológicos e atributos químicos do solo explicaram mais de 50% da variabilidade nos dois primeiros eixos, porém houve uma grande sobreposição de amostras, sobretudo para os atributos de fauna e para os microbiológicos, que são os atributos cuja variabilidade é maior, quando comparado aos atributos químicos. No entanto, para os atributos químicos as correlações positivas com os plantios de

Acacia mangium são mais evidentes, indicando que essa leguminosa, melhora as propriedades químicas do solo (Figura 4.5).

Figura 4.5- Análises de Componentes principais para atributos de fauna do solo (A), químicos (B), Microbiológicos (C) e para todas as variáveis distribuídas em três classes de agrupamentos (D) em outubro de 2015 (primavera) e em março de 2016 (outono) em *Eucalyptus grandis* (EU), *Acacia mangium* (AC) e plantios mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* (M).

Em outubro, também é evidente que os sub-indicadores de qualidade do solo “microbiologia e mesofauna” são forte e positivamente correlacionados, porém em março, esse mesmo conjunto de indicadores é negativamente correlacionado (Figura 4.5 D). Dessa forma, esses resultados sugerem que no período de maior estiagem as relações mutualísticas entre a mesofauna e os microrganismos são mais acentuadas.

Assim, é possível que na estação de maior estiagem, quando há uma maior escassez de nutrientes disponíveis para os organismos edáficos, os processos de fragmentação da matéria orgânica do solo, efetuados, sobretudo pela mesofauna edáfica ocorram em uma intensidade maior, permitindo com que exista o ataque microbiano, e conseqüentemente liberação de nutrientes e ácidos orgânicos para a solução do solo, porém rapidamente imobilizados na biomassa microbiana (C_{mic}), que foi maior no período de seca (outubro) do que no período chuvoso (março) (Tabela 4.2). Simultaneamente, a mesofauna edáfica pode reingerir esse material que sofreu algum ataque prévio por microrganismos e assim utiliza-los para o seu desenvolvimento e reprodução (Seastedt, 1984; Swift et al., 1979).

Nesse sentido, é provável que ocorra uma perfeita simbiose entre microrganismos e a mesofauna edáfica. Se por um lado, os microrganismos estão imobilizando nutrientes do solo em períodos de escassez, por outro lado, parte desses nutrientes podem ser disponibilizados para a manutenção da mesofauna no sistema, principalmente em época de menor abundância de chuvas, onde parece haver maior sinergismo entre a mesofauna e a atividade microbiana (Figura 4.5 D).

Poucas diferenças foram constatadas entre os subindicadores de qualidade do solo (Figura 4.6). É notável maior qualidade físico-química do solo nos plantios de *Acacia mangium* e uma maior qualidade para a mesofauna do solo em *Eucalyptus grandis*, principalmente devido a valores menores para a dominância, e conseqüentemente maiores valores para o índice de Simpson e para a riqueza de grupos observada nas amostras provenientes desse tratamento.

Figura 4.6- Subindicadores de qualidade do solo baseado em atributos microbiológicos, físico-químicos e de mesofauna em plantios puros e mistos de *Acacia mangium* e *Eucalyptus grandis* em outubro de 2015 (primavera) e março de 2016 (outono).

Foi constatado na primavera que os plantios mistos e de *Eucalyptus grandis* apresentaram baixa qualidade do solo, enquanto que os plantios de *Acacia mangium* apresentaram média qualidade do solo. Entretanto, no outono todos os plantios tiveram grande aumento para com os valores de qualidade do solo. Nesta estação, os plantios mistos e de *Eucalyptus* apresentaram alta qualidade, ao passo que *Acacia mangium* permaneceu com qualidade média (Tabela 4.5).

Tabela 4.5- Indicador Geral de Qualidade do Solo baseado na compilação de atributos químicos, microbiológicos e de mesofauna do solo em plantios puros de *Acacia mangium* e *Eucalyptus grandis* e em plantios mistos das referidas espécies em outubro de 2015.

Tratamentos	Outubro (Primavera)		Março (Outono)	
	Indicador	Classificação	Indicador	Classificação
<i>Acacia mangium</i>	0.48	Média	0.62	Média
Plantios mistos	0.43	Média	0.76	Alta
<i>Eucalyptus grandis</i>	0.32	Baixa	0.79	Alta

Inicialmente Velasquez et al. (2007), propuseram a criação de indicadores baseados em atributos químicos, físicos, de estrutura de agregados e de macrofauna edáfica, porém por meio do presente estudo buscou-se utilizar atributos físico-químicos (umidade e atributos químicos do solo), microbiológicos (desidrogenase, respiração basal do solo, carbono microbiano, Cmic/C e quociente metabólico) e de mesofauna (ordens de mesofauna, riqueza, dominância e índice de diversidade de Simpson). Dessa forma, a grande discrepância entre os valores obtidos em março e em outubro se deve ao fato de que as variáveis avaliadas nesse trabalho são muito mais sensíveis a mudanças climáticas do que aquelas apresentadas por Velasquez et al. (2007).

É possível que a menor variação de qualidade do solo observada para *Acacia mangium* entre as datas de coleta se deva a maior produção de tanino nesses plantios, o que pode tornar a decomposição mais lenta (Bachega et al., 2016) e influenciar os atributos microbiológicos e a mesofauna, promovendo então certa redução no indicador geral de qualidade do solo em AC quando comparado a M e EU, como observado no outono (Tabela 4.5).

4.4 Conclusão

Poucas diferenças foram constatadas entre os diferentes sistemas florestais avaliados, porém os atributos microbiológicos mensurados nesse trabalho são mais sensíveis a mudanças nas condições climáticas do que a mesofauna do solo. Diante disso, o teor de água no solo é o principal fator que governa a atividade microbiana

no solo. Pelo fato da microbiologia e da mesofauna edáfica serem atributos extremamente variáveis, houve grande variação entre as datas de coletas com relação à qualidade do solo dos sistemas florestais avaliados. Dessa forma, talvez seja mais adequado em trabalhos futuros repetir as coletas sob as mesmas condições climáticas para efeito de comparação de indicadores entre sistemas florestais.

Existe clara preferência da mesofauna do solo pela estação seca em detrimento da estação chuvosa, uma vez que nessa última, a maioria dos invertebrados se concentra na serapilheira, pois é possível que na estação seca haja maior sinergismo entre mesofauna e microrganismos do que na estação chuvosa, o que deve auxiliar na manutenção da comunidade edáfica frente a condições muito adversas no solo. Assim, estudos mais refinados se fazem necessários, a fim de se estabelecer quais são as principais espécies de microrganismos e como elas se relacionam com a comunidade invertebrada que habita o solo.

Referências

- Allef, K., Nannipieri, P., 1995. Methods in applied soil microbiology and biochemistry. Academic Press, London.
- Anderson, J.M., Ingram, J.S.I., 1993. Tropical Soil Biology and Fertility, 2nd ed. C.A.B. International, Wallingford.
- Andreote, F.D., Gumiêre, T., Durrer, A., 2014. Exploring interactions of plant microbiomes. Sci. Agric. 71, 528–539. doi:10.1590/0103-9016-2014-0195
- Aquino, A.M. De, Elizabeth, M., Correia, F., Badejo, M.A., Awolowo, O., 2006. Amostragem da Mesofauna Edáfica utilizando Funis de Berlese-Tüllgren Modificado. Embrapa 4.

- Bachega, L.R., Bouillet, J.P., Picollo, M.C., Saint-André, L., Bouvet, J.M., Nouvellon, Y., Gonçalves, J.L.M., Robin, A., Laclau, J.P., 2016. Decomposition of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* leaves and fine roots in tropical conditions did not meet the Home Field Advantage hypothesis. *For. Ecol. Manage.* 359, 33–43. doi:10.1016/j.foreco.2015.09.26
- Barbercheck, M.E., Neher, D.A., Anas, O., El-Allaf, S.M., Weicht, T.R., 2009. Response of soil invertebrates to disturbance across three resource regions in North Carolina. *Environ. Monit. Assess.* 152, 283–298. doi:10.1007/s10661-008-0315-5
- Baretta, D., Brown, G.G., Cardoso, E.J.B.N., 2010. Potencial da macrofauna e outras variáveis edáficas como indicadores da qualidade do solo em áreas com *Araucaria angustifolia*. *Acta Zoológica Mex.* 2, 135–150.
- Beare, M., Coleman, D., Hendrix, P.F., Odum, E.P., 1995. A hierarchical approach to evaluating the significance of soil biodiversity to biogeochemical cycling. *Plant Soil* 170, 5–22. doi:10.1007/bf02183051
- Bedano, J.C., Domínguez, A., Arolfo, R., Wall, L.G., 2016. Effect of Good Agricultural Practices under no-till on litter and soil invertebrates in areas with different soil types. *Soil Tillage Res.* 158, 100–109. doi:10.1016/j.still.2015.12.005
- Bini, D., Santos, C.A. dos, Bouillet, J.P., Gonçalves, J.L. de M., Cardoso, E.J.B.N., 2013. *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in monoculture and intercropped plantations: Evolution of soil and litter microbial and chemical attributes during early stages of plant development. *Appl. Soil Ecol.* 63, 57–66. doi:10.1016/j.apsoil.2012.09.012
- Cardoso, E.J.B.N., Vasconcellos, R.L.F., Bini, D., Miyauchi, M.Y.H., Santos, C.A. dos, Alves, P.R.L., Paula, A.M. De, Nakatani, A.S., Pereira, J. de M., Nogueira, M.A., 2013. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? *Sci. Agric.* 70, 274–289. doi:10.1590/S0103-90162013000400009
- Casida, L.E.J., Klein, D.A., Santoro, T., 1964. Soil dehydrogenase activity. *Soil Sci.* 98, 371–376.

Cerri, C.C., Bernoux, M., Eduardo, P.B., 1990. O Ciclo do Carbono no Solo, in: Cardoso, E.J.B.N., Tsai, S.M., Neves, M.C.P. (Eds.), *Microbiologia Do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, pp. 73–90.

Choi, W. Il, Moorhead, D.L., Neher, D.A., Ryoo, M. Il, 2006. A modeling study of soil temperature and moisture effects on population dynamics of *Paronychiurus kimi* (Collembola: Onychiuridae). *Biol. Fertil. Soils* 43, 69–75. doi:10.1007/s00374-005-0062-5

Da Gama-Rodrigues, E.F., Da Gama-Rodrigues, A.C., Paulino, G.M., Franco, A.A., 2008. Atributos químicos e microbianos de solos sob diferentes coberturas vegetais no Norte do Estado do Rio de Janeiro. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 32, 1521–1530. doi:10.1590/S0100-06832008000400016

Da Rosa, M.G., Filho, O.K., Bartz, M.L.C., Mafra, Á.L., De Sousa, J.P.F.A., Baretta, D., 2015. Macrofauna edáfica e atributos físicos e químicos em sistemas de uso do solo no planalto catarinense. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 39, 1544–1553. doi:10.1590/01000683rbc20150033

De Araujo Pereira, A.P., De Andrade, P.A.M., Bini, D., Durrer, A., Robin, A., Bouillet, J.P., Andreote, F.D., Cardoso, E.J.B.N., 2017. Shifts in the bacterial community composition along deep soil profiles in monospecific and mixed stands of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium*. *PLoS One* 12, 1–15. doi:10.1371/journal.pone.0180371

Dias, P.F., Souto, S.M., Correia, M.E.F., Rocha, G.P., Moreira, J.F., Rodrigues, K.D.M., Franco, A.A., 2006. Árvores fixadoras de nitrogênio e macrofauna do solo em pastagem de híbrido de *Digitaria*. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 41, 1015–1021. doi:10.1590/S0100-204X2006000600018

Doran, J.W., Zeiss, M.R., 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Appl. Soil Ecol.* 15, 3–11. doi:10.1016/S0929-Get

Ellert, B.H., Bettany, J.R., 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Soil Sci.* 75, 529–538. doi:10.4141/cjss95-075

Embrapa, 2011. Manual de Métodos de Análises de solo, 2nd ed. Rio de Janeiro.

Ferris, H., Tuomisto, H., 2015. Unearthing the role of biological diversity in soil health. *Soil Biol. Biochem.* 85, 101–109. doi:10.1016/j.soilbio.2015.02.037

Gómez-Anaya, J.O., Palacios-Vargas, J.G., Castaño-Menezes, G., 2010. Abundance of springtails(Hexapoda: Collembola) and edaphic parameters from a deciduous dry forest. *Rev. Colomb. Entomol.* 36, 96–105.

Goncalves, J.L.M., Stape, J.L., Laclau, J.P., Bouillet, J.P., Ranger, J., 2008. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. *South. For.* 70, 105–118. doi:10.2989/SOUTH.FOR.2008.70.2.6.534

Hendrix, P.F., 2000. Soil Fauna, in: Sunmer, E. (Ed.), *Handbook of Soil Science*. CRC Press, Boca Raton, p. 2148.

Krivtsov, V., Illian, J.B., Liddell, K., Garside, A., Bezginova, T., Salmond, R., Thompson, J., Griffiths, B., Staines, H.J., Watling, R., Brendler, A., Palfreyman, J.W., 2003. Some aspects of complex interactions involving soil mesofauna: Analysis of the results from a Scottish woodland. *Ecol. Modell.* 170, 441–452. doi:10.1016/S0304-3800(03)00244-8

Lavelle, P., 1997. Faunal activities and soil processes: adaptative strategies that determine ecosystem function., *Advances in Ecological Research*.

Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., Rossi, J.P., 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *Eur. J. Soil Biol.* 42. doi:10.1016/j.ejsobi.2006.10.002

Magurran, A.E., 2004. *Measuring biological diversity*. Wiley-Blackwell, Oxford.

Moreira, F.M.S., Siqueira, O., 2002. *Microbiologia e Bioquímica do Solo*. Editora UFLA, Lavras.

Nannipieri, P., Grego, S., Cecanti, B., 1990. Ecological significance of biological activity, in: *Soil Biochemistry*. Dekker, New York, pp. 293–355.

Rodrigues, N.E.L., Mendoca Jr, M.D.S., Rosado, J.L.O., Loeck, A.E., 2010. Soil spiders in differing environments: Eucalyptus plantations and grasslands in the Pampa biome, southern Brazil. *Rev. Colomb. Entomol.* 36, 277–284.

Santos, D.C.F., Graziotti, P.H., Silva, A.C., Trindade, A.V., Silva, E. de B., Costa, L.S. da, Costa, H.A.O., 2011. Microbial and soil properties in restoration areas in the Jequitinhonha valley, Minas Gerais. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 35, 2199–2206. doi:10.1590/S0100-06832011000600035

Seastedt, T.R., 1984. The Role of Microarthropods in Decomposition and Mineralization Processes. *Annu. Rev. Entomol.* 29, 25–46. doi:10.1146/annurev.ento.29.1.25

Swift, M.J., Heal, O.W., Anderson, J.M., 1979. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*, 1st ed. University of California Press, Barkley.

Tabatai, M.A., 1994. Soil Enzymes, in: Weaver, R.W. (Ed.), *Method of Soil Analysis: Microbiological and Biochemical Properties*. pp. 775–873.

Vance, E.D., Brookes, P.C., Jenkinson, D.S., 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.* 19, 703–707. doi:10.1016/0038-0717(87)90052-6

Velasquez, E., Lavelle, P., Andrade, M., 2007. GISQ , a multifunctional indicator of soil quality 39, 3066–3080. doi:10.1016/j.soilbio.2007.06.013

Xu, W., Yuan, W., 2017. Responses of microbial biomass carbon and nitrogen to experimental warming: A meta-analysis. *Soil Biol. Biochem.* 115, 265–274. doi:10.1016/j.soilbio.2017.08.033

Yunfeng, J., Xiuqin, Y.I.N., Fubin, W., 2015. Composition and Spatial Distribution of Soil Mesofauna along an Elevation Gradient on the North Slope of the Changbai Mountains, China. *Pedosphere. An Int. J.* 25, 811–824. doi:10.1016/S1002-0160(15)30062-X

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muita importância vem sendo dada à fauna que habita o solo, porém pouca atenção se dá aos invertebrados que vivem na liteira. Nesse sentido, o presente estudo evidenciou que a liteira abriga grande riqueza, diversidade e densidade de mesofauna, além de ser um compartimento mais responsivo frente às diferenças climáticas e aos sistemas florestais do que o solo. O Indicador Geral de Qualidade do Solo é uma ferramenta bastante útil para inferir acerca dos processos biogeoquímicos que ocorrem no solo, tais como decomposição, ciclagem de nutrientes e estruturação do solo, porém, tendo em vista que a mesofauna edáfica, e principalmente a comunidade microbiana são muito influenciadas pelas condições climáticas, sobretudo pelo teor de água no solo, essa ferramenta teria mais validade se fossem comparados os sistemas florestais sob as mesmas condições edafoclimáticas.

É de grande importância manter o consórcio entre leguminosas e *Eucalyptus*, tendo em vista que as leguminosas promovem fixação de nitrogênio atmosférico para o solo o que permite maior crescimento da cultura de maior valor comercial agregado. Além disso, a leguminosa *Acacia mangium* é responsável por atrair a maior abundância e diversidade de mesofauna edáfica, especialmente na serapilheira. Portanto, o plantio consorciado de *Acacia mangium* com *Eucalyptus grandis* amortiza os efeitos indesejáveis das monoculturas de *Eucalyptus* para o solo, uma vez que a mesofauna edáfica atua na fragmentação do resíduo vegetal, o que facilita o ataque microbiano e conseqüentemente favorece a disponibilização de nutrientes para a solução do solo.

APÊNDICES

Apêndice 1. Sistemas florestais estudados de 7 anos de idade (2009-2016). A – Plantio misto de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* (M); B – Plantio puro de *Eucalyptus grandis* (EU); C – Plantio puro de *Acacia mangium* (AC).

Apêndice 2. Distribuição dos pontos de coleta de solo e de srapilheira dentro de uma parcela de *Acacia mangium* (à esquerda) e subamostras para a formação de uma amostra composta para determinação de atributos físico-químicos e microbiológicos do solo ao redor da amostra independente para a mesofauna (à direita).

Apêndice 3. Esquema de coletas e extração da mesofauna em funis de Berlese.

Fatores		AC	M	EU
Argila	g kg ⁻¹	133.28a	116.62a	108.42a
Silte		15.16a	24.66a	24.69a
Areia		851.57a	858.71a	855.89a
Densidade solo	g dm ⁻³	1.32a	1.30a	1.42a
Densidade partículas		2.82a	2.81a	2.84a
Porosidade total		0.53a	0.53a	0.50a
Microporosidade		0.16a	0.16a	0.18a
Macroporosidade		0.37a	0.38a	0.32a
Capacidade de campo		0.14a	0.14a	0.13a
Porosidade efetiva		0.39a	0.39a	0.37a

Apêndice 4. Caracterização física do solo em plantios puros de *Acacia mangium* (AC), *Eucalyptus grandis* (EU) e plantios consorciados dessas duas espécies arbóreas (M). Valores obtidos são médias de 3 amostras independentes por tratamento. Letras iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5% de significância.