Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Atributos do solo como indicadores de qualidade para avaliação de áreas em processo de restauração ativa na Mata Atlântica

Tatiana Cabral de Vasconcelos

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Conservação de Ecossistemas Florestais

Piracicaba
2021

Tatiana Cabral de Vasconcelos
Licenciada em Ciências Biológicas

Atributos do solo como indicadores de qualidade para avaliação de áreas em processo de restauração ativa na Mata Atlântica

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **RICARDO RIBEIRO RODRIGUES**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Conservação de Ecossistemas Florestais

Piracicaba
2021

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

Vasconcelos, Tatiana Cabral de

Atributos do solo como indicadores de qualidade para avaliação de áreas em processo de restauração ativa na Mata Atlântica / Tatiana Cabral de Vasconcelos. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2021.

115 p.

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

1. Restauração florestal 2. Restauração ativa 3. Indicador de qualidade do solo 4. Atributos do solo I. Título

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela vida, pela vontade de crescer, pela coragem de enfrentar e pela alegria de vencer. Agradeço ao meu pai pelo carinho com sua "*princesa*". Agradeço a minha mãe por sempre me ajudar e ao meu irmão Daniel por fazer tudo possível, desde mudança até assuntos internacionais. Agradeço a minha avó Tereza, aos meus irmãos, cunhadas e sobrinhos por todos os momentos de alegrias junto a família em Taubatexas. Agradeço ao meu marido Bruno por estar presente em todos os momentos deste doutorado.

Agradeço ao Prof. Ricardo Ribeiro Rodrigues por receber na ESALQ e no LERF e a todos(as) alunos e ex-alunos que fazem deste lugar uma família, aos estágiários e a todos alunos de graduação que me ajudaram em campo.

Agradeço aos professores Dr. Patrick Lavelle e Dra. Elena Velásquez pela orientação nas atividades realizadas em Palmira, na Universidad Nacional de Colombia (UNAL) e por todo apoio dado a este trabalho.

Agradeço aos proprietários da Fazenda Capoava em Itu, pelo apoio e hospedagem para realização dos trabalhos de campo e também a equipe da Bioflora pelo apoio no levantamento das áreas na Fazenda Capoava.

Agradeço ao Programa de Recursos Florestais, especialmente ao Prof. Demóstenes e a querida Giovana pelo atendimento excepcional a todas as demandas e necessidades acadêmicas.

Agradeço aos técnicos dos Laboratórios de Química, Microbiologia e de Física do solo, pertencentes ao Departamento de Solos da ESALQ e também aos professores Dr. Miguel Cooper e Dra. Laura Simões.

Agradeço ao Fundo de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo suporte através do Projeto Temático (#2013/50718-5), no que confere a materiais de campo e de laboratório.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de doutorado cota social e pela bolsa de doutorado sanduíche e também a Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz (FEALQ), pela bolsa emergencial.

SUMÁRIO

RESUMO **6**
ABSTRACT **7**
INTRODUÇÃO GERAL **9**
Referências **13**
ARTIGO 1: USO DO INDICADOR SINTÉTICO DE QUALIDADE DO SOLO (ISQS) PARA AVALIAÇÃO DE ÁREAS EM PROCESSO DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL ATIVA COM 5 ANOS DE IMPLANTAÇÃO NA FLORESTA ATLÂNTICA, SÃO PAULO, BRASIL. **15**
Resumo **15**
Abstract **15**
1. Introdução **16**
2. Material e métodos **17**
2.1. Área de estudo 17
2.2. Desenho experimental 18
2.3. Protocolos de amostragem e análise laboratorial 20
2.4. Análise de dados 22
3. Resultados **23**
3.1. Indicador de fertilidade do solo 23
3.2. Indicador de estrutura do solo 25
3.3 Indicador de diversidade da macrofauna do solo 27
3.4. Indicador de agregação do solo 29
3.5. Indicador sintético de qualidade do solo (ISQS) 30
4. Discussão **33**
4.1. Indicadores com alta qualidade para restauração ativa 33
4.2. Indicadores com baixa qualidade para restauração ativa 34
4.3. Indicador sintético de qualidade do solo 355
5. Conclusão **35**
Referências **35**
ARTIGO 2: INTEGRAÇÃO DE ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS E DIVERSIDADE DA MESOFAUNA DA SERRAPILHEIRA NO CÁLCULO DO INDICADOR SINTÉTICO DE QUALIDADE DO SOLO (ISQS) **41**
Resumo **41**

Abstract **41**
7. Introdução **42**
8. Material e métodos **433**
8.1. Área de estudo 43
8.2. Desenho experimental 43
8.3. Protocolos de amostragem e análise laboratorial 44
8.4. Análise de dados 45
9. Resultados **46**
9.1. Indicador ciclagem de nutrientes 46
9.2. Indicador diversidade da mesofauna da serapilheira 48
9.3. Indicador sintético de qualidade do solo (ISQS) com 6 indicadores 50
10. Discussão **52**
10.1. Indicador de ciclagem de nutrientes 52
10.2. Indicador de diversidade da mesofauna na serapilheira 53
10.3. Indicador sintético de qualidade do solo (ISQS) com 6 indicadores 54
11. Conclusão **54**
Referências **55**
ANEXOS **61**

RESUMO

Atributos do solo como indicadores de qualidade para avaliação de áreas em processo de restauração ativa na Mata Atlântica

No monitoramento da restauração florestal há uma diversidade de indicadores, porém, maior atenção é dispensada na avaliação do componente arbóreo, em detrimento à avaliação do componente edáfico. Neste trabalho avaliamos a qualidade do solo em diferentes tipos de uso, comumente encontrados em uma propriedade rural. O objetivo foi, aplicar um indicador de qualidade do solo que avalia os serviços do ecossistema (s.e.) do solo, por meio de um conjunto de 4 ou 6 indicadores combinados em um único Indicador Sintético de Qualidade do Solo (ISQS). A coleta de amostras de solo foi realizada no bioma Mata Atlântica, nas áreas das Fazendas Capoava, Jequitibá e Ingazinho, no município de Itu – SP. O cálculo dos indicadores foi realizado em sequências de análises multivariadas, primeiramente integramos 46 variáveis edáficas formando 04 conjuntos de dados: 16 variáveis químicas para o indicador de fertilidade do solo (FER), 09 variáveis físicas para o indicador de estrutura do solo (EST), 13 variáveis de macrofauna do solo para o indicador de diversidade do solo, 08 variáveis de agregação do solo para o indicador de agregação do solo (AGR). Testamos as hipóteses (i) a restauração florestal ativa (RA) com 5 anos de implantação tem maior qualidade do solo quando comparado com áreas de pastagem em uso contínuo (PUC) e pastagens abandonadas sem ações de restauração (PA); (ii) o solo de um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FES) tem maior qualidade que os tipos de uso do solo (RA), (PUC) e (PA). Os resultados mostraram maior valor do ISQS na área FES como referência de conservação do ecossistema florestal. Posteriormente calculamos o indicador ciclagem de nutrientes (NUT), com 06 variáveis microbiológicas e o indicador de diversidade da mesofauna (DME), com 19 variáveis dos grupos taxonômicos da mesofauna na serapilheira. Os resultados mostraram que a restauração ativa após 5 anos de implantação apresentou média qualidade do solo, tanto com o cálculo do ISQS com 04 indicadores ou 06 indicadores. Apesar do indicador sintético de qualidade do solo, unir todas as váriaveis estudadas, a observação dos indicadores e suas relações também foi avaliada. Em nossos resultados foi explícita a variação conjunta dos indicadores de Estrutura do Solo (EST) com os indicadores de DMA e DME, que representam a macro e mesofauna do solo.

Palavras-chave: Restauração florestal, Restauração ativa, Indicador de qualidade do solo, Atributos do solo

ABSTRACT

Soil attributes as quality indicators for evaluating areas in the process of active restoration in the Atlantic Forest

In the monitoring of forest restoration there is a diversity of indicators, however, more attention is given to the evaluation of the tree component, to the detriment of the evaluation of the edaphic component. In this work we evaluate the quality of the soil in different types of use, commonly found in a rural property. The objective was to apply a soil quality indicator that assesses soil ecosystem services (s.e.), using a set of 4 or 6 indicators combined into a single Synthetic Soil Quality Indicator (ISQS). The collection of soil samples was carried out in the Atlantic Forest biome, in the areas of the Capoava, Jequitibá and Ingazinho farms, in the municipality of Itu - SP. The calculation of the indicators was performed in sequences of multivariate analyzes, first we integrated 46 edaphic variables forming 04 data sets: 16 chemical variables for the soil fertility indicator (FER), 09 physical variables for the soil structure indicator (EST) , 13 soil macrofauna variables for the soil diversity indicator, 08 soil aggregation variables for the soil aggregation indicator (AGR). We tested the hypotheses (i) active forest restoration (RA) with 5 years of implantation has better soil quality when compared to pasture areas in continuous use (PUC) and abandoned pastures without restoration actions (PA); (ii) the soil of a fragment of Seasonal Semideciduous Forest (FES) has higher quality than the types of land use (RA), (PUC) and (PA). The results showed a greater value of the ISQS in the FES area as a reference for the conservation of the forest ecosystem. Subsequently, we calculated the nutrient cycling indicator (NUT), with 06 microbiological variables and the mesofauna diversity indicator (DME), with 19 variables from the mesofauna taxonomic groups in the litter. The results showed that the active restoration after 5 years of implantation showed average soil quality, both with the calculation of the ISQS with 04 indicators or 06 indicators. Despite the synthetic indicator of soil quality, uniting all the variables studied, the observation of the indicators and their relationships was also evaluated. In our results, the joint variation of the Soil Structure (EST) indicators with the DMA and DME indicators, which represent the soil macro and mesofauna, was explicit.

Keywords: Forest restoration, Active restoration, Soil quality indicator, Soil attributes

INTRODUÇÃO GERAL

A Avaliação Ecossistêmica do Milênio (*Millennium Ecosystem Assessment*) (MEA, 2005), reconhece quatro categorias de benefícios às pessoas gerados pela natureza, ou seja, serviços ecossistêmicos (s.e.): serviços de provisão, serviços de regulação, serviços de suporte e serviços culturais, três deles estão relacionados diretamente com os processos que ocorrem no solo, tais como a ciclagem de nutrientes e formação do solo (Tabela 01). Dentre as principais potencialidades dos serviços ecossistêmicos provenientes do solo, destaca-se na restauração florestal a relação dos organismos do solo com a sucessão primária e secundária das florestas (VAN DER PUTTEN et al., 2009), a auto-organização molda mudança a longo prazo dos ecosistemas, onde o processo de sucessão ecológica depende da resiliência dos processos ecológicos mediados pela diversidade funcional dos organismos (HOLLING, 2001). Acreditamos que o incremento de vegetação nativa resultante do processo de restauração ecológica, pode permitir o aumento da diversidade da fauna do solo, que analisada de forma integrada com outros dados edáficos pode ser importante para aferir o retorno dos serviços ecossistêmicos que garantem a perpetuação da floresta, tornando-se mais uma ferramenta para o monitoramento da restauração florestal.

Tabela 01: Tipos de Serviços Ecossistêmicos relacionados aos invertebrados do solo. Fonte: (LAVELLE et al., 2006).

Tipo de Serviço Ecossistêmico	Bem ou Serviço	Processo do Ecossistema	Contribuição dos Invertebrados do solo
Provisão	**Suprimento de água**	Infiltração e estoque de água nos poros do solo.	Construção e manutenção de porosidade estável por meio da bioturbação e escavação.
Suporte	**Ciclagem de Nutrientes**	Decomposição, Humificação, Regulação de perdas de nutrientes (lixiviação e denitrificação).	Fragmentação dos resíduos vegetais, seleção e ativação da atividade microbiana.
	Formação do Solo	Pedogênese	Bioturbação; deposição superficial, seleção de partículas.
	Produção Primária	Estímulo de atividade simbiótica no solo; produção indireta no solo de moléculas reconhecidas pelas plantas como hormônios; proteção contra pestes e doenças.	Aumento seletivo dos microrganismos e da dominância funcional; Controle de pestes através da interação biológica; aumento da capacidade de resposta da planta.
Regulação	**Controle de inundação e de erosão**	Regulação do escoamento da água.	Criação de superfície rugosa devido as estruturas biogênicas.
		Infiltração e armazenamento de água no solo.	Construção e manutenção de porosidade estável por meio da bioturbação e escavação.
	Regulação do Clima	Produção e consumo de gases do efeito estufa.	Sequestro de matéria orgânica na macroagregados biogênicos.
		Estoque de matéria orgânica no solo e na biomassa.	Aumento da formação de compostos húmicos resistentes.

O avanço do conhecimento científico em restauração florestal demonstrou que o desenvolvimento dos ecossistemas é um processo dinâmico e afetado por múltiplos fatores, com destaque para distúrbios naturais e antrópicos que podem alterar a trajetória sucessional do ecossistema em recuperação ou até definir que essa trajetória permaneça estagnada ou em processo de regressão (BRANCALION; GANDOLFI; RODRIGUES, 2015) para estes autores é clara a necessidade de aprimoramento e revisão constante das metodologias, permitindo novas formas de enxergar e conduzir a restauração florestal.Somente com uma criteriosa avaliação do processo de restauração florestal é possível detectar falhas e propor ações corretivas, o monitoramento deve identificar se a trajetória atual está realmente levando a uma condição de ecossistema restaurado. Para a indicação do sucesso da restauração ecológica, na literatura predominam em 81% a 79% dos

trabalhos a análise da vegetação, somente 6% utilizam fungos como indicadores, 5% pássaros, 4% invertebrados e 3% mamíferos (GUERRA et al., 2020). Apenas 20% dos estudos analisados por Valani et al. (2020) integravam os componentes físicos, químicos e biológicos para aferir a qualidade do solo, em tipos de uso solo e manejo analisados por estes autores, a maioria das publicaçõs usaram indicadores físicos (80%), seguido pelos indicadores químicos (70%) e com pouca atenção aos indicadores biológicos (33%).

Dados sobre as condições do solo, durante o processo de restauração ecológica não estão incluídos nos indicadores convencionais, menos de um terço das publicações recentes em restauração ecológica no Brasil mencionam o solo (GUERRA et al., 2020). Nos ecossistemas tropicais a produção cientifica em restauração ecológica também possui pouca informação sobre o solo (ROMANELLI et al., 2018). Na avaliação de áreas em processo de restauração ecológica, alguns dados sobre o solo são incluídos de forma "burocrática" sem apropriada consideração (MENDES et al., 2019), sendo necessário desenvolver ferramentas para analisar o solo de forma dinâmica durante o processo de transformação de uso do solo.

A construção do conhecimento ecológico do solo na restauração ecológica (florestal) deve ser incentivado, normalmente restauradores pressupõem que os processos autogênicos da floresta começarão uma vez que estejam restabelecidas a composição e a estrutura apropriadas das espécies arbóreas, mas nem sempre essa pressuposição é válida(CALLAHAM; RHOADES; HENEGHAN, 2008; HENEGHAN et al., 2008). Para avaliar o solo durante o processo de sucessção ecológica é importante conhecer o conceito de ecologia acima e abaixo do solo (Figura 1) que pressupõe efeitos de feedback, oriundos das interações dos organismos do solo com o ambiente abiótico, que ocasionam as alterações observadas nos ecossistemas terrestres (VAN DER PUTTEN et al., 2009).

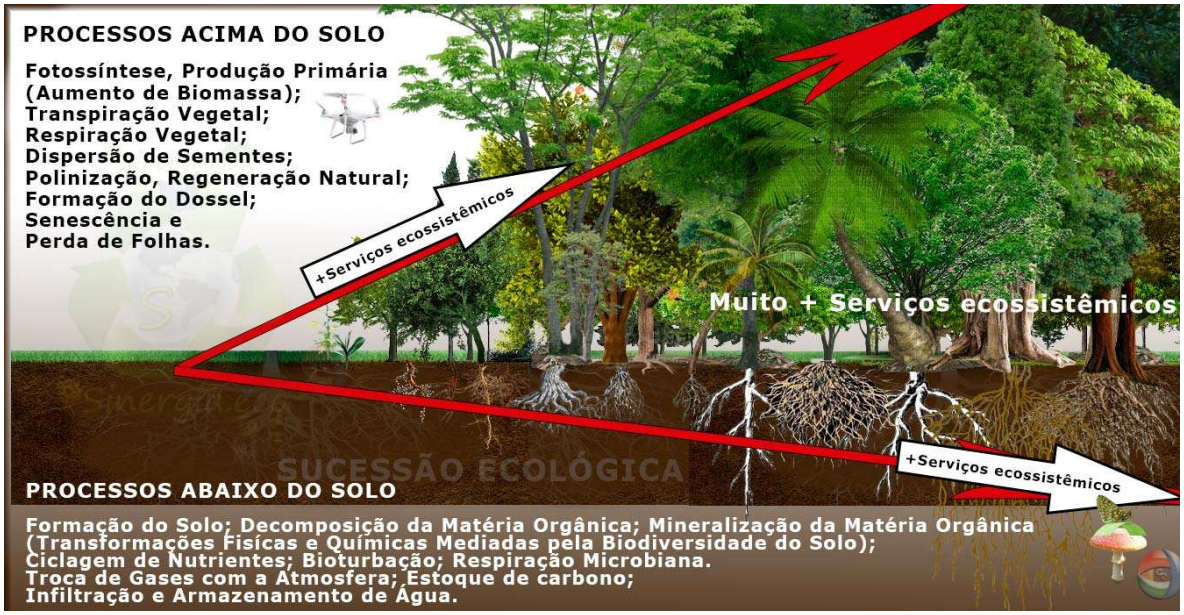


Figura 01: Ilustração da autora, solo e processos ecológicos que ocorrem na sucessão ecológica.

Em geral há uma diversidade de indicadores para monitoramento da restauração florestal (LONDE et al., 2020; OLIVEIRA, 2011; RUIZ-JAEN & AIDE, 2005), no entanto a melhor escolha de indicadores para verificar se a floresta foi recuperada, ainda estão em constante revisão (RODRIGUES et al., 2013; SUGANUMA; DURIGAN, 2015).

Dentre os indicadores recomendados para o monitoramento de áreas em processo de restauração florestal temos 3 categorias principais, com exemplos do indicador avaliado: *1.Composição:* riqueza de espécie arbóreas; *2.Estrutura:*

porcentagem de cobertura do solo pelas copas das árvores e *3.Funcionamento:* avaliação de um processo ecológico que irá garantir a autoperpetuação do ecossistema (VIANI et al., 2017; BRANCALION; GANDOLFI; RODRIGUES, 2015).

Normativas do estado de São Paulo trazem os valores crítico, mínimo e adequado, por exemplo, uma área com 5 anos de implantação da restauração ecológica, na Floresta Atlântica Estacional, deve apresentar, no mínimo, a riqueza de 3 a 10 espécies arbóreas nativas e 30 a 80% de cobertura do solo pela vegetação nativa (Decreto SMA 32/14; Portaria CBRN 01/2015).

Elaborado em conjunto pelos atores do Pacto pela Restauração da Mata Atlântica (https://www.pactomataatlantica.org.br/) no protocolo de monitoramento para programas e projetos de restauração florestal (RODRIGUES et al., 2013), são consideradas a Fase I e a Fase II para o monitoramento da restauração florestal.

A Fase I representa a estruturação inicial do dossel, finda-se quando alcançado 70% de cobertura do solo pelas espécies nativas. Fase II representa a dinâmica da trajetória ecológica, ou seja, devem ser observados os processos ecológicos. De acordo com o protocolo, a verificação do critério edáfico deve ser realizada através da fertilidade química e textura do solo, compactação do solo e conservação do solo (Tabela 2).

Tabela 2: Indicadores e verificadores do critério edáfico, do princípio ecológico do protocolo de monitoramento da restauração florestal, modificado de (RODRIGUES et al., 2013).

Indicador (Fase 1)	Verificador
Fertilidade química	Disponibilidade de nutrientes, teor de matéria orgânica, pH, metais pesados (quando necessário)
Granulometria	Análise de textura do solo (percentual de areia, argila e silte).
Compactação do solo	Resistência a penetração do solo (uso de penetrômetro) Ausência de boas práticas agrícolas Presença de erosão laminar (avaliação visual)
Conservação do solo	Avaliação visual da presença de solo descoberto na entrelinha (preparo convencional com revolvimento do solo) e da ausência de cultivo em nível.

O estado edáfico pode representar grande influência na trajetória da sucessão ecológica durante o processo da restauração florestal, logo após o plantio, a planta depende exclusivamente do potencial nutritivo do solo (1-3 meses), num momento intermediário (5 anos) já existem processos ecológicos evidenciados e ao final (+ 20 anos) os processos ecossistêmicos podem chegar a pleno funcionamento (Figura 2).

O protocolo recomenda o uso dos critérios edáficos para avaliação inicial da área e durante a Fase 1 do monitoramento, onde o indicador de compactação do solo é um dos principais filtros para o bom desenvolvimento das plantas, nos casos em que a compactação é diagnosticada, ações corretivas de descompactação com uso de implementos escarificadores, subsoladores podem ser recomendadas. Para avaliação dos parâmetros químicos como macronutrientes, pH, conteúdo de matéria orgânica, Capacidade de Troca Catiônica (CTC). Porém, não existem parâmetros reconhecidos para avaliar a restauração florestal, de acordo, com o protocolo podem ser utilizados os mesmos parâmetros da avaliação de solo agrícolas. No entanto, a ciclagem dos nutrientes em ambiente florestal é diferenciada dos sistemas agrícolas, onde o uso de fertilizantes é mais intenso que no plantio de espécies arbóreas (GONÇALVES, 2000).

O principal requisito para um solo de boa qualidade, é a presença de vida do solo. A biota do solo está interligada aos processos de formação do solo, manutenção da fertilidade e qualidade do solo, pois atua nas principais funções ecológicas do ecossistema terrestre (MOREIRA, 2008). Por exemplo, a macrofauna do solo pode atuar em diversos níveis tróficos da teia alimentar do solo (Figura 3), levando a utilização destes organismos como bioindicadores.

Figura 2: Fase inicial de plantio da espécie arbórea (1-3meses) ocorre adaptação e crescimento, Fase Intermediária (5 anos) ocorre franco crescimento da parte área e radicular, Fase Final (>20anos) ocorre o fechamento de copas e estabilidade na ciclagem de nutrientes, que resulta da maior provisão de Serviços Ecossistêmicos. Modificado de (GONÇALVES, 2000).

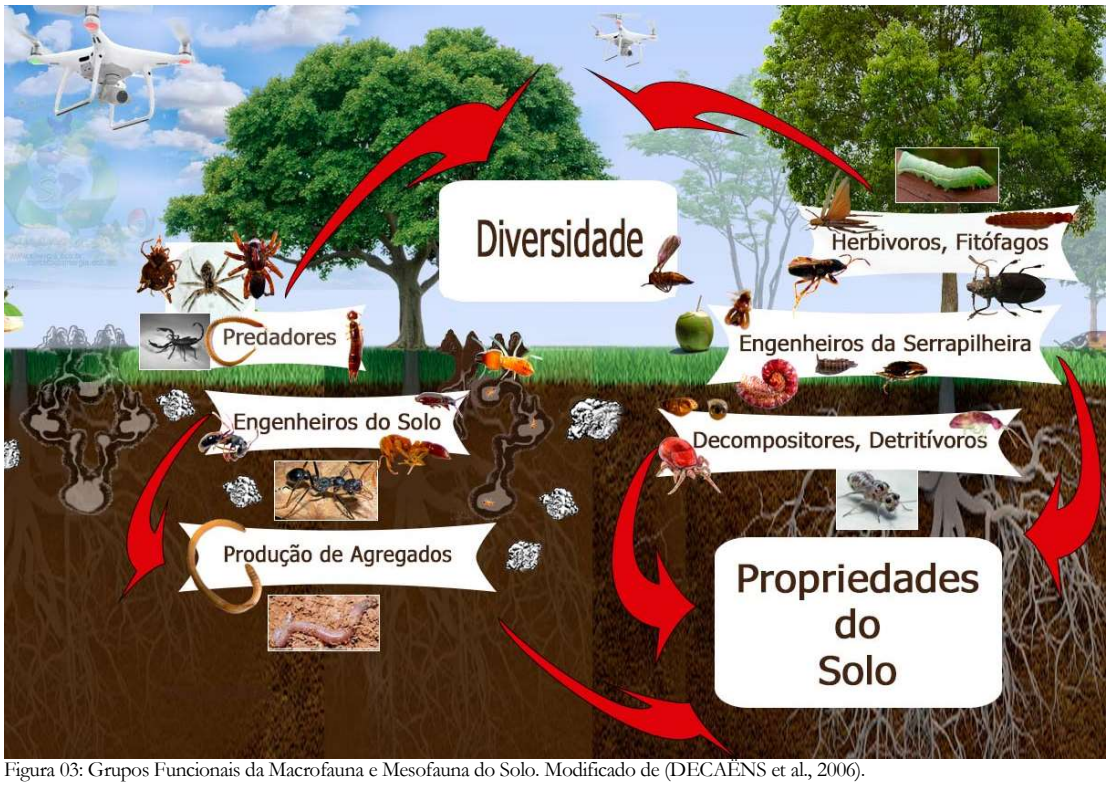


Figura 03: Grupos Funcionais da Macrofauna e Mesofauna do Solo. Modificado de (DECAËNS et al., 2006).

Os serviços ecossistêmicos da biodiversidade do solo devem ser melhor compreendidos a fim de usar seu potencial para verificar a sustentabilidade dos ecossistemas terrestres (DOMINATI; PATTERSON; MACKAY, 2010). Diversos atributos do solo quando analisados separadamente podem caracterizar determinado processo na dinâmica do funcionamento do solo, porém são necessários valores comparáveis e indicadores replicáveis para possibilitar o monitoramento das áreas em processo de restauração ecológica.

Indicadores multifuncionais da qualidade do solo foram construídos com dados de biodiversidade do solo, propriedades físicas, propriedade químicas e agregação do solo, como o índice *General Indicator of Soil Quality* (GISQ, acrônimo em inglês), proposto por (VELASQUEZ; LAVELLE; ANDRADE, 2007). Esta abordagem compreende a avaliação dos diferentes serviços ecossistêmicos fornecidos pelo solo usando conjuntos relevantes de variáveis (VELASQUEZ; LAVELLE, 2019). Este índice é dinâmico e prático, as informações edáficas são apresentadas de forma sintética trazem à tona as diferenças entre os tipos de uso do solo (BÜNEMANN et al., 2018; DOMÍNGUEZ-HAYDAR et al., 2019; LAVELLE et al., 2014; MARICHAL et al., 2014; NURIA et al., 2011; VELASQUEZ; LAVELLE; ANDRADE, 2007).

Neste trabalho avaliamos a qualidade do solo, em 4 diferentes tipos de uso: restauração florestal ativa (RA) com 5 anos de implantação; pastagens abandonadas sem ações de restauração (PA); áreas de pastagem em uso contínuo (PUC) e um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FES), situações ambientais comumente encontradas em uma propriedade rural. O objetivo foi aplicar um indicador de qualidade do solo que avalia os serviços do ecossistema (s.e.) do solo por meio de um conjunto de 4 ou 6 indicadores combinados em um único Indicador Sintético de Qualidade do Solo (ISQS). Integramos diversas variáveis edáficas, cujos indicadores representam um tipo de serviço ecossistêmico do solo: 16 variáveis químicas para o indicador de fertilidade do solo (FER), 09 variáveis físicas para o indicador de estrutura do solo (EST), 13 variáveis de macrofauna do solo para o indicador de diversidade do solo, 08 variáveis de agregação do solo para o indicador de agregação do solo (AGR), 06 variáveis microbiológicas para o indicador de ciclagem de nutrientes (NUT) e 19 variáveis dos grupos taxonômicos da mesofauna na serapilheira para o indicador de diversidade da mesofauna (DME). Testamos a diferença dos resultados de cada um dos indicadores entre os diferentes tipos de uso do solo e testamos o cálculo do ISQS com 4 e 6 indicadores.

REFERÊNCIAS

ARONSON, J. What can and should be legalized in ecological restoration? **Revista Árvore**, v. 34, n. 3, p. 451–454, 2010.

BRANCALION, P. H. S.; GANDOLFI, S.; RODRIGUES, R. R. **Restauração florestal**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

BÜNEMANN, E. K. et al. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, n. September 2017, p. 105–125, 2018.

CALLAHAM, M. A.; RHOADES, C. C.; HENEGHAN, L. A striking profile: Soil ecological knowledge in restoration management and science. **Restoration Ecology**, 2008.

DECAËNS, T. et al. The values of soil animals for conservation biology. **European Journal of Soil Biology**, v. 42, n. SUPPL. 1, 2006.

DOMINATI, E.; PATTERSON, M.; MACKAY, A. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. **Ecological Economics**, v. 69, n. 9, p. 1858–1868, 2010.

DOMÍNGUEZ-HAYDAR, Y. et al. Evaluation of reclamation success in an open-pit coal mine using integrated soil physical, chemical and biological quality indicators. **Ecological Indicators**, v. 103, n. March, p. 182–193, 2019.

GONÇALVES, J. L. DE M. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: Piracicaba FEALQ, 2000.

GUERRA, A. et al. Ecological restoration in Brazilian biomes: Identifying advances and gaps. **Forest Ecology and Management**, v. 458, n. December, 2020.

HENEGHAN, L. et al. Integrating Soil Ecological Knowledge into Restoration Management. **Restoration Ecology**, v. 16, n. 4, p. 608–617, dez. 2008.

HOLLING, C. S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. **Ecosystems**, v. 4, n. 5, p. 390–405, 2001.

LAVELLE, P. et al. Soil invertebrates and ecosystem services. **European Journal of Soil Biology**, v. 42, n. SUPPL. 1, nov. 2006.

LAVELLE, P. et al. Soil ecosystem services and land use in the rapidly changing orinoco river basin of colombia. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 185, p. 106–117, 2014.

LONDE, V. et al. Reference and comparison values for ecological indicators in assessing restoration areas in the Atlantic Forest. **Ecological Indicators**, v. 110, 1 mar. 2020.

MARICHAL, R. et al. Soil macroinvertebrate communities and ecosystem services in deforested landscapes of Amazonia. **Applied Soil Ecology**, v. 83, p. 177–185, 2014.

MEA. Millennium Ecosystem Assessment. **Summary for decision makers**. [s.l: s.n.].

MENDES, M. S. et al. Look down—there is a gap—the need to include soil data in Atlantic Forest restoration. **Restoration Ecology**, v. 27, n. 2, p. 361–370, 2019.

MOREIRA, F. M. S. **Biodiversidade do solo em ecossistemas brasileiros**. Lavras: Lavras UFLA, 2008.

NURIA, R. et al. IBQS: A synthetic index of soil quality based on soil macro-invertebrate communities. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 10, p. 2032–2045, 2011.

OLIVEIRA, R. O estado da arte da ecologia da restauração e sua relação com a restauração de ecossistemas florestais no bioma Mata Atlântica. **Aleph**, 2011.

RODRIGUES, R. R. et al. **Protocolo de Monitoramento para Programas e Projetos de Restauração FlorestalPacto pela Restauração Florestal da Mata Atlântica**, 2013.

ROMANELLI, J. P. et al. Assessing ecological restoration as a research topic using bibliometric indicators. **Ecological Engineering**, v. 120, n. March, p. 311–320, 2018.

RUIZ-JAEN, M. C.; AIDE, T. M. Restoration success: How is it being measured? **Restoration Ecology**, v. 13, n. 3, p. 569–577, 2005.

SUGANUMA, M. S.; DURIGAN, G. Indicators of restoration success in riparian tropical forests using multiple reference ecosystems. **Restoration Ecology**, v. 23, n. 3, p. 238–251, 2015.

VELASQUEZ, E.; LAVELLE, P. Soil macrofauna as an indicator for evaluating soil based ecosystem services in agricultural landscapes. **Acta Oecologica**, v. 100, n. September, p. 103446, 2019.

VELASQUEZ, E.; LAVELLE, P.; ANDRADE, M. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. **Soil Biology and Biochemistry**, 2007.

VIANI, R. A. G. et al. Protocol for monitoring tropical forest restoration: Perspectives from the atlantic forest restoration pact in Brazil. **Tropical Conservation Science**, v. 10, 2017.

Artigo 1: USO DO INDICADOR SINTÉTICO DE QUALIDADE DO SOLO PARA AVALIAÇÃO DE ÁREAS EM PROCESSO DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL ATIVA COM 5 ANOS DE IMPLANTAÇÃO NA FLORESTA ATLÂNTICA, SÃO PAULO, BRASIL.

Tatiana Cabral de Vasconcelos[1], Elena Velasquez[2], Patrick Lavelle, Ricardo Ribeiro Rodrigues[3]

1.Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil; 2. Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Valle do Cauca, Colômbia. 3.Líder do Laboratório de Ecologia e Restauração Ecológica, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil.

Resumo

A restauração florestal é um processo dinâmico e afetado por múltiplos fatores. A trajetória sucessional do ecossistema em recuperação tem sido avaliada com indicadores de diversidade e estrutura da vegetação, enquanto os processos ecológicos do solo raramente são considerados. A análise do solo pode ser realizada medindo seus atributos físicos, químicos e biológicos de forma isolada ou combinada gerando indicadores compostos, os quais permitem observar os processos do ecossistema representando um indicador da categoria de funcionamento. O objetivo deste trabalho foi integrar 46 variáveis edáficas (16 variáveis químicas, 09 variáveis de estrutura do solo, 13 de diversidade da macrofauna e 08 de agregação do solo) que representam respectivamente os indicadores de: *fertilidade do solo (FER), estrutura do solo (EST), diversidade da macrofauna (DMA)* e *agregação do solo (AGR)* utilizados na composição do *Índice Sintético de Qualidade do Solo (ISQS)*. A coleta de amostras foi realizada em 4 tipos de usos do solo, nas Fazendas Capoava, Jequitibá e Ingazinho (Itu, São Paulo, Brasil) em junho de 2017. Para a construção dos indicadores foram analisadas: amostras deformadas e indeformadas na profundidade de 0-10cm. Testamos as hipóteses: (i) a restauração ativa (RA) com 5 anos de implantação tem maior qualidade do solo quando comparado com áreas de pastagem em uso contínuo (PUC) e pastagens abandonadas sem ações de restauração (PA) e (ii) o solo de um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FES) em estágio médio de conservação tem maior qualidade do solo quando comparada com a restauração ativa (RA), áreas de pastagem em uso contínuo (PUC) e pastagens abandonadas sem ações de restauração (PA). Os resultados descrevem um gradiente específico para cada indicador, em RA encontramos alta qualidade dos indicadores EST e DMA. Na área PA encontramos alta qualidade do indicador de AGR, em PUC encontramos baixa qualidade dos indicadores EST e DMA. O padrão dado pelo ISQS foi FES>RA>PA>PUC, o valor do ISQS=0,59 RA indicou média qualidade do solo apesar de mais alto não diferiu significativamente de PA, com ISQS=0,56 e de PUC com ISQS=0,38 refutando a primeira hipótese. Na área FES encontramos alta qualidade do solo com ISQS=0,80 diferindo significativamente de todos outros tipos de usos do solo, corroborando a segunda hipótese. O ISQS funcionou como ferramenta para transformar um número elevado de dados, em informações numéricas que permitiram distinguir a qualidade do solo sob diferentes tipos de uso. Concluímos que após 5 anos de implantação da restauração ativa na Mata Atlântica é possível obter uma qualidade média em relação ao componente edáfico observado de forma completa através do ISQS.

Palavras chaves: 1. Restauração ativa 2. Atributos do solo 3. Índice Sintético de Qualidade do Solo 4. Indicadores.

Abstract

Forest restoration is a dynamic process and affected by multiple factors. The successional trajectory of the recovering ecosystem has been evaluated with indicators of diversity and structure of vegetation, while ecological soil processes are rarely considered. Soil analysis can be performed by measuring its physical, chemical and biological attributes in an isolated or combined way, generating composite indicators, which allow observing the ecosystem processes representing an indicator of the functioning category. The objective of this work was to integrate 46 edaphic variables (16 chemical variables, 09 variables of soil structure, 13 of macrofauna diversity and 08 of soil aggregation) which respectively represent the indicators of: soil fertility (FER), soil structure (EST), macrofauna diversity (DMA) and soil aggregation (AGR) used in the composition of the Synthetic Index of Soil Quality (ISQS). Sample collection was carried out in 4 types of land use, at the Capoava, Jequitibá and Ingazinho Farms (Itu, São Paulo, Brazil) in June 2017. For the construction of the indicators, the following were analyzed: deformed and undisturbed samples at a depth of 0 -10cm. We tested the hypotheses: (i) active restoration (RA) with 5 years of implantation has better soil quality when compared to pasture areas in continuous use (PUC) and abandoned pastures without restoration actions (PA) and (ii) the soil of a fragment of Seasonal Semideciduous Forest (FES) in medium conservation stage has higher soil quality when compared to active restoration (RA), pasture areas in continuous use (PUC) and abandoned pastures without restoration actions (PA). The results describe a specific gradient for each indicator, in RA we find high quality

of the EST and DMA indicators. In the PA area we find high quality of the AGR indicator, in PUC we find low quality of the EST and DMA indicators. The standard given by ISQS was FES> RA> PA> PUC, the value of ISQS = 0.59 RA indicated average soil quality, although higher, it did not differ significantly from PA, with ISQS = 0.56 and PUC with ISQS = 0.38 refuting the first hypothesis. In the FES area, we found high soil quality with ISQS = 0.80, differing significantly from all other types of land uses, corroborating the second hypothesis. ISQS functioned as a tool to transform a large number of data into numerical information that allowed to distinguish the quality of the soil under different types of use. We conclude that after 5 years of implementation of active restoration in the Atlantic Forest it is possible to obtain an average quality in relation to the edaphic component observed in a complete way through ISQS.

Key words: 1. Active restoration 2. Soil attributes 3. General Index Soil Quality 4. Indicators

1. Introdução

A restauração ecológica é uma das principais estratégias para aliar a conservação da natureza, com retorno da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos em áreas rurais (BRANCALION; GANDOLFI; RODRIGUES, 2015). Atualmente a demanda por ações de restauração dos ecossistemas é latente no Brasil e no mundo (STRASSBURG; IRIBARREM; BEYER, 2020).

Os projetos de restauração, após implantados devem ser devidamente acompanhados, o monitoramento é fundamental, para determinar o alcance das metas estabelecidas (VIANI et al., 2017). Dentre os indicadores recomendados para o monitoramento de áreas em processo de restauração florestal temos 3 categorias principais, com exemplos do indicador avaliado: *1.Composição:* riqueza de espécie arbóreas; *2.Estrutura:* porcentagem de cobertura do solo pelas copas das árvores e *3.Funcionamento:* avaliação de um processo ecológico que irá garantir a autoperpetuação do ecossistema (VIANI et al., 2017; BRANCALION; GANDOLFI; RODRIGUES, 2015).

As medidas de processos ecológicos fazem parte da categoria de funcionamento e trabalhos que utilizaram estas métricas tem aumentando na literatura (WORTLEY; HERO; HOWES, 2013), adicionalmente a Floresta Tropical tem grande aplicabilidade para bioindicadores (GATICA-SAAVEDRA; ECHEVERRÍA; NELSON, 2017). Para capturar a variação existente nos ecossistemas é recomendada a avaliação de uma ou mais áreas de referência (RUIZ-JAEN; AIDE, 2005), para todos os biomas é preciso definir os valores de referência baseados em florestas maduras para comparar com os resultados do monitoramento (LONDE et al., 2020).

Para utilização dos processos ecológicos que ocorrem no solo, é necessário desenvolver ferramentas para analisar o solo de forma dinâmica, infelizmente, na avaliação de áreas em processo de restauração ecológica, alguns dados sobre o solo quando presentes, não recebem apropriada consideração (MENDES et al., 2019).

Greiner et al. (2017) apontam que a maioria dos estudos realizados na Europa, reportam poucas propriedades do solo e uma abordagem multifuncional do solo é necessária. O conceito de qualidade do solo representa, a capacidade de funcionamento do solo dentro das limitações do ecossistema local (DORAN, 2002). A qualidade do solo é um conceito funcional complexo, inferido por meio de indicadores obtidos das propriedades mensuráveis do solo (CHERUBIN et al., 2016).

O objetivo deste trabalho foi aplicar a metodologia desenvolvida por (VELASQUEZ; LAVELLE; ANDRADE, 2007) através do cálculo do *General Indicator of Soil Quality* (GISQ, acrônimo em inglês), aqui denominado Indicador Sintético de Qualidade do Solo (ISQS). Avaliamos a qualidade do solo em quatro tipos de uso no bioma Mata Atlântica: 1) restauração florestal ativa (RA) com 5 anos de implantação, 2)pastagens abandonadas sem ações de restauração (PA), 3)áreas de pastagem em uso contínuo (PUC) e 4) fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FES).

Utilizando análises multivariadas calculamos 4 indicadores: 16 variáveis químicas para o indicador de fertilidade do solo (FER), 09 variáveis físicas para o indicador de estrutura do solo (EST), 13 variáveis de macrofauna do solo para o

indicador de diversidade do solo (DMA) e 08 variáveis de morfologia do solo para o indicador de agregação do solo (AGR). Integramos os 4 indicadores (FER+EST+DMA+AGR) em um único Indicador Sintético de Qualidade do Solo (ISQS)

Testamos as hipóteses:

(i) A restauração florestal ativa (RA) com 5 anos de implantação tem maior qualidade do solo quando comparado com áreas de pastagem em uso contínuo (PUC) e pastagens abandonadas sem ações de restauração (PA).

(ii) O solo de um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FES) em estágio médio de conservação tem maior qualidade do solo quando comparada com a restauração florestal ativa (RA), áreas de pastagem em uso contínuo (PUC) e pastagens abandonadas sem ações de restauração (PA).

2. Material e Métodos

2.1. Área de Estudo

Localização: (23º12'53"S, 47º10'45"W), Itu - São Paulo, Brasil, bioma Mata Atlântica, fitofisionomia de Floresta Estacional Semidecidual (VELOSO, 1991), classificação climática de Koeppen Cfa, altitude: 580 metros, precipitação média anual igual a 1279mm. Dominância de Argissolos vermelho amarelo, textura média com cascalho/argilosa (ROSSI, 2017).

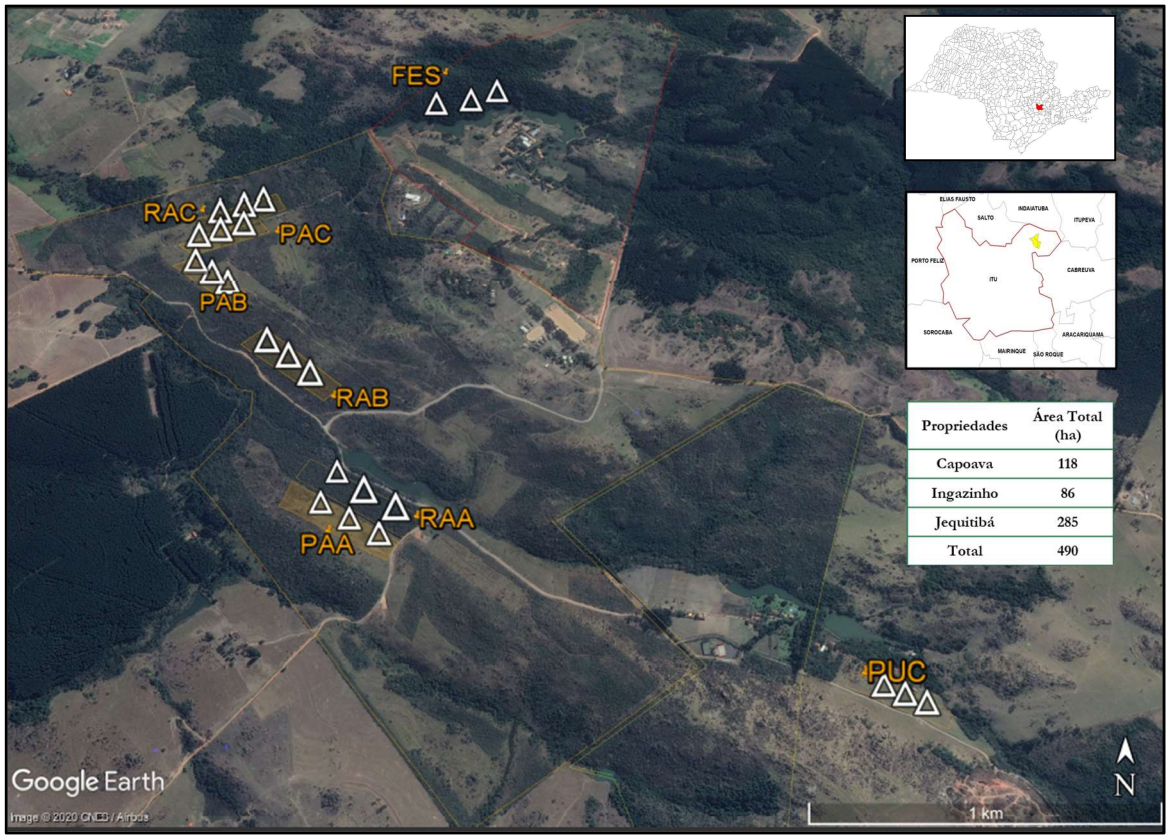
Histórico: Por opção dos proprietários e com intenção de cumprir a legislação ambiental brasileira as fazendas Capoava, Jequitibá e Ingazinho aderiram em 2012 a um Programa de Adequação Ambiental (RODRIGUES; BRANCALION; NAVE, 2012). Este programa implantou áreas de restauração ativa substituindo parte das pastagens de gado, principal atividade econômica anterior, foram realizados plantios em área total com espécies arbóreas nativas de alta diversidade e com possibilidade de exploração econômica, denominada Restauração ativa (RA), enquanto as Pastagens de Uso Contínuo (PUC) ficaram reduzidas a uma pequena área de maior aptidão agrícola, outras áreas de Pastagens foram abandonadas sem ações de restauração (PA) para futura decisão de destinação.

Metodologia de restauração florestal: O Plantio em área total é uma metodologia ativa, recomendada para áreas onde não há resiliência suficiente para sistema se estabelecer, ou seja, áreas muito degradadas, áreas sem banco de sementes, áreas distantes de fragmentos florestais, este método também é comum para atender demandas legais, porém sua premissa básica é: formar uma fisionomia florestal, recobrir uma área degradada, controlar e sombrear as gramíneas, selecionar espécies de diferentes grupos funcionais em densidade e diversidade adequadas para região (BRANCALION; GANDOLFI; RODRIGUES, 2015). Este método é aplicado através do plantio de mudas distribuídas de forma a cobrir 100% de uma área pré-estabelecida para o projeto, pode ter alto custo, mas o mesmo pode ser minimizado incluindo espécies de madeiras para uso econômico.

Manejo e implantação da restauração ativa: Houve o manejo prévio com preparo do solo, dessecamento (controle químico) do capim braquiária, subsolagem na linha do plantio (devido a alta resistência a penetração do solo encontrada nas áreas com valores de até 2,5 Mpa), não foi realizada calagem devido ao teor de Cálcio (Ca) encontrado em 2012 (8 a 41 $mmol_c/dm^3$). No plantio total o espaçamento utilizado foi de 3x2 metros, com 50% de espécies do grupo de recobrimento (função ecológica de ocupar rapidamente a área em processo de restauração e 50% espécies do grupo de diversidade (incluem-se todas as demais espécies da região, incluindo as de interesse econômico). Nas entrelinhas este plantio foi adicionada a semeadura de feijão guandu (*Cajanus cajan*) com função de adubo verde. Realizamos a coleta de amostras de solo 5 anos após a implantação das áreas de restauração ativa.

2.2. Desenho experimental

Escolhemos 8 áreas representativas nas propriedades (Figura 4): FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); RAA (restauração ativa A); RAB (restauração ativa B); RAC (restauração ativa C); PUC (pastagem de uso contínuo); PAA (pastagem abandonada A); PAB (pastagem abandonada B); PAC (pastagem abandonada C).



Propriedades	Área Total (ha)
Capoava	118
Ingazinho	86
Jequitibá	285
Total	490

Figura 4: Mapa das Fazendas Capoava, Jequitibá e Ingazinho, indicando as 08 áreas de avaliação, com 03 parcelas em formato triangular em cada área. A direita: estado de São Paulo, município de Itu, destacando em amarelo as propriedades e valores de área total das propriedades.

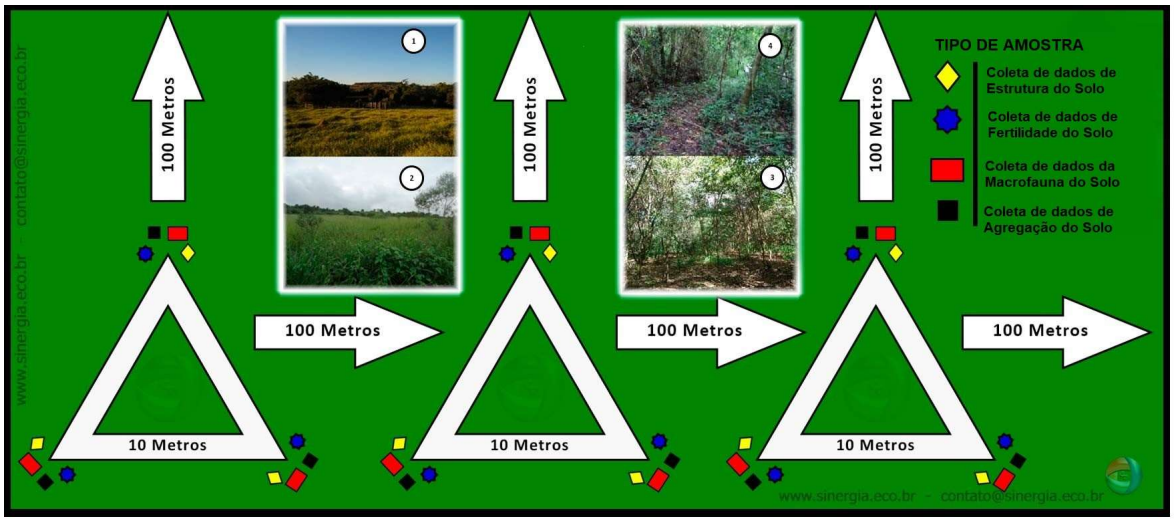


Figura 5: Detalhe de cada ponto de coleta em forma de triângulo com lateral de 10 metros, em cada vértice foram coletadas amostras de solo para análise físicos, químicos, biológicos e de agregação do solo, entre um triângulo e outro há 100 metros de distância. (1:PUC, 2:PA, 3:RA e 4: FES, fotos das áreas de coleta)

Em cada área marcamos com trena 03 parcelas triangulares, com medidas laterais de 10 metros. Foi aplicada uma borda de 100 metros entre cada parcela (Figura 5). Nos vértices de cada triângulo retiramos 4 amostras de solo para cada tipo de indicador, deformadas e indeformadas (0-10cm e 10-20cm). No entanto, apenas os dados da profundidade de 0-10cm foram utilizados no cálculo dos indicadores.

Descrição das áreas de coleta:

Fragmento de Floresta Atlântica Estacional Semidecidual (FES): área considerada conservada no programa de adequação pois possui estratos contínuos, as copas dos indivíduos se tocando em diversas alturas, presença de epífitas como orquídeas, bromélias caracterizando uma floresta pouco degradada. Essa formação é caracterizada por apresentar dossel irregular, entre 15-20 m de altura com presença de árvores emergentes de até 30 metros de altura, é uma floresta que responde ao clima, perdendo parte das folhas na estação seca (MARTINS, 2009). Neste local ocorre predominância de algumas famílias como Fabaceae, Myrtaceae, Lauraceae, Apocynaceae e Euphorbiaceae, em condições de subdossel e sub-bosque são caracterizadas pela presença marcante das famílias Meliaceae, Rutaceae, Rubiaceae, Euphorbiaceae, Sapindaceae (RODRIGUES; BRANCALION; NAVE, 2012). Representa a referência da vegetação remanescente da região, pertence a reserva legal da propriedade.

Pastagem em Uso Contínuo (PUC): Representa uma pastagem de gado extensiva (pouco manejo) cobertura vegetal de capim *Brachiaria decumbens*, representava o principal uso do solo na área das fazendas (2002 a 2012) em 10 anos não foi feito calagem e nem refeito o pasto, a alimentação do gado é somente o capim e complemento de sal mineral. Em 2013 a área de atividade de pecuária foi reduzida drasticamente, com alocação do rebanho restante em uma área menor onde já havia pastagem, esta área em 2017, mantinha-se como pastagem com uso contínuo e representa o local onde foram instaladas as parcelas para coleta de solo.

Restauração Ativa A (RAA): Representa o plantio total de espécies arbóreas nativas (1.666 indivíduos por hectare, espaçamento 3x2), sendo 50% de espécies do grupo de recobrimento (função ecológica de ocupar rapidamente a área em processo de restauração, criando um ambiente favorável ao desenvolvimento dos indivíduos do grupo de diversidade) e 50% espécies do grupo de diversidade (incluem-se todas as demais espécies da região, incluindo as de interesse econômico) nas entrelinhas este plantio foi adicionada a semeadura de feijão guandu (*Cajanus cajan*). No período da coleta deste trabalho o plantio completava 5 anos de implantação. A localização da RAA é ao sul da fazenda, suas bordas fazem limites com estradas vicinais muito utilizadas é adjacente à área PAA.

Restauração Ativa B (RAB): Representa o plantio total de espécies arbóreas nativas o mesmo realizado na RAA. No período da coleta deste trabalho o plantio completava 5 anos de implantação. A localização da RAB é na parte central da fazenda, suas bordas fazem limites com estradas vicinais que se ligam a outras propriedades e permeia a área de instalação de linhas de transmissão de energia elétrica é adjacente à área PAB.

Restauração Ativa C (RAC): Representa o plantio total de espécies arbóreas nativas, o mesmo realizado na RAA, e RAB. No período da coleta deste trabalho o plantio completava 5 anos de implantação. A localização da RAC é na parte norte da fazenda, suas bordas fazem limites com estradas vicinais pouco utilizadas, está próxima as áreas mais preservadas, ou seja, áreas com cobertura de Floresta Estacional Semidecidual. É adjacente à área PAC.

Pastagem Abandonada A (PAA): No período da coleta a área completava 5 anos de abandono predominante o capim alcançando até 120 cm de altura, não há regeneração de espécies arbóreas, registra-se apenas algumas espécies arbustivas e ruderais como o alecrim do campo ou vassourinha (*Baccharis dracunculifolia*). A localização é ao sul da fazenda, suas bordas fazem limites com estradas vicinais que fazem a ligação entre pontos dentro da propriedade e com a área de Restauração Ativa "A".

Pastagem Abandonada B (PAB): No período da coleta a área completava 5 anos de abandono e regeneração natural do banco de sementes predominante do capim alcançando até 100 cm de altura, não há regeneração de espécies arbóreas, registra-se apenas algumas espécies arbustivas e ruderais. A localização é na parte central da fazenda, suas bordas fazem limites com estradas vicinais que se ligam a outras propriedades e permeia a área de instalação de linhas de transmissão de energia elétrica. É adjacente a RAB.

Pastagem Abandonada C (PAC): No período da coleta a área completava 5 anos de abandono com capim alcançando até 100 cm de altura, nesta área observa-se maior presença de espécies arbustivas como o alecrim do campo ou vassourinha, espécie colonizadora em pastagens. A localização da RPC é na parte norte da fazenda, suas bordas fazem limites com estradas vicinais pouco utilizadas, está próxima as áreas mais conservadas, ou seja, áreas com cobertura de Floresta Estacional Semidecidual. É adjacente a RAC.

2.3. Protocolos de Amostragem e Análise Laboratorial

Avaliamos a qualidade do solo entre os tipos de uso do solo utilizando quatro indicadores, cada um calculado a partir de um conjunto diferente de atributos do solo:

(a) FER - *Indicador Fertilidade do solo:* utilizamos 200 gramas de solo seco ao ar e moído, as análises foram realizadas no Laboratório de Análises Químicas (Departamento de Solos/ESALQ) os métodos de acordo com (RAIJ et al, 2001). Incluímos no cálculo deste indicador 16 variáveis químicas: *1. pH (Acidez Ativa):* Utiliza-se 10 cm^3 de solo mais 25 ml de $CaCl_2$ (0,01mol L^{-1}), a leitura foi realizada com medidor de pH; *2. Hidrogênio + Alumínio (Acidez Potencial - H+Al):* utiliza solução SMP, a leitura é realizada com medidor de pH, mas é necessário corrigir o cálculo; *3.* Al^{+3} *(Acidez trocável):* Extração via KCl, desloca o Al do colóide, a titulação é realizada com a base NaOH (0,025ml); *4. Teor de Fósforo; 5. Teor de Potássio; 6. Teor de Cálcio; 7. Teor de Magnésio* (P, K, Ca e Mg extraídos via resina trocável); *8. SB:* Cálculo da soma de bases trocáveis; *9.* $CTC_{7,5}$*:* Capacidade de Troca Catiônica determinada no pH=7,5, sendo, SB/H+Al; *10. CTCe:* Capacidade de Troca Catiônica Efetiva é determinada no pH do solo, sendo, SB + Al. *11. Saturação por bases (% V),* sendo (100*SB) /CTC; 12. Saturação por Alumínio (M%), sendo (Al*100) /(SB+Al). *13.Teor de Carbono Total; 14. Teor de Nitrogênio:* os teores de C e N foram determinados por analisador elementar no Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura na Universidade de São Paulo (CENA/USP); 15. *Relação C/N*: Porcentagem de carbono dividida pela porcentagem de nitrogênio e *16. Estoque de Carbono:* % C x densidade do solo x profundidade expresso em Mg C por hectare.

(b) EST - *Indicador de Estrutura do solo*: Utilizamos amostras indeformadas com cilindro de metal, as análises foram realizadas no Laboratório de Física do Solo (Departamento de Solos/ESALQ). Incluímos no cálculo deste indicador 09 variáveis físicas: *1. Densidade do solo (Densidade Aparente):* calculada por (Massa seca/volume médio do cilindro); *2. Densidade de partículas (Densidade real):* Analisada no picnômetro de gás hélio (ACCUPYC 1330, Micromeritics Instrument Corporation®, Norcross, Georgia, USA); *3. Porosidade total:* calculada por {1- (Densidade do solo/Densidade de partículas)}; *4.Microporosidade:* calculada por {[(Msu – Mss) / (Mss -M)] * Ds}, sendo Msu = massa de solo úmido à tensão de 60 kPa + M; Mss = massa do solo seco; M = soma das massas do cilindro (Mc), do elástico (el) e do pano (pn) e Ds = Densidade do solo; *5.Macroporosidade*: calculada por (Porosidade total – Microporosidade); *6. Resistência a Penetração do Solo:* foram obtidas por meio de um sistema automatizado de aquisição de dados utilizando o penetrômetro eletrônico de bancada (CT3 Texture Analyzer, Brookfield, Middlebore, MA, EUA), equipado com uma célula de carga de 25 kg e uma haste de metal com ponta cônica de 30 °, diâmetro basal de 3,81 mm, e velocidade

de penetração de 10 mm min^{-1}; *7. Teor de Argila; 8. Teor de Areia e 9. Teor de Silte:* para granulometria (variáveis 7,8,9) utilizamos o método do densímetro, através da dispersão da argila).

(c) DMA - *Indicador Diversidade da macrofauna do solo*: Retiramos 03 monólitos de solo medindo 25cm² com 10cm de profundidade em cada parcela, com base na metodologia do TSBF, de Anderson & Ingram (1993). A separação manual dos invertebrados presentes nas amostras foi realizada nos alojamentos da Fazenda Capoava, durante o período de coleta de campo. Os invertebrados de corpo mole (minhocas e larvas) colocamos em formol a 4% e os invertebrados de corpo duro foram colocados em álcool 70%. Realizamos a classificação a nível taxonômico de Ordem e Classe, com auxílio de lupa estereoscópica e guias de identificação de invertebrados. Incluímos no cálculo deste indicador 13 variáveis, sendo a densidade de indivíduos por metro quadrado dos seguintes grupos taxonômicos: *1.Oligochaeta* (minhocas); *2.Térmitas ou Isopteras* (cupins); *3.Coleoptera* (besouros); *4.Formicidae* (formigas); *5.Chilopoda* (Milipede); *6.Diplopoda* (lacraia, piolho de cobra); *7.Dermaptera* (tesourinha); *8.Blattodea* (barata); 9.*Isopoda* (Crustacea - tatuzinho); *10.Aracnida* (aranhas e opiliões); *11. Hemiptera* (percevejos); *12. Imaturos* (larvas em geral) e *13. Riqueza de GT*: Número de Grupos Taxonômicos encontrados na amostra.

(d) AGR - *Indicador Agregação do solo*: Retiramos 3 monólitos de 10cm² e profundidade de 10cm, seguimos o procedimento descrito em (VELASQUEZ; LAVELLE; ANDRADE, 2007). Diferente dos métodos clássicos que medem a estabilidade de agregados do solo, este protocolo analisa a origem dos agregados, foi projetado para discriminar agregados biogênicos produzidos por organismos do solo (VELASQUEZ et al., 2007a). As amostras foram triadas e secas em estufa, no Laboratório de Ecologia e Restauração Florestal (LERF/ESALQ). Incluímos no cálculo deste indicador 08 variáveis relacionadas a agregação do solo: *1. Agregados biogênicos:* produzidos por macroinvertebrados reconhecidos por suas formas arredondadas, presença de coprólitos de minhocas e formas biogênicas decorrentes da escavação de túneis por formigas e cupins. *2. Agregados físicos*: produzidos pelo efeito das condições climáticas como umidade e secagem do solo, ou seja, esta formação é de origem física, possui formas geométricas, planas e laminar com arestas e cristas onde a origem biótica não pode ser claramente identificada; *3. Agregados de raiz:* Solo agregado preso a raiz, ou seja, o solo que estava grudado na raiz da planta, formando pequenos agregados de origem biológica, pois, as raízes produzem polissacarídeos que unem as partículas do solo, a aumentam a presença de microrganismos do solo. *4. Raízes*: Separamos as raízes (somente a parte vegetal) encontradas nas amostras do item anterior; *5. Serapilheira:* Separamos detritos orgânicos (folhas e galhos) em decomposição, não inclui as raízes. *6. Fauna do solo:* Quantificamos o número de invertebrados encontrados nas amostras. 7. *Solo sem macroagregar (<5mm)*: Separamos o restante do solo após a triagem dos itens acima, utilizamos uma peneira de 5 milímetros, representando o solo que não se encontra macroagregado. *8. Solo sem macroagregar (<2mm)*: Utilizamos uma peneira 2 milímetros, representando o solo que não se encontra macroagregado. Colocamos as amostras triadas em sacos de papel, secamos em estufa a 60°C, por 48 horas, pesamos o material e planilhamos os dados em gramas e também em porcentagem

Figura 6: Fotos das coletas de campo e análises laboratoriais para cada indicador de qualidade do solo da esquerda para direita: (a) Indicador Fertilidade do solo; (b) Indicador de Estrutura Física do solo; (c) Indicador Diversidade da Macrofauna do solo; (d) Indicador Agregação do solo.

2.4. Análise de Dados

Realizamos um procedimento em etapas para calcular o Indicador Sintético de Qualidade do Solo (ISQS) descrito em (VELASQUEZ; LAVELLE; ANDRADE, 2007). O indicador permitiu aferir resultados de baixa (0,10 a 0,40), média (0,41 a 0,70) ou alta qualidade do solo (0,71 – 1,00). A oportunidade do uso do indicador em diversos locais, está na possível variação na escolha do conjunto de dados utilizados, neste trabalho utilizamos 16 propriedades químicas, 09 propriedades físicas, 13 propriedades de diversidade da macrofauna e 08 propriedades de agregação do solo que formam respectivamente os indicadores de FER, EST, DMA AGR.

Passo 1: Exploramos os conjuntos de dados com o teste de Análise de Variância (ANOVA) e Teste Tukey para observar as diferenças dentro de cada parâmetro do solo separadamente, gerando gráficos box-plot para visualizar a variabilidade dos dados (ANEXO A). *Passo 2:* Calculamos os 4 indicadores utilizando a técnica estatística multivariada: Análise de Componente Principal (PCA, sigla em inglês) e dados da coinércia definidos pelos Fatores 1 e 2 da análise, que permitiram atribuir o "peso" de cada variável para a construção de cada indicador. Os valores brutos de cada parâmetro (químico, físico etc.) recebem o aporte dos dados gerados pela PCA, com a soma das variáveis calculadas realizamos a transformação homotética **(0,1+(Vo – Vmin) / Vmax-Vmin)*0,9)**, onde: **Vo** é o valor original da variável; **Vmin** é o valor mínimo desta variável; **Vmax** é o valor máximo desta variável, essa transformação coloca as diferentes variáveis na mesma dimensão, fornecendo um índice que varia apenas de 0,1 a 1,0. Importante ressaltar que, quando a variável se correlaciona negativamente com a qualidade do solo, utilizamos a equação: **y=1.1-[(0.1+(Vo-Vmin)/Vmáx-Vmín)*0,9.** *Passo 3*: Utilizamos a matriz de dados com o resultado dos 4 indicadores e aplicamos novamente a Análise de Componente Principais e determinamos os coeficientes que formam o cálculo do Indicador Sintético de Qualidade do Solo (ISQS), sintetizando os diferentes indicadores em um indicador sintético, ver Figura 7. *Passo 4:* Aplicamos o teste de Análise de Variância (ANOVA) e Teste Tukey aos valores dos indicadores específicos e do indicador sintético de qualidade do solo.

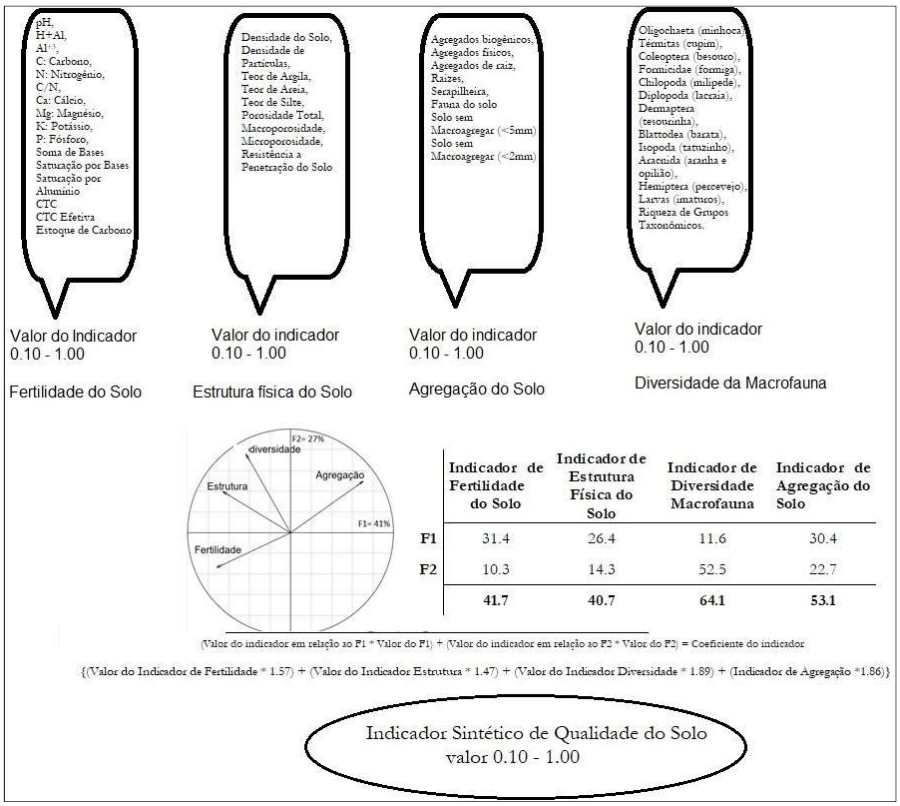


Figura 7: Diagrama do cálculo do Indicador Sintético de Qualidade do solo (ISQS), figura da autora.

3. Resultados

3.1. Indicador de Fertilidade do Solo - FER

O pH do solo variou de 5,4 a 3,8 entre as áreas estudadas, este parâmetro é o mais comumente reportado em análises no solo no monitoramento da restauração florestal (MENDES et al., 2019). Na área de Restauração ativa B (RAB) encontramos a menor média de pH e o teor mais alto de alumínio trocável, enquanto no solo do Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FES) encontramos valores de pH > 5,0. Apresentamos a variabilidade de cada atributo químico e análises de variância com breve discussão no **ANEXO A.**

Na representação gráfica da PCA com 16 variáveis químicas, os pontos amostrais do Fragmento Florestal (FES) e da Pastagem Uso Contínuo (PUC) possuem em comum a variação dos atributos químicos fortemente relacionadas ou covariantes com a matéria orgânica do solo (C, N, Estoque de Carbono, Ca, Mg, P, Soma de Bases e CTC).

Por outro lado, a maioria dos pontos amostrais das áreas de Pastagem Abandonada (PAA, PAB, PAC) e áreas em processo de Restauração ativa (RAA, RAB, RAC) têm em comum seus teores de Saturação por Alumínio, Acidez Total (H+Al) e Alumínio Trocável (Al^{+3}), direcionando o ponto centroide destes usos do solo abaixo e a esquerda do gráfico (Figura 08).

A soma de todos os fatores da PCA corresponde a 100%, é comum utilizar os 2 primeiros fatores, espera-se que os mesmos possuam a soma de 50%, como indicação de uma análise robusta, nesta análise com dados químicos do solo a soma de F1+F2 foi de 74% e o valor de F3 de 10%, ou seja, apenas nos 3 primeiros eixos temos 84% da variação total dos dados, representando a forte influência das variáveis químicas em relação aos tipos de usos do solo avaliados.

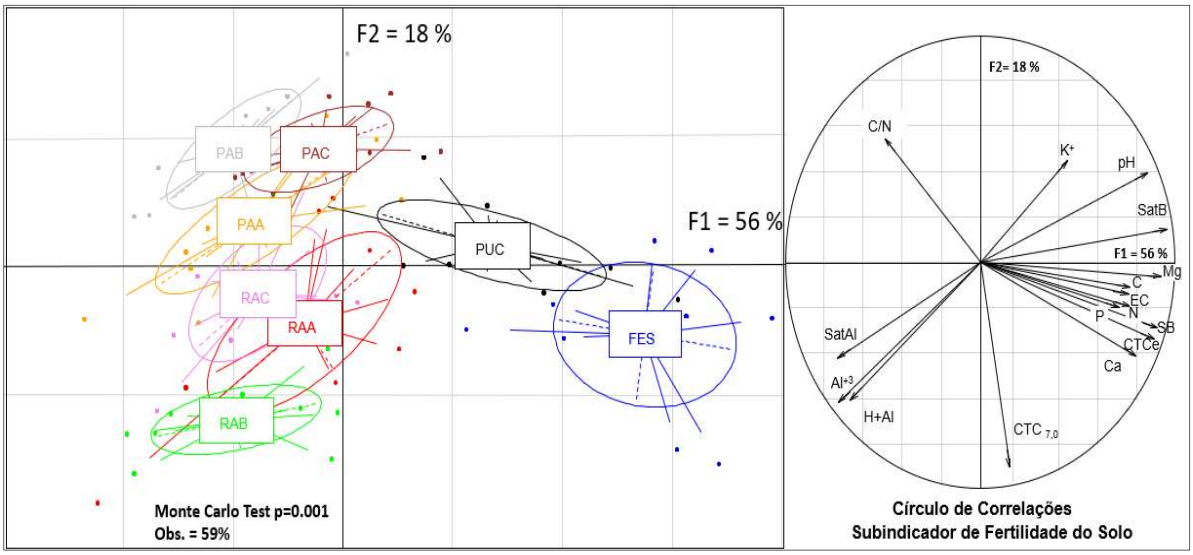


Figura 08: Análise de Componentes Principais com as variáveis químicas, amostras de 0-10cm (pH, H+Al: Acidez potencial, Al^{+3}:Alumínio Trocável, C: Carbono, N: Nitrogênio, C/N: relação carbono/ nitrogênio, Ca: Cálcio, Mg: Magnésio, K: Potássio, P: Fósforo, SB: Soma de Bases, SatB: Saturação por Bases, Sat Al: Saturação por Alumínio, $CTC_{7.0}$: Capacidade de Troca Catiônica, CTC_e: Capacidade de Troca Catiônica Efetiva, EC: Estoque de Carbono, em relação ao tipos de usos do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração ativa A); RAB (Restauração ativa B); RAC (Restauração ativa C). Formando 16 variáveis resposta e 72 observações (número de amostras), utilizamos pacote ade4 no Programa RStudio.

O Teste de permutação de Monte Carlo indicou diferença significativa entre os tipos de uso do solo (p=0.001), a observação do teste indicou que a diferença entre os tipos de usos do solo é explicada por 59% da variabilidade total dos dados químicos. Na tabela 03, apresentamos a coinércia das 16 variáveis químicas dada pela PCA, assim o "peso" dos atributos em relação aos eixos 1 e 2 da PCA foi utilizado para a construção do indicador.

Tabela 03: Fatores F1 e F2 em relação a cada variável química (pH, H+Al (Acidez potencial) e Al^{+3}(Alumínio Trocável), C: Carbono, N: Nitrogênio, C/N: relação carbono/ nitrogênio, Ca: Cálcio, Mg: Magnésio, K: Potássio, P: Fósforo, SB: Soma de Bases, SatB: Saturação por Bases, Sat Al: Saturação por Alumínio, $CTC_{7.0}$: Capacidade de Troca Catiônica, CTC_e: Capacidade de Troca Catiônica Efetiva, EC: Estoque de Carbono), os valores representam a inércia dada pela análise do Análise de Componentes Principais.

	pH	Al^{+3}	H+AL	P	K	Ca	Mg	SB	$CTC_{7.0}$	CTC_e	SatB	SatAl	N	C	C/N	EC
F1	8,1	-4,9	-5,8	5,6	2,2	7,0	9,5	9,1	0,2	8,8	10,1	-5,9	6,4	6,5	-2,6	6,3
F2	-5,3	12,7	13,2	1,3	-6,9	5,8	0,1	2,9	28	3,9	-0,7	6,1	1,2	0,4	10,3	0,6

Na planilha de cálculo do excel, multiplicamos os valores brutos das variáveis químicas, pelo seu respectivo peso (Tabela 03). Os valores resultantes foram somados e transformados homotéticamente para gerar o indicador de Fertilidade do Solo (FER), Tabela 4.

O resultado do indicador FER foi significativamente diferente entre os tipos de uso do solo ANOVA (p<0.0001, 25.97), figura 09. Nas áreas em processo de Restauração ativa (RA) o indicador de fertilidade do solo alcança um valor médio de 0,42, encontramos a escala decrescente de qualidade FES > PUC > RA > PA.

Tabela 04: Média do Indicador de Fertilidade do solo (entre parenteses o desvio-padrão) para atributos quimicos de 0-10cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual; PUC (Pastagem Uso Contínuo); RAA (Restauração ativa A); RAB (Restauração ativa B); RAC (Restauração ativa C); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C).

Tipo de Uso do solo	**FES**	**PUC**	**RAA**	**RAB**	**RAC**	**PAA**	**PAB**	**PAC**
Indicador de Fertilidade do solo	**0,81(0,2)**	**0,56(0,2)**	**0,45(0,1)**	**0,42(0,1)**	**0,38(0,1)**	**0,27(0,1)**	**0,17(0,1)**	**0,31(0,1)**

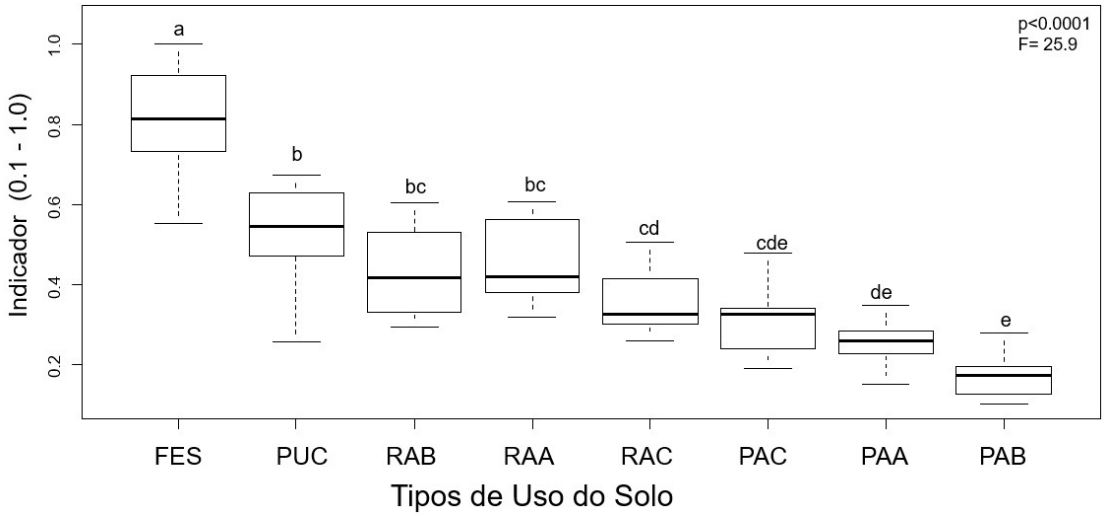


Figura 09: Gráfico do Indicador de Fertilidade do solo, na camada de 0-10cm, sendo os tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual; PUC (Pastagem Uso Contínuo); RAA (Restauração ativa A); RAB (Restauração ativa B); RAC (Restauração ativa C); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C). No gráfico letras minúsculas iguais, significa que as áreas não diferem significativamente (teste Tukey), valores de p e F correspondem ao resultado da análise de variância (ANOVA).

3.2. Indicador de Estrutura do Solo - EST

Encontramos nas áreas o teor médio de argila de 325 g/kg^{-1} e de areia de 505 g/kg^{-1}, na camada superficial do solo, em profundidade ocorre um aumento no teor de argila, em relação a granulometria o solo é franco-argilo-arenoso. A maior variação dos atributos físicos do solo, entre as áreas foram: a densidade do solo e a resistência a penetração do solo. Apresentamos a variabilidade (médias e desvio-padrão) de cada atributo físico e análises de variância (ANOVA), com breve discussão no **ANEXO A.**

Para construção do indicador de Estrutura do Solo, ao conjunto de dados físicos da camada de 0-10 cm, aplicamos a Análise de Componentes Principais, (Figura 8). A soma de F1 e F2 (60%) indicou uma análise robusta, que complementada com Teste de Monte Carlo indicou que há diferença significativa entre os tipos de uso do solo (p=0.001). A observação do teste de permutação indicou que as diferenças entre os tipos de usos do solo correspondem a 48% da variabilidade total dos dados físicos.

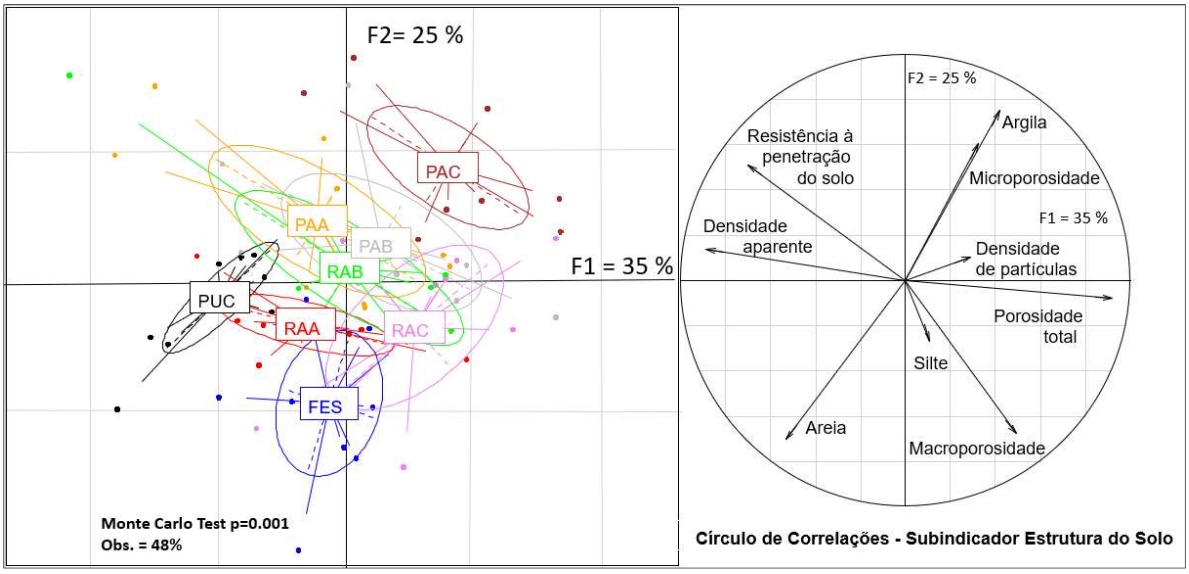


Figura 08: Análise de Componentes Principais com variáveis físicas: Densidade aparente (Densidade do Solo), Densidade de partículas (Densidade Real), Resistência à Penetração do Solo, Porosidade Total, Macroporosidade, Microporosidade, Teor de Argila, Teor de Areia e Teor de Silte, em relação aos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), RAA (Restauração Ativa A), RAB (Restauração Ativa B), RAC (Restauração ativa C). Formando 09 variáveis resposta e 72 observações (número de amostras), utilizamos o pacote ade4 no Programa RStudio.

O Fator 1 com valor de 35% separou os tipos de usos do solo (PUC) devido a seus atributos de Resistência à Penetração do solo e Densidade, das áreas Pastagem Abandonada C (PAC) com características físicas opostas, tais como teor de argila e microporosidade. O Fator 2 da PCA, com valor de 25% e separou os tipos de usos do solo em função dos atributos de textura do solo, na parte superior áreas com maior presença de argila, altamente correlacionada com a microporosidade. O teor de areia mostrou-se correlacionado com a macroporosidade, áreas como FES, RAA e o PUC possuem caráter mais arenoso.

Na tabela 04, apresentamos as coordenadas das variáveis físicas, nos eixos definidos pelos Fatores 1 e 2 da análise de componentes principais, assim utilizamos "peso" de cada atributo físico para a construção do Indicador de Estrutura do Solo. O sinal positivo e negativo se relaciona ao ponto de determinada amostra no plano cartesiano em

relação ao eixo x e y do gráfico (F1 e F2 respectivamente), respectivamente a densidade do solo, resistência à penetração do solo e teor de areia receberam sinais negativos.

Tabela 05: Fatores F1 e F2 em relação a cada variável física, também chamada de correlação ou inércia dada na análise do Análise de Componentes Principais.

Fatores PCA	Argila	Silte	Areia	Densidade do solo	Porosidade Total	Micro porosidade	Macro porosidade	Resistência à Penetração	Densidade partículas
F1	5,87	0,4	-9,33	-25,86	27,94	3,45	8,01	-16,33	2,77
F2	-24,95	3,19	21,8	-0,81	0,27	-16,34	20,47	-11,57	-0,48

As áreas de Restauração ativa (RAA, RAB e RAC) juntamente com o Fragmento de Floresta (FES) possuem uma estrutura do solo com qualidade média à alta e diferem significativamente as áreas de áreas de Pastagem Abandonada (PAA, PAB e PAC) e Pastagem Uso Contínuo (PUC) cuja estrutura do solo indica qualidade baixa a média. Nas áreas de Pastagens Abandonadas (PAC e PAB) o desvio padrão que indica maior variação entre os pontos amostrados (Figura 09), enquanto que na área de Pastagem Uso Contínuo (PUC) o desvio padrão é baixo, ou seja, todos os pontos amostrados possuem baixa qualidade física. O padrão deste subindicador em escala decrescente é: RA > FES > PA > PUC, indicando que restauração ativa após 5 anos de implantação tem boa estrutura física do solo.

Tabela 06: Média (desvio padrão entre parênteses) do Indicador de Estrutura Física do solo (0-10cm), nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), PUC (Pastagem Uso Contínuo), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), RAA (Restauração Ativa A), RAB (Restauração Ativa B), RAC (Restauração ativa C).

Tipo de Uso do solo	FES	PUC	RAA	RAB	RAC	PAA	PAB	PAC
Indicador de Estrutura do Solo	**0,65(0,13)**	**0,40(0,05)**	**0,66(0,12)**	**0,65(0,21)**	**0,77(0,12)**	**0,46(0,22)**	**0,57(0,19)**	**0,49(0,17)**

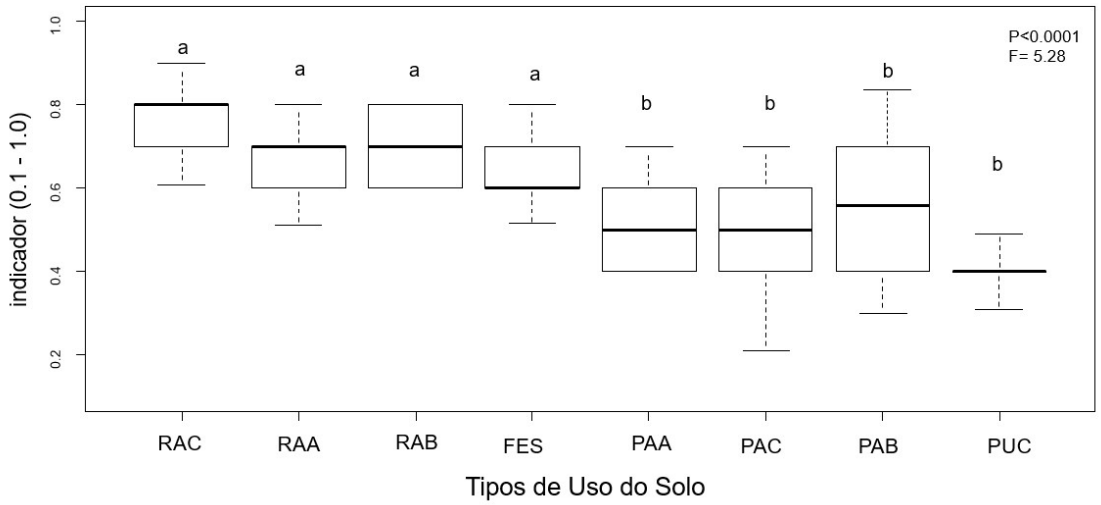


Figura 11: Variabilidade do Indicador de Estrutura Física do solo na camada de 0 -10cm , em diferentes usos do solo, FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), PUC (Pastagem Uso Contínuo), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), RAA (Restauração Ativa A), RAB (Restauração Ativa B), RAC (Restauração ativa C). Letras iguais não há diferença significativa segundo o teste de Tukey, valores p e F referente a ANOVA.

3.3. Indicador de Diversidade da Macrofauna do Solo - DMA

Calculamos o Indicador de Diversidade da Macrofauna do solo com dados da camada de 0-10cm, utilizamos a densidade de indivíduos por metro quadrado de 12 Grupos Taxonômicos (GT) e o valor de riqueza de grupos taxonômicos. Nas áreas de Restauração ativa (RA) encontramos a maior riqueza da macrofauna do solo, com alta densidade de formigas e cupins, enquanto a menor riqueza ocorreu na Pastagem de Uso Contínuo (PUC) com maior densidade de coleópteras e minhocas. Apresentamos a variabilidade de cada atributo da macrofauna do solo, análises de variância e breve discussão no **ANEXO A.**

Com a redução dos dados através da PCA observamos quais as variáveis que melhor diferenciam a diversidade da macrofauna entre os tipos de uso (Figura 12). A soma dos dois primeiros fatores da análise é de 40%, ou seja, menor que 50% demostrando que as diferenças químicas e físicas entre as áreas foram mais acentuadas que as diferenças entre dos GT da macrofauna do solo, a observação do teste de permutação indicou que a diferença entre os tipos de usos do solo é explicada por 23% da variabilidade total dos dados da macrofauna. O teste de Monte Carlo indicou diferença significativa entre os tipos de uso do solo (p=0.001).

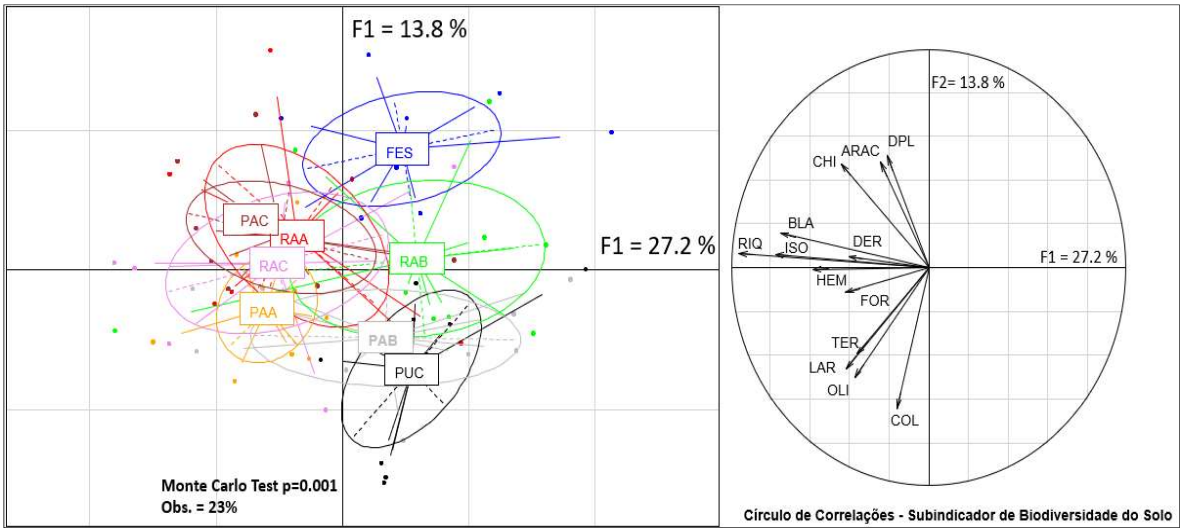


Figura 12: Análise de Componentes Principais para as variáveis biológicas na camada de 0-10cm, são: OLI (Minhocas) , TER (Cupins), COL (Coleópteras), FOR (Formigas), CHI (Chilopodas), DPL(Diplopodas), DER (Dermapteras), BLA (Baratas), ISO (Isopodas), ARAC (Aracnídeos), HEM (Hemíptera), LAR (Larvas), RIQ (Riqueza de GT), tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), RAA (Restauração Ativa A), RAB (Restauração Ativa B), RAC (Restauração ativa C). Formando 13 variáveis biológicas, com 72 observações, utilizando pacote ade4 no Programa RStudio.

O Fator 1 (27%) separou as áreas de Restauração ativa (RAA e RAC) e áreas de Pastagem Abandonada (PAC, PAA,) com maior riqueza de grupos taxonômicos, das áreas de Pastagem Uso Contínuo (PUC), Fragmento de Floresta (FES) e áreas "B" (PAB, RAB) que possuem menor riqueza de GT. O Fator 2 (13%) separou áreas FES, PAC, RAA, RAC e RAB com maior densidade Diplopodas, Chilopodas, Aracnídeos, Blattodea, Dermaptera e Isoptera das áreas PUC, PAB e PAA que possuem maior densidade de Coleópteras, Minhocas, Cupins e Larvas.

Para a construção do indicador utilizamos os valores de coinércia do Fator 1 e Fator 2 para cada uma das variáveis biológicas inseridas na Análise de Componentes Principais (Tabela 07). Consideramos positiva a influência

de todas as variáveis localizadas no mesmo quadrante da Riqueza de GT e negativos as variáveis no quadrante oposto, pois consideramos a Riqueza de Grupos Taxonômicos como atributo que mais contribui para a diversidade biológica.

Tabela 07: Fator 1 e Fator 2 da PCA para cada uma das variáveis biológicas, na camada de 0-10cm, são elas: OLI (Minhocas), TER (Cupins), COL (Coleopteras), FOR (Formigas), CHI (Chilopodas), DPL(Diplopodas), DER (Dermapteras), BLA (Baratas), ISO (Isopodas), ARAC (Aracnideos), HEM (Hemiptera), LAR (Larvas), RIQ (Riqueza de Grupos Taxonômicos).

Fatores PCA	OLI	TER	COL	FOR	CHI	DPL	DER	BLA	ISO	ARAC	HEM	LAR	RIQ
F1	3,9	3,74	0,72	5,03	5,59	1,25	4,66	15,82	16,96	1,66	9,68	4,95	25,98
F2	-14	-8,7	-22,89	-0,75	12,5	14,41	0,14	1,36	0,2	12,85	0,002	-11,87	0,21

O indicador de diversidade da macrofauna (DMA) aferido para as áreas RAA (0,64) e PAC (0,66) foram os mais elevados, pois, estas áreas apresentam a maior riqueza de grupos taxonômicos (Tabela 08).

Tabela 08: Média do Indicador de Diversidade da Macrofauna (desvio-padrão entre parênteses), dados de 0-10cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), PUC (Pastagem Uso Contínuo), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), RAA (Restauração Ativa A), RAB (Restauração Ativa B), RAC (Restauração ativa C).

Tipo de Uso do solo	FES	PUC	RAA	RAB	RAC	PAA	PAB	PAC
Indicador de Diversidade da Macrofauna	**0,60(0,15)**	**0,23(0,11)**	**0,64(0,25)**	**0,44(0,23)**	**0,58(0,19)**	**0,56(0,23)**	**0,34(0,25)**	**0,66(0,19)**

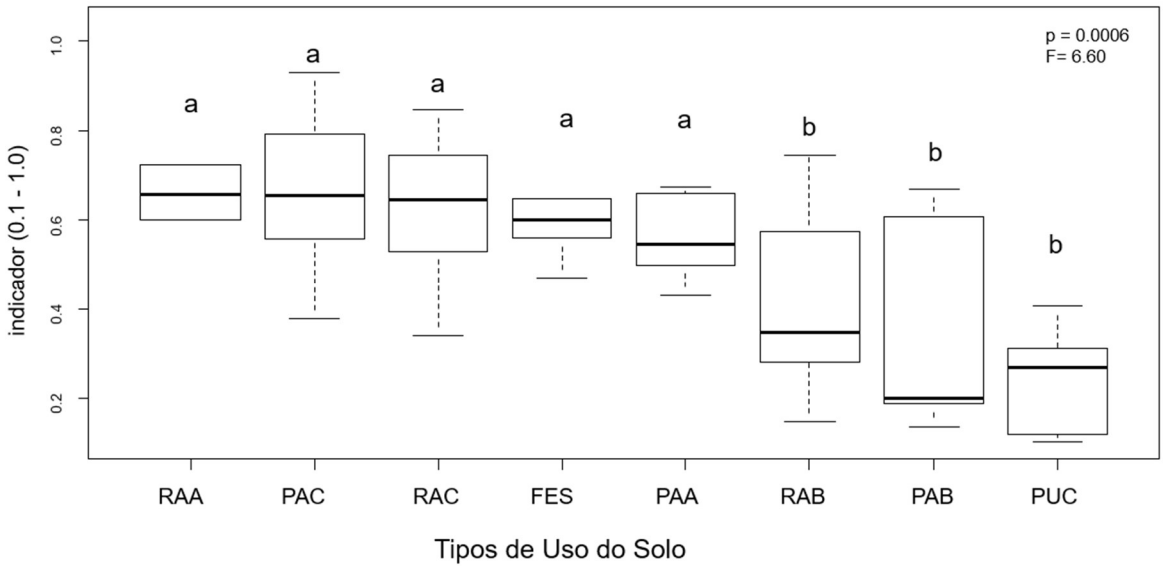


Figura 13: Indicador de diversidade da Macrofauna do solo, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), PUC (Pastagem Uso Contínuo), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), RAA (Restauração ativa A), RAB (Restauração ativa B), RAC (Restauração ativa C). Letras iguais não há diferença significativa segundo o teste de Tukey.

Na Figura 13, as áreas RAA, PAC, RAC, PAA não diferem significativamente do Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FES), indicando boa qualidade destas áreas, para este indicador. Este resultado mostra que a colonização da macrofauna do solo na restauração ecológica é bastante relevante, pois as comunidades de

invertebrados são altamente sensíveis e respondem rapidamente as mudanças na disponibilidade de recursos e condições de habitat.

3.4. Indicador de Agregação do Solo - AGR

Os agregados biogênicos são formados pela interação dos organismos edáficos com as partículas do solo, são importantes para a formação do solo, sua presença pode representar melhor qualidade ao solo, a formação de agregados permite a conservação do carbono no solo (LAVELLE et al., 2020). Apresentamos a variabilidade de cada atributo de agregação do solo, análises de variância e breve discussão no **ANEXO A.**

Calculamos o Indicador de Agregação do Solo (AGR) através da Análise de Componentes Principais (PCA) (Figura 14). O Fator 1 da análise PCA explicou 27 % da variabilidade dos dados e separou áreas à esquerda do gráfico as áreas de Restauração ativa e Fragmento de Floresta (RAA, RAB, RAC, FES) onde predominam Agregados Biogênicos, dos tipos de uso do solo localizados a direita do gráfico (PAA, PAB, PAC e PUC) onde predominam Agregados Físicos e Agregados de Raízes, ou seja, separou as áreas cobertas por vegetação nativa das áreas com cobertura de gramíneas. O teste de Monte-Carlo (p=0.001) indicou há diferença significativa entre as áreas, a observação do teste de permutação indica que 31% da diferença entre os tipos de uso do solo é explicada pelos atributos de agregação.

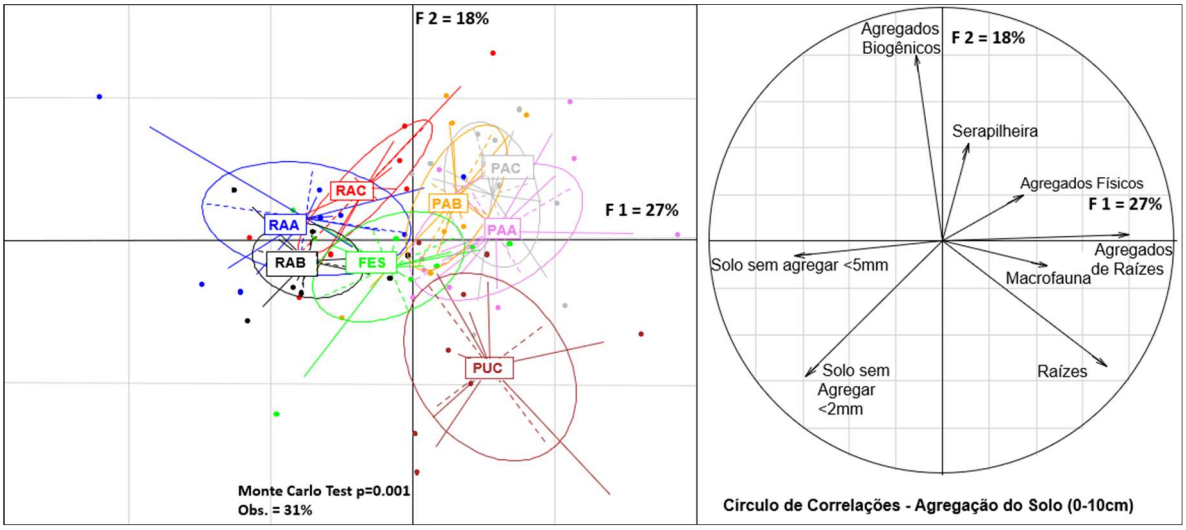


Figura 14: Análise de Componente Principais (PCA) com 08 variáveis de Agregação ou Morfologia do solo: Agregados Biogênicos, Agregados Físicos, Agregados de Raiz, Raízes, Serrapilheira, Macrofauna e Solo sem agregar (>5mm e >2mm) na profundidade de 0-10cm, em relação aos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), PUC (Pastagem Uso Contínuo), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), RAA (Restauração ativa A), RAB (Restauração ativa B), RAC (Restauração ativa C).

Na tabela 09, apresentamos valores de Fator 1 e Fator 2 gerados pela da PCA para cada um dos atributos de agregação do solo, no cálculo do indicador sinais negativos foram atribuídos aos atributos considerados prejudiciais para qualidade do solo são eles: Agregados Físicos e Solo sem macroagregar (>2mm). Apresentamos os valores finais do Indicador de Agregação do Solo para cada tipo de uso do solo na Tabela 10 e na Figura 15.

Tabela 06: Fatores F1 e F2 em relação a cada variável do Indicador de Agregação do Solo.

	Macrofauna	Agregados Biogênicos	Agregados Físicos	Serrapilheira	Raízes	Agregados de Raiz	Solo Sem Agregar (>5mm)	Solo Sem Agregar (<2mm)
F1	9,25	0,60	-5,29	0,52	22,10	28,58	18,16	-5,45
F2	0,76	42,6	-2,67	11,87	19,10	0,05	0,26	-22,50

Tabela 10: Média do Indicador de Agregação do Solo (desvio padrão entre parenteses), tipos de usos do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), PUC (Pastagem Uso Contínuo), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), RAA (Restauração ativa A), RAB (Restauração ativa B), RAC (Restauração ativa C).

Tipo de Uso do solo	FES	PUC	RAA	RAB	RAC	PAA	PAB	PAC
Indicador de Agregação do Solo	0,56(0,1)	0,55(0,1)	0,42(0,1)	0,48(0,09)	0,58(0,1)	0,78(0,1)	0,81(0,1)	0,79(0,07)

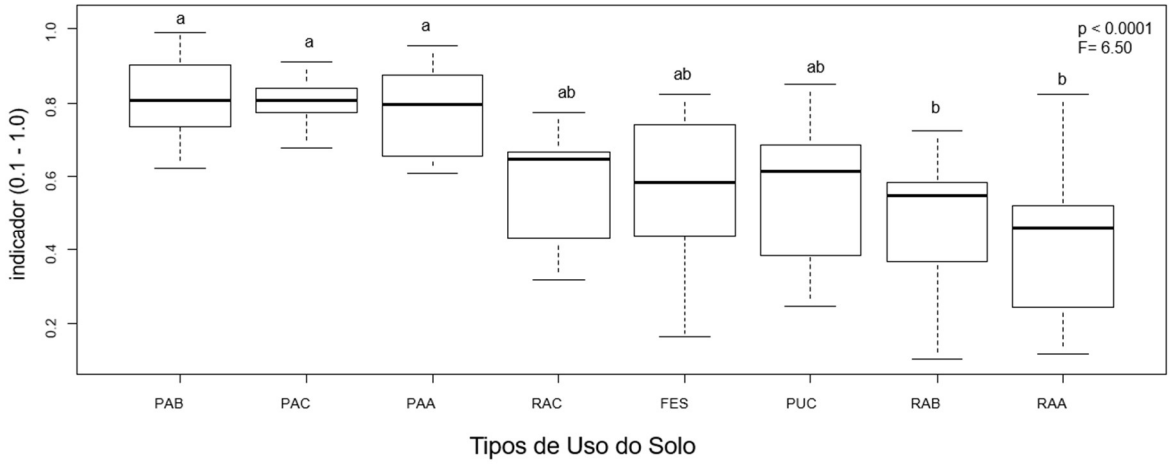


Figura 15: Indicador de Agregação do Solo na profundidade de 0-10cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), PUC (Pastagem Uso Contínuo), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), RAA (Restauração ativa A), RAB (Restauração ativa B), RAC (Restauração ativa C).

Para este indicador encontramos a escala decrescente de qualidade de agregação do solo: PA>FES>PUC>RA. Nas áreas de Pastagem Abandonada encontramos alta qualidade de agregação do solo, enquanto nos outros tipos de uso do solo, encontramos qualidade média, nestas áreas é possível que a retirada do gado tenha permitido maior agregação do solo, facilitada pela grande quantidade de matéria orgânica depositada e a proteção do solo realizada pelas raízes das gramíneas.

3.5. Indicador Sintético de Qualidade do Solo (ISQS)

Formatamos o ISQS a partir de informações dos atributos químicos, físicos, biológicos e de agregação do solo, cujos cálculos apresentamos nos 04 indicadores de qualidade FER, EST, DMA e AGR. A primeira etapa consistiu em preparar uma matriz contendo o valor de cada indicador para aplicação na Análise de Componentes Principais (PCA) que determinou a influência de cada indicador na separação dos tipos de uso do solo (Figura 16). Detectamos uma forte correlação positiva entre o indicador de Diversidade da Macrofauna, Agregação do solo e Estrutura do solo.

Os tipos de uso do solo diferem significativamente de acordo com o teste de Monte Carlo (p=0.001), a observação do teste de permutação indica que 50% da variabilidade total é explicada pela diferença dos valores indicadores de cada tipo de uso do solo.

O Fator 1 de 41% separou os tipos de uso do solo FES, RAA, RAC, RAB com maior influência dos indicadores de Fertilidade, Estrutura Física e Diversidade dos tipos de uso do solo PUC, PAA, PAB e PAC com maior influência do Indicador de Agregação do solo. O Fator 2 de 27% separou as áreas de Pastagens Abandonadas e duas áreas de Restauração Ativa, com grande aporte dos Indicadores da Estrutura Física e da Diversidade da Macrofauna, das áreas FES, RAB e PUC com maior aporte do Indicador de Fertilidade do Solo.

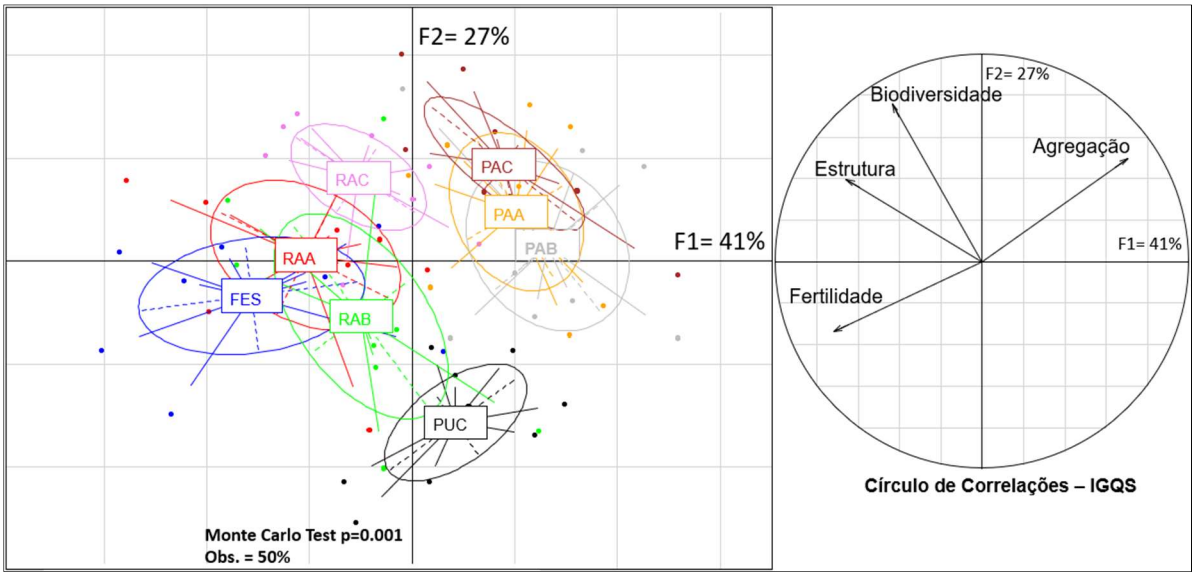


Figura 16: Análise de Componentes Principais para construção do Indicador Sintético de Qualidade do Solo (ISQS), em relação aos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), PUC (Pastagem Uso Contínuo), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), RAA (Restauração ativa A), RAB (Restauração ativa B), RAC (Restauração ativa C). Total de 04 variáveis resposta e 72 observações, utilizamos o pacote ade4 no Programa RStudio.

Na tabela 11, apresentamos valores de coinércia de Fator 1 e Fator 2 gerados pela da PCA para cada um dos 4 indicadores.

Tabela 11: Valores de coinércia de Fator 1 e Fator 2 gerados pela da PCA para cada um dos 4 indicadores.

	Indicador de Fertilidade do Solo	Indicador de Estrutura Física do Solo	Indicador de Diversidade Macrofauna	Indicador de Agregação do Solo
F1	31,4	26,4	11,6	30,4
F2	10,3	14,3	52,5	22,7
	41,7	**40,7**	**64,1**	**53,1**

Tabela 12: Cálculo do coeficiente para cada indicador para gerar a formula do cálculo do ISQS.

	Contribuição do atributo em relação ao F1 da análise	Contribuição do atributo em relação ao F2 da análise	Valor do F1 do eixo 1 da PCA	Valor do F2 do eixo 2 PCA
Indicador Fertilidade – FER	31,4	10,3	0,41	0,27
Indicador Estrutura – EST	26,4	14,3	0,41	0,27
Indicador Diversidade – DMA	11,6	52,5	0,41	0,27
Indicador Agregação – AGR	30,4	22,7	0,41	0,27
	Contribuição F1 * Valor F1	**Contribuição F2 * Valor F2**	**Soma**	**Fator ou coeficiente**
Indicador Fertilidade – FER	12,874	2,781	15,655	1,57
Indicador Estrutura – EST	10,824	3,861	14,685	1,47
Indicador Diversidade – DMA	4,756	14,175	18,931	1,89
Indicador Agregação – AGR	12,464	6,129	18,593	1,86
Fórmula ISQS = FER * 1,57 + EST * 1,47+ DMA *1,89 + AGR *1,86				

Para construção da fórmula do ISQS, utilizamos os valores de coinércia multiplicando-os pelos fatores referentes ao eixo F1 (41% = 0,41) e do eixo F2 (27%=0,27) da análise gráfica resultando no coeficientes de cada indicador, exemplo: (Valor do indicador de fertilidade em relação ao F1 * Valor do F1) + (Valor do indicador de fertilidade em relação ao F2 * Valor do F2) = Coeficiente do indicador de fertilidade (Tabela 12).

Aplicamos a fórmula ISQS = FER * 1,57 + EST * 1,47+ DMA *1,89 + AGR *1,86, na matriz inicial e ao resultado final aplicamos a transformação homotética gerando o ISQS que varia de 0,10 a 1,00. A análise de variância (ANOVA) obteve resultado significativo ($p<0,0001$) indicando diferenças entre os tipos de uso do solo (Figura 17).

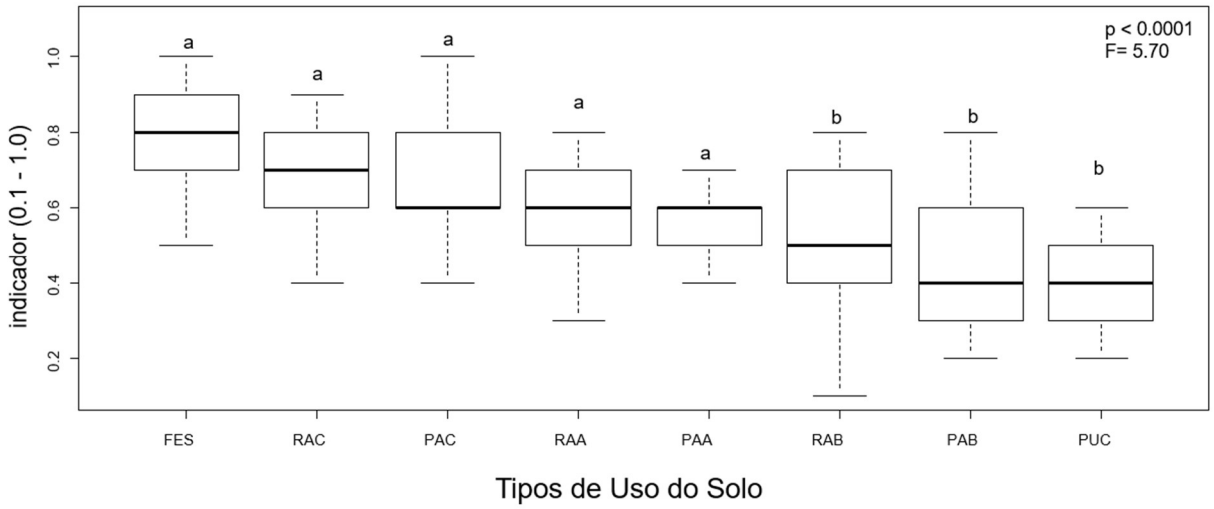


Figura 17: Indicador Sintético de Qualidade do Solo (ISQS) na profundidade de 0-10cm, usando 4 indicadores (FER,EST,DMA,AGR) em relação aos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional SemideciduaL, PUC (Pastagem Uso Contínuo), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), RAA (Restauração ativa A), RAB (Restauração ativa B), RAC (Restauração ativa C). Letras iguais indicam que não há diferença significativa de acordo com teste Tukey.

O Fragmento de Floresta (FES) consolidou-se como uma referência positiva com alta qualidade do solo, ISQS > 0,71, enquanto a Pastagem Uso Contínuo (PUC) consolidou-se como referência negativa com baixa qualidade do solo, ISQS<0,40. As áreas de Restauração ativa (RAA e RAC) e Pastagem Abandonada (PAA e PAC) apresentam após 5 anos qualidade média, ou seja, ISQS entre 0,41 e 0,70, porém indicadores foram mais baixos nas áreas de Restauração ativa B (RAB) e Pastagem Abandonada B (PAB), Tabela 13.

O resultado do ISQS em ordem decrescente de qualidade do solo foi FES>RA>PA>PUC, reduzindo os dados através das médias das áreas de restauração ativa e pastagens abandonadas não há diferença significativa entre RA, PA e PUC.

Tabela 13: Média e desvio padrão entre parenteses, do ISQS na camada de 0-10cm nos diferentes tipos de usos do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), PUC (Pastagem Uso Contínuo), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), RAA (Restauração ativa A), RAB (Restauração ativa B), RAC (Restauração ativa C). Na linha inferior RA (média RAA, RAB, RAC) e PA (média PAA, PAB, PAC), letras iguais indicam que não há diferença significativa de acordo com teste Tukey.

Tipo de Uso	FES	PUC	RAA	RAB	RAC	PAA	PAB	PAC
ISQS (4 indicadores)	0,80a(0,16)	0,38b(0,14)	0,59a(0,15)	0,48b(0,24)	0,70a(0,16)	0,56a(0,16)	0,44b(0,18)	0,68a(0,20)
	FES	**RA**	**PA**	**PUC**				
	0,80a(0,16)	0,59b(0,14)	0,56b(0,10)	0,38b(0,14)				

4. DISCUSSÃO

4.1. Indicadores com alta e média qualidade do solo na restauração ativa

Nas áreas em processo de restauração ativa após 5 anos de implantação, encontramos alta qualidade do solo (0,65-0,77) para o indicador de estrutura física do solo (EST). Em áreas em processo de restauração com 1, 6 e 8 anos Domínguez-Haydar et al. (2019) encontraram os respectivos indicadores de qualidade física 0,19, 0,55 e 0,76, segundo estes autores a resposta na recuperação da qualidade física do solo pode ser mais rápida em relação a qualidade química. Lavelle et al. (2014) recomendam medidas de macro e microporosidade do solo para aferir sobre o serviço

ecossistêmico de armazenamento e infiltração de água no solo. Estudando um conjunto de atributos físicos (PEREIRA et al., 2020) encontrou que mesmo uma floresta degradada ainda possui baixos valores de densidade do solo e valores maiores de macroporosidade do solo, pois embora tenha sofrido alguma degradação no passado, ainda mantém sua funcionalidade. Nas processo de restauração ativa encontramos maior macroporosidade em relação as áreas de pastagem de uso contínuo e pastagem abandonada, os macroporos permitem a livre movimentação de ar e condução de água, enquanto áreas compactadas podem registar maior microporosidade.

O indicador de diversidade da macrofauna do solo das áreas RA (0,55), não diferiu do valor aferido para o fragmento de floresta, FES (0,60). Nas áreas de restauração ativa encontramos a maior riqueza da macrofauna do solo com 13 grupos taxonômicos, esta metodologia com alta diversidade de espécies arbóreas, pode oferecer a biota do solo recursos alimentares e refúgio, corroborando com Amazonas et al., (2018) que encontraram 14 grupos taxonômicos em áreas em processo de restauração ativa com 2 anos, segundo estes autores estas áreas obtiveram maior riqueza um fragmento de floresta conservado. Representando uma referência negativa a Pastagem de Uso Contínuo (PUC) apresentou baixa biodiversidade do solo (0,23) onde predominam engenheiros do ecossistema oligochaeta (minhocas) e Termitas (cupins). Na Colômbia, Marichal et al., (2014) encontraram o indicador da macrofauna do solo com valor alto para pastagem abandonada (0,73) e menor nas áreas referência de Savana Nativa (0,58), em nossas áreas de Pastagem Abandonada (PA) o indicador de diversidade da macrofauna é médio (0,52). Em áreas de Mata Atlântica a biodiversidade do solo pode favorecer a resiliência para sustentar os estados desejáveis dos ecossistemas, os locais com alta diversidade têm acentuada presença dos grupos funcionais detritívoros (decompositores) e de predadores, por exemplo, dermapteras (predadores) foram abundantes nas áreas em processo de restauração ativa. Os diplopodas podem ser usados como bioindicadores no monitoramento de áreas em processo de restauração (SNYDER; HENDRIX, 2008). No fragmento de floresta (FES) encontramos alta densidade de chilopodas, diplopodas e aracnídeos, em áreas de restauração florestal com mais de 20 anos de implantação, Vasconcellos et al., (2013b) encontraram maior abundância de diplopodas e chilopodas.

Para o indicador de agregação do solo, o valor encontrado (0,49) indica qualidade média nas áreas RA, não diferindo dos valores encontrados para FES (0,56) e PUC (0,55), este indicador foi classificado como alto apenas nas áreas de Pastagens Abandonadas (PA). Em Florestas Secundárias (VELASQUEZ; LAVELLE; ANDRADE, 2007) encontraram baixo valor (0,33) para este indicador e um pouco mais alto para Pastagem (0,41), segundo estes autores nas áreas de agricultura e áreas abandonadas apresentaram alta qualidade da agregação do solo.

4.2. Indicador com baixa qualidade para Restauração ativa

O indicador de fertilidade do solo (FER), calculado a partir de atributos químicos apresentou valores (0,45-0,38) que indicam baixa qualidade do solo nas áreas em processo de restauração ativa após 5 anos de implantação. Na Colômbia, em áreas nativas de savana e plantações de palma, Lavelle et al. (2014) encontraram valores baixos (0,31 e 0,32) para o indicador com dados químicos. Após 6 anos de implantação de restauração ativa em tecnossolos, Domínguez-Haydar et al.(2019) encontraram o indicador de fertilidade com valor de 0,31, representando baixa qualidade química na área, neste mesmo estudo, mesmo com 20 anos após o plantio as áreas ainda mantinham um valor baixo deste indicador, corroborando a lenta recuperação da fertilidade de uma área em processo de restauração.

Em nossa área de estudo nas áreas de Pastagens Abandonadas por 5 anos, sem ações de restauração, o valor do indicador de Fertilidade do solo é ainda mais baixo (0,23) neste cenário sem plantio, a ciclagem de nutrientes tornou-se ainda mais reduzida, demonstrando então que a Restauração ativa é mais eficaz para o aumento do serviço

ecossistêmico de fertilidade do solo, em relação ao abandono da área sem nenhuma intervenção. Deve-se destacar que este plantio ainda não alcançou uma qualidade química elevada, também devido aos altos teores de alumínio trocável que podem estar inibindo nutrientes importantes da CTC, reduzindo a soma de bases trocáveis no solo. Na área referência representada pelo Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual o indicador FER tem qualidade alta (0,81) possivelmente devido ao equilíbrio dos processos abaixo do solo tais como decomposição e mineralização da matéria orgânica. A Pastagem em Uso Contínuo, tem média qualidade para o indicador de fertilidade do solo, possivelmente devido a qualidade do pasto e ao input de matéria orgânica dos excrementos do gado.

4.3. Indicador Sintético de Qualidade do Solo - ISQS

O padrão do ISQS foi FES>RA>PA>PUC, o valor final para as áreas RA, com ISQS=0,59 apesar de mais alto, não diferiu significativamente das áreas de PA, com ISQS=0,56 e das áreas PUC com ISQS=0,38, refutando a primeira hipótese. Apenas o Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FES) possui alta qualidade do solo com ISQS=0,80 e difere significativamente de todos outros usos do solo, corroborando a segunda hipótese.

A sensibilidade do indicador mostrou que comparando par a par as áreas de restauração ativa e as áreas de pastagens abandonadas: RAA (0,59) x (0,56) PAA; RAB (0,48) x (0,44) PAB; RAC (0,70) x (0,68) PAC, é clara a melhor qualidade do solo na Restauração Ativa. Áreas com mesma metodologia de restauração, desenvolveram-se de forma diferente, pois na RAC com localização geográfica mais próxima do fragmento de floresta apresentou a qualidade mais alta. Áreas com maior potencial ácido no solo RAB desenvolveram-se pouca fertilidade do solo e sua qualidade está mais próxima do nível baixo.

5. CONCLUSÃO

O ISQS funcionou como ferramenta eficiente para transformar um número elevado de dados do solo em informações numéricas que permitiram distinguir quais áreas possuem alta, média ou baixa qualidade do solo. O ISQS foi sensível as alterações entre os tipos de uso do solo, a alta variabilidade indica o potencial de melhorias nas áreas com indicadores baixos. A referência positiva em termos de qualidade do solo foi o fragmento de floresta atlântica estacional semidecidual, permitindo ao restaurador determinar características do solo em um ambiente desejável e a referência negativa a pastagem de uso contínuo. Nas áreas em processo de restauração ativa com 5 anos, a qualidade do solo é maior do que na pastagem sem ações de restauração pelo mesmo período de tempo. O fragmento florestal, mesmo inserido numa paisagem bastante alterada antropicamente pode manter seus processos ecológicos em estabilidade e bom funcionamento. Concluímos que após 5 anos de implantação da restauração ativa na Mata Atlântica é possível obter uma qualidade média em relação ao componente edáfico observado de forma completa através do ISQS.

Referências

AMAZONAS, N. T. et al. Soil macrofauna density and diversity across a chronosequence of tropical forest restoration insoutheastern Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 78, n. 3, p. 449–456, 2018.

ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 6, p. 1945–1962, 2004.

ANZALONE, R. A. et al. Establishing reference values for soil microbial biomass-C in agroecosystems in the Atlantic

Forest Biome in Southern Brazil. **Ecological Indicators**, v. 117, n. March 2019, p. 106586, 2020.

ARONSON, J. What can and should be legalized in ecological restoration? **Revista Árvore**, v. 34, n. 3, p. 451–454, 2010.

BENNETT, E. M.; PETERSON, G. D.; GORDON, L. J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. **Ecology Letters**, v. 12, n. 12, p. 1394–1404, 2009.

BRANCALION, P. H. S.; GANDOLFI, S.; RODRIGUES, R. R. **Restauração florestal**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

BÜNEMANN, E. K. et al. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, n. September 2017, p. 105–125, 2018.

CALLAHAM, M. A.; RHOADES, C. C.; HENEGHAN, L. A striking profile: Soil ecological knowledge in restoration management and science. **Restoration Ecology**, 2008.

CARDOSO, E. J. B. N.; VASCONCELLOS, R. L. F. P. P.-P. **Floresta com araucária: composição florística e biota do solo**FEALQ, , 2015.

CARDOSO, E. J. N. et al. Soil health : looking for suitable indicators . What should be considered to assess the effects of use and management on soil health ? n. August, p. 274–289, 2013.

CATANI, R. A. **Analise quimica para avaliar a fertilidade do solo**. Piracicaba: Piracicaba Esalq, 1974.

CHERUBIN, M. R. et al. Soil Quality Indexing Strategies for Evaluating Sugarcane Expansion in Brazil.(Research Article). **PLoS ONE**, v. 11, n. 3, p. e0150860, 2016.

CUI, J.; HOLDEN, N. M. The relationship between soil microbial activity and microbial biomass, soil structure and grassland management. **Soil and Tillage Research**, v. 146, n. PA, 2015.

DECAËNS, T. et al. The values of soil animals for conservation biology. **European Journal of Soil Biology**, v. 42, n. SUPPL. 1, 2006.

DOMINATI, E.; PATTERSON, M.; MACKAY, A. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. **Ecological Economics**, v. 69, n. 9, p. 1858–1868, 2010.

DOMÍNGUEZ-HAYDAR, Y. et al. Evaluation of reclamation success in an open-pit coal mine using integrated soil physical, chemical and biological quality indicators. **Ecological Indicators**, v. 103, n. March, p. 182–193, 2019.

DORAN, J. W. **Soil health and global sustainability: Translating science into practice**. Agriculture, Ecosystems and Environment. **Anais**...fev. 2002Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167880901002468>

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 5, p. 601–606, 1988a.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 5, p. 601–606, 1 jan. 1988b.

EMMET-BOOTH, J. P. et al. **A review of visual soil evaluation techniques for soil structureSoil Use and Management**, 2016.

FOLGARATI, P. F. Ant biodiversity and its realtionship to ecosystem function: a review. **Biodiversity and Conservation**, v. 7, p. 1221–1244, 1998.

GATICA-SAAVEDRA, P.; ECHEVERRÍA, C.; NELSON, C. R. Ecological indicators for assessing ecological success of forest restoration : a world review. v. 25, n. 6, p. 850–857, 2017.

GERLACH, J.; SAMWAYS, M.; PRYKE, J. Terrestrial invertebrates as bioindicators: An overview of available taxonomic groups. **Journal of Insect Conservation**, v. 17, n. 4, p. 831–850, 2013.

GONÇALVES, J. L. DE M. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: Piracicaba FEALQ, 2000.

GREINER, L. et al. Soil function assessment: review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services. **Land Use Policy**, v. 69, n. September, p. 224–237, 2017.

GUERRA, A. et al. Ecological restoration in Brazilian biomes: Identifying advances and gaps. **Forest Ecology and Management**, v. 458, n. December, 2020.

HARRIS, J. **Soil microbial communities and restoration ecology: Facilitators or followers?Science**, 2009.

HENEGHAN, L. et al. Integrating Soil Ecological Knowledge into Restoration Management. **Restoration Ecology**, v. 16, n. 4, p. 608–617, dez. 2008.

HOLLING, C. S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. **Ecosystems**, v. 4, n. 5, p. 390–405, 2001.

KANG, H. et al. Changes in soil microbial community structure and function after afforestation depend on species and age: Case study in a subtropical alluvial island. **Science of the Total Environment**, v. 625, p. 1423–1432, 2018.

KARLEN, D. L. et al. Soil quality: humankind's foundation for survival.(Research Editorial)(Editorial). **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 58, n. 4, p. 171, 2003.

LAVELLE, P. et al. Soil invertebrates and ecosystem services. **European Journal of Soil Biology**, v. 42, n. SUPPL. 1, nov. 2006.

LAVELLE, P. et al. Soil ecosystem services and land use in the rapidly changing orinoco river basin of colombia. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 185, p. 106–117, 2014.

LAVELLE, P. et al. Ecosystem engineers in a self-organized soil: A review of concepts and future research questions. **Soil Science**, v. 181, n. 3–4, p. 91–109, 2016.

LAVELLE, P. et al. Soil aggregation, ecosystem engineers and the C cycle. **Acta Oecologica**, v. 105, n. December 2019, p. 103561, 2020.

LONDE, V. et al. Reference and comparison values for ecological indicators in assessing restoration areas in the Atlantic Forest. **Ecological Indicators**, v. 110, 1 mar. 2020.

MARICHAL, R. et al. Soil macroinvertebrate communities and ecosystem services in deforested landscapes of Amazonia. **Applied Soil Ecology**, v. 83, p. 177–185, 2014.

MEA, Millennium Ecosystem Assessment series: Ecosystems and Human Well-being: General Synthesis. Island Press, 160pp, 2005.

MENDES, M. S. et al. Look down—there is a gap—the need to include soil data in Atlantic Forest restoration. **Restoration Ecology**, v. 27, n. 2, p. 361–370, 2019.

MOREIRA, F. M. S. **Biodiversidade do solo em ecossistemas brasileiros**. Lavras: Lavras UFLA, 2008.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e Bioquímica do Solo. **Editora UFLA**, v. ed. 2, p. 729, 2006.

NEUTEL, A. M.; HEESTERBEEK, J. A. P.; DE RUITER, P. C. Stability in real food webs: Weak links in long loops. **Science**, v. 296, n. 5570, p. 1120–1123, 2002.

NURIA, R. et al. IBQS: A synthetic index of soil quality based on soil macro-invertebrate communities. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 10, p. 2032–2045, 2011.

OLIVEIRA, R. O estado da arte da ecologia da restauração e sua relação com a restauração de ecossistemas florestais no bioma Mata Atlântica. **Aleph**, 2011.

PALACIOS-VARGAS, JOSÉ G, MEJIA RECAMIER B.E., O. A. **Guía ilustrada para los artrópodos edáficos**. [s.l: s.n.]. v. 20

PEREIRA, N. A. et al. Does the Process of Passive Forest Restoration Affect the Hydrophysical Attributes of the Soil Superficial Horizon ? n. 2011, p. 1–15, 2020.

RODRIGUES, R. R. et al. **Protocolo de Monitoramento para Programas e Projetos de Restauração FlorestalPacto pela Restauração Florestal da Mata Atlântica**, 2013.

RODRIGUES, R. R.; BRANCALION, P. H. S.; NAVE, A. **PROGRAMA DE ADEQUAÇÃO AMBIENTAL E RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA DAS FAZENDAS CAPOAVA , JEQUITIBÁ E INGAZINHO**. Piracicaba: [s.n.].

ROMANELLI, J. P. et al. Assessing ecological restoration as a research topic using bibliometric indicators. **Ecological Engineering**, v. 120, n. March, p. 311–320, 2018.

ROSSI, M. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado.** São Paulo: [s.n.]. v. 124

RUIZ-JAEN, M. C.; AIDE, T. M. Restoration success: How is it being measured? **Restoration Ecology**, v. 13, n. 3, p. 569–577, 2005.

SANTOS, D. C. F. et al. Microbial and soil properties in restoration areas in the jequitinhonha valley, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 6, p. 2199–2206, 2011.

SCHOENHOLTZ, S. H.; MIEGROET, H. V.; BURGER, J. A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, v. 138, n. 1–3, p. 335–356, 2000.

SNYDER, B. A.; HENDRIX, P. F. Current and potential roles of soil macroinvertebrates (earthworms, millipedes, and isopods) in ecological restoration. **Restoration Ecology**, v. 16, n. 4, p. 629–636, 2008.

STRASSBURG, B. B. N.; IRIBARREM, A.; BEYER, H. L. Global priority areas for ecosystem restoration. n. August 2019, 2020.

SUGANUMA, M. S.; DURIGAN, G. Indicators of restoration success in riparian tropical forests using multiple reference ecosystems. **Restoration Ecology**, v. 23, n. 3, p. 238–251, 2015.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 1, n. 4, p. 301–307, 1969.

THOUMAZEAU, A. et al. Biofunctool®: a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A: concept and validation of the set of indicators. **Ecological Indicators**, v. 97, n. October 2018, p. 100–110, 2019.

VALANI, G. P. et al. Soil quality assessments in integrated crop–livestock–forest systems: A review. **Soil Use and Management**, n. October, p. 1–15, 2020.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Eiol. Biochem.**, v. 19, n. 6, p. 1–5, 1987.

VASCONCELLOS, R. L. F. et al. Microbiological indicators of soil quality in a riparian forest recovery gradient. **Ecological Engineering**, v. 53, p. 313–320, 2013a.

VASCONCELLOS, R. L. F. et al. Soil macrofauna as an indicator of soil quality in an undisturbed riparian forest and recovering sites of different ages. **European Journal of Soil Biology**, v. 58, p. 105–112, 2013b.

VELASQUEZ, E. et al. This ped is my ped: Visual separation and near infrared spectra allow determination of the origins of soil macroaggregates. **Pedobiologia**, 2007.

VELASQUEZ, E.; LAVELLE, P. Soil macrofauna as an indicator for evaluating soil based ecosystem services in agricultural landscapes. **Acta Oecologica**, v. 100, n. September, p. 103446, 2019.

VELASQUEZ, E.; LAVELLE, P.; ANDRADE, M. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. **Soil Biology and Biochemistry**, 2007.

VELOSO, H. P. **Classificação da Vegetação Brasileira, Adaptada a um Sistema Universal**Rio de Janeiro, 1991.

VIANI, R. A. G. et al. Protocol for monitoring tropical forest restoration: Perspectives from the atlantic forest restoration pact in Brazil. **Tropical Conservation Science**, v. 10, 2017.

WORTLEY, L.; HERO, J. M.; HOWES, M. Evaluating ecological restoration success: A review of the literature. **Restoration Ecology**, v. 21, n. 5, p. 537–543, 2013.

ZAGATTO, M. R. G. et al. Interactions between mesofauna, microbiological and chemical soil attributes in pure and intercropped Eucalyptus grandis and Acacia mangium plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 433, n. November 2018, p. 240–247, 2019a.

ZAGATTO, M. R. G. et al. Soil mesofauna in consolidated land use systems: How management affects soil and litter invertebrates. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 2, p. 165–171, 2019b.

Artigo 2:

INTEGRAÇÃO DE ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS E DIVERSIDADE DA MESOFAUNA DA SERAPILHEIRA NO CÁLCULO DO INDICADOR SINTÉTICO DE QUALIDADE DO SOLO - ISQS

Tatiana Cabral de Vasconcelos[1], Elena Velasquez[2], Patrick Lavelle, Ricardo Ribeiro Rodrigues[3]

1.Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil; 2. Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Valle do Cauca, Colômbia. 3.Líder do Laboratório de Ecologia e Restauração Ecológica, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil.

RESUMO

Na restauração florestal é essencial restabelecer os processos ecológicos do solo, principalmente, nos projetos que possuem metas relacionadas com mitigação das mudanças climáticas, proteção do solo e conservação da água, neste caso, avaliar a biota do solo pode ser importante. Atributos microbiológicos do solo e invertebrados da mesofauna que vivem na serapilheira, podem trazer informações sobre o funcionamento do solo em diferentes tipos de uso e manejo do solo. Pontos convergentes entre os diversos índices de qualidade do solo consistem em escolher os mais relevantes atributos do solo, para integra-los em um valor único que varia em escala de qualidade alta, média ou baixa. O objetivo deste trabalho foi integrar os atributos microbiológicos e diversidade da mesofauna da serapilheira como indicadores adicionais no cálculo do *General Indicator of Soil Quality* (GISQ, acrônimo em inglês), aqui denominado Indicador Sintético de Qualidade do Solo (ISQS), metodologia desenvolvida por (VELASQUEZ; LAVELLE; ANDRADE, 2007). Utilizando análises multivariadas calculamos os indicadores: 1)*Ciclagem de nutrientes (NUT):* inclui 06 atributos microbiológicos do solo e 2) *Diversidade da mesofauna na serapilheira (DME):* inclui dados da densidade (ind/m²) de 18 Grupos Taxonômicos (GT) da mesofauna na serapilheira e o valor da Riqueza (n° de GT). Avaliamos a diferença destes indicadores em relação aos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C); PUC (Pastagem de uso contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C), no bioma Mata Atlântica, em Itu, São Paulo, Brasil, nas áreas das Fazendas Capoava, Jequitibá e Ingazinho. Testamos a hipótese de que o valor do índice sintético de qualidade do solo (ISQS), em áreas em processo de restauração ativa é alterado quando calculado: utilizando quatro indicadores (FER, EST, DMA, AGR) ou seis indicadores (NUT, DME, FER, EST, DMA, AGR). Os resultados mostraram que a restauração ativa após 5 anos de implantação apresentou média qualidade do solo, tanto com o cálculo do ISQS com 04 indicadores ou 06 indicadores. Apesar do indicador sintético de qualidade do solo, unir todas as variáveis estudadas, a observação dos indicadores e suas relações também foi importante. Em nossos resultados foi explícita a variação conjunta dos indicadores de Estrutura do Solo (EST) com os indicadores de DMA e DME, que representam a macro e mesofauna do solo. Também verificamos, forte correlação entre os indicadores de fertilidade do solo e ciclagem de nutrientes, gerando, alta qualidade do solo no Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual e média qualidade na Pastagem em uso.

Palavras chaves: Restauração Florestal, Restauração Ativa, Atributos microbiológicos, Mesofauna, Índice de qualidade do solo.

ABSTRACT

In forest restoration, it is essential to reestablish the soil's ecological processes, especially in projects that have goals related to climate change mitigation, soil protection and water conservation, in this case, assessing the soil biota can be important. Microbiological attributes of the soil and mesofauna invertebrates that live in the litter, can bring information about the functioning of the soil in different types of use and management of the soil. Converging points between the different soil quality indices consist of choosing the most relevant soil attributes, to integrate them in a single value that varies in a high, medium or low-quality scale. The objective of this work was to integrate the microbiological attributes and diversity of the litter mesofauna as additional indicators in the calculation of the General Indicator of Soil Quality (GISQ, acronym in English), here called Synthetic Indicator of Soil Quality (ISQS), methodology developed by (VELASQUEZ; LAVELLE; ANDRADE, 2007). Using multivariate analyzes, we calculated the indicators: 1) Nutrient cycling (NUT): includes 06 microbiological soil attributes and 2) Mesofauna diversity in the litter (DME): includes density data (ind m²) of 18 Taxonomic Groups (GT) of mesofauna in litter and the value of Wealth (number of GT). We evaluated the difference of these indicators in relation to the types of land

use: FES (Fragment of Seasonal Semideciduous Forest); RAA (Active Restore A); RAB (Active Restoration B); RAC (Active Restore C); PUC (Pasture for continuous use); PAA (Abandoned Pasture A); PAB (Abandoned Pasture B); PAC (Abandoned Pasture C), in the Atlantic Forest biome, in Itu, São Paulo, Brazil, in the Capoava, Jequitibá and Ingazinho farms. We tested the hypothesis that the value of the synthetic soil quality index (ISQS), in areas in the process of active restoration is changed when calculated: using four indicators (FER, EST, DMA, AGR) or six indicators (NUT, DME, FER, EST, DMA, AGR). The results showed that the active restoration after 5 years of implantation showed average soil quality, both with the calculation of the ISQS with 04 indicators or 06 indicators. Despite the synthetic indicator of soil quality, uniting all the variables studied, the observation of the indicators and their relationships was also important. In our results, the joint variation of the Soil Structure (EST) indicators with the DMA and DME indicators, which represent the soil macro and mesofauna, was explicit. We also found a strong correlation between soil fertility indicators and nutrient cycling, generating high soil quality in the Seasonal Semideciduous Forest Fragment and medium quality in the Pasture in use.

Key words: Forest Restoration, Active Restoration, Microbiological attributes, Mesofauna, Soil quality index.

7. Introdução

Os microrganismos que habitam o solo são os responsáveis, direta ou indiretamente, por processos bioquímicos diversos, que controlam as transformações dos elementos, transferências de energia e nutrientes no sistema solo-planta-atmosfera, constituindo a base de sustentação e produtividade dos ecossistemas terrestes (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). As bactérias e os fungos são propulsores essenciais da mineralização dos nutrientes, participando ativamente dos ciclos do nitrogênio, carbono e fósforo. O comprometimento da atividade microbiana do solo, pode diminuir a síntese e mineralização da matéria orgânica do solo, com consequentes efeitos nos ciclos biogeoquímicos(LAVELLE et al., 2016). Em ecossistemas oligotróficos, as comunidades microbianas do solo podem competir com a vegetação por nutrientes como N e P (CUI; HOLDEN, 2015).

A estrutura da comunidade microbiana varia de acordo com o tipo de uso do solo e possui significante relação, com as variáveis químicas do solo (KANG et al., 2018). Medidas da atividade microbiana no solo podem ser obtidas, pela quantificação da biomassa microbiana, respiração basal, atividade de enzimas e pelo cálculo de alguns quocientes (CARDOSO; VASCONCELLOS, 2015). As enzimas que atuam no solo, não são determinadas por análise direta, mas indiretamente, devido a sua habilidade de transformar um determinado substrato em produtos conhecidos. Indicadores microbianos são mais suscetíveis, às mudanças impostas ao meio ambiente do que indicadores físicos e químicos (CARDOSO et al., 2013).

A análise dos atributos microbiológicos e indicadores bioquímicos podem trazer informações muito relevantes sobre o funcionamento do solo e sua performance na ciclagem e armazenamento dos nutrientes (SANTOS et al., 2011). Em ambientes florestais dados microbiológicos representam grande influencia nos atributos químico-físico do solo e da mesofauna do (ZAGATTO et al., 2019). Invertebrados da mesofauna do solo são pequenos (< 2mm) tais como ácaros, colêmbolos estes invertebrados são influenciados pelas modificações físicas realizadas por organismos da macrofauna (engenheiros do solo) e podem viver em habitats construídos por minhocas, formigas ou cupins, ou seja, invertebrados de menor tamanho corporal encontram recursos alimentares adequados e abrigo dentro das estruturas biogênicas (LAVELLE et al., 2016). Organismos da mesofauna são representados por grupos funcionais do tipo predadores que controlam as populações de outros organismos no solo, e do tipo detritívoros ou decompositores, que contribuem para a decomposição da matéria orgânica e o controle das populações de fungos (MORAES; FRANKLIN, 2008). Um grande número de estudos tem confirmado que as comunidades microbianas são ativadas e selecionadas por engenheiros do ecossistema dentro de suas funções domínios da auto-organização do solo, assim foi construído o conceito de auto organização do solo através de *5 domínios funcionais*, estes domínios são como engrenagens que movem o funcionamento do solo (LAVELLE et al., 2016).

O objetivo deste trabalho foi integrar os atributos microbiológicos e diversidade da mesofauna da serapilheira como indicadores adicionais no cálculo do *General Indicator of Soil Quality* (GISQ, acrônimo em inglês), aqui denominado Indicador Sintético de Qualidade do Solo (ISQS), metodologia desenvolvida por (VELASQUEZ; LAVELLE; ANDRADE, 2007). Utilizando análises multivariadas calculamos os indicadores: 1)*Ciclagem de nutrientes (NUT):* com 06 atributos microbiológicos do solo e 2) *Diversidade da mesofauna na serapilheira (DME):* com dados da densidade (ind/m²) de 18 Grupos Taxonômicos (GT) da mesofauna na serapilheira e o valor da Riqueza (n° de GT).

No monitoramento da restauração florestal, são escassos os trabalhos com indicadores edáficos, assim avaliamos o resultados dos diversos indicadores em 8 áreas: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C); PUC (Pastagem de uso contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C), no bioma Mata Atlântica, em Itu, São Paulo, Brasil. Utilizando o resultados de outros indicadores (FER, EST, DMA e AGR) avaliados nas mesmas áreas, calculamos o ISQS com 6 indicadores. Testamos a hipótese de que o valor do índice sintético de qualidade do solo (ISQS), em áreas em processo de restauração ativa é alterado quando calculado: utilizando quatro indicadores (FER, EST, DMA, AGR) ou seis indicadores (NUT, DME, FER, EST, DMA, AGR).

8. Material e Métodos

8.1. Área de Estudo

Fazendas Capoava, Jequitibá e Ingazinho (23°12'53"S, 47°10'45"W), no município de Itu, nos limites da Serra do Japi e da Área de Proteção Ambiental (APA) de Cabreúva, região centro-oeste do estado de São Paulo, Brasil. O ecossistema natural na área é uma Floresta Estacional Semidecidual (VELOSO, 1991), classificação climática de Koeppen é Cfa, altitude: 580 metros, precipitação média anual de 110mm. Em termos edáficos, ocorre a dominância de Argissolos vermelho amarelo, textura média com cascalho/argilosa (ROSSI, 2017). (Ver Artigo 1)

Nestas propriedades rurais foram realizados plantios em área total com espécies arbóreas nativas de alta diversidade, denominada restauração ativa (RA). Escolhemos 8 áreas para realização desta pesquisa (mesmas áreas descritas no Artigo 1), referidos como tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); RAA (restauração ativa A); RAB (restauração ativa B); RAC (restauração ativa C); PUC (pastagem de uso contínuo); PAA (pastagem abandonada A); PAB (pastagem abandonada B); PAC (pastagem abandonada C).

8.2. Desenho experimental

Foram alocadas 03 parcelas em formato triangular em cada área tipo de uso do solo, no vértice dos triângulos foram retiradas 9 amostras de solo para cada gerar dados da Mesofauna e Microbiologia, figura 18.

O desenho amostral permitiu a coleta das amostras específicas de serapilheira com molde de madeira medindo 25cm², para extração de mesofauna e 200 gramas de solo fresco da camada 0-5cm, para análises microbiológicas, figura 19.

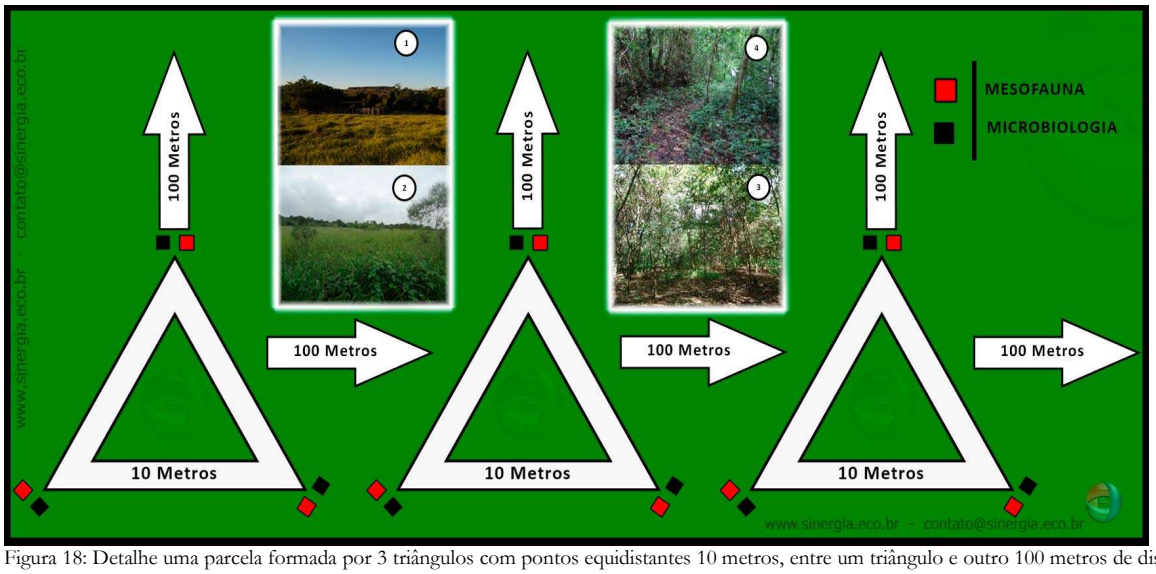


Figura 18: Detalhe uma parcela formada por 3 triângulos com pontos equidistantes 10 metros, entre um triângulo e outro 100 metros de distância. Fotos da Autora: 1) Pastagem de Uso Contínuo, 2) Pastagem Abandonada, 3) Restauração ativa e 4) Fragmento de FES.

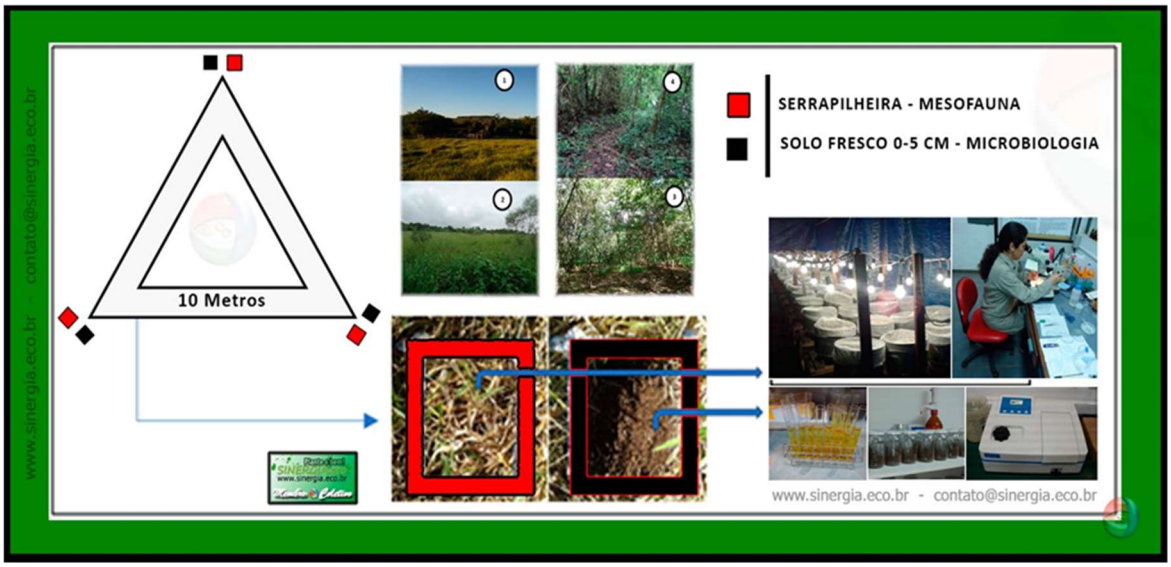


Figura 19: Detalhe dos pontos de coleta de amostras para triagem da mesofauna e coleta de solo para análises microbiológicas. Fotos da Autora: 1) Pastagem de uso contínuo, 2) pastagem abandonada, 3) restauração ativa e 4) fragmento de floresta. A direita: funil de Berlese-Tullgren, triagem da mesofauna do solo e laboratório de análises microbiológicas (biomassa microbiana, respiração microbiana e espectrômetro de enzimas).

8.3. Protocolos de Amostragem e Análise Laboratorial

a) Indicador de ciclagem de nutrientes (NUT): Utilizamos 200 gramas de solo fresco que foram mantidas refrigeradas até o momento da análise no Laboratório de Microbiologia do Solo do Departamento de Solos da ESALQ, o solo passou por uma peneira de 2 mm. Dados de 06 variáveis foram usadas no cálculo deste indicador.

1)*Biomassa microbiana:* Ou carbono microbiano, pois é a fração do carbono "vivo" do solo, proveniente das células microbianas, utilizamos o método descrito em (VANCE et al., 1987) determinamos o carbono proveniente da biomassa após fumigação do solo com clorofórmio e extração com sulfato de potássio contra um extrato proveniente do respectivo controle não fumigado. Resultados expressos como: Cmic (μg C g^{-1}).

2)*Respiração microbiana:* Liberação de CO^2 no processo respiratório dos microrganismos pode ser determinada através do método titulação do CO^2 capturado numa solução de NaOH. Para a incubação das amostras foram utilizados potes de vidro, dentro do recipiente foi adicionado um copo de plástico com 20 da solução de NaOH a 0,5M. O período de incubação total foi de 15 dias foi dividido em duas etapas a primeira de 5 dias e a segunda de 10 dias. O cálculo é realizado através da seguinte fórmula: ((VbVa)*1,1*1000)/PSS onde, Vb = volume de HCl (ml), gasto na titulação do NaOH do controle; Va = volume de HCl (ml), gasto na titulação de NaOH da amostra; 1,1 = fator de conversão (1 ml de NaOH 0,5 M = 1 mg de CO_2); PPS = peso do solo seco, de acordo com (ALLEF & NANNIPIERI, 1995). Resultados expressos como: RespMic (μg CO_2 g^{-1} solo.h^{-1}).

3)*Atividade da enzima βglycosidase*: De acordo com Eivazi & Tabatabai (1988), utilizamos a determinação colorimétrica do p-nitrofenol liberado pelas βglycosidases do solo, a partir do solo incubado com uma solução tamponada de p-nitrofenil-β-D-glicopiranosídeo, a determinação foi realizada com espectrofotômetro. Resultados expressos em: βglycosidase (mg PNF. kg_{-1} solo. hora).

4) *Atividade da enzima fosfatase ácida:* De acordo com Tabatabai & Bremner (1969), utilizamos a determinação colorimétrica da p-nitrofenol que é liberado pelas fosfatases encontradas no solo quando o solo é incubado com uma solução tamponada de p-nitrofenol fosfato, a determinação foi realizada com espectrofotômetro. Resultados expressos em: fosfatase ácida (mg PNF. kg_{-1} solo. hora).

5) *Quociente metabólico (qCO_2):* Representa a demanda de energia necessária para a manutenção da população, dado pela relação entre a respiração do solo e o carbono microbiano, segundo Anderson & Domsch (1993). Resultados expressos em: μg CO_2 μg $Cmic^{-1}day^{-1}$.

6)*Quociente de microbiano (qMic):* Representa a disponibilidade de carbono, dado pela relação entre o Carbono Microbiano e o Carbono Total. Resultados expressos em porcentagem.

b) ***Indicador Diversidade da Mesofauna* na serapilheira (DME):** Para extração da mesofauna a serapilheira triada utilizando um funil de metal sob uma lâmpada incandescente como fonte de calor (Funil de Berlese-Tullgren), este método permite apenas a passagem de organismos menores que 2mm que caem diretamente em um frasco com álcool 90% disposto abaixo do funil. Após 7 dias os frascos foram levados para identificação, realizada no Laboratório de Microbiologia do Solo com auxílio de lupa estereoscópica e guias de identificação para mesofauna do solo (PALACIOS-VARGAS, JOSÉ G, MEJIA RECAMIER B.E., 2014). A Densidade da mesofauna na serapilheira (ind/m^2): Inclui dados de 17 Grupos Taxonômicos (GT): *1)Ácaro, 2) Colêmbola, 3) Psocoptera, 4) Isopoda, 5) Diplopoda, 6) Blattodea, 7) Diptera, 8) Gastropoda, 9) Oligochaeta, 10) Formiga, 11) Coleoptera, 12) Pseudoescorpione, 13) Aranae, 14) Dermaptera, 15) Chilopoda, 16) Thysanoptera, 17) Hemiptera, 18) Larvas em Geral* (organismos imaturos não identificados) e *19) Valor de Riqueza (n° de GT)* em cada tipo de uso do solo, sendo total de 19 variáveis usadas no cálculo do indicador.

8.4. Análise de Dados

Passo 1: Exploramos os conjuntos de dados com a Análise de Variância (ANOVA) e Teste Tukey verificamos as diferenças dentro de cada parâmetro microbiológico do solo e da diversidade da mesofauna da serapilheira, gerando gráficos box-plot com a variabilidade dos dados, para enzimas e matéria orgânica do solo aplicamos análise de correlação de Pearson, que apresentamos no **ANEXO B.**

Passo 2: Calculamos os indicadores NUT e DME utilizando a técnica estatística multivariada aplicamos a Análise de Componentes Principais e com dados da coinércia definidos por F1 e F2 da análise, ao conjunto de dados aplicamos

a transformação homotética, fórmula: **(0,1+(Vo – Vmin) / Vmax-Vmin)*0,9)**, onde: **Vo** é o valor original da variável; **Vmin** é o valor mínimo desta variável; **Vmax** é o valor máximo desta variável, essa transformação colocou as diferentes variáveis na mesma dimensão e forneceu um índice que varia de 0,10 a 1,00. Para variáveis consideradas de efeito negativo na qualidade do solo atribuímos sinais negativos, pois, indicam fatores prejudiciais ao solo seguindo o critério do pesquisador. O cálculo dos indicadores FER, EST, DMA, AGR encontram-se no Artigo 1.

Passo 3: Geramos uma matriz de dados com os resultados dos 6 tipos indicadores e aplicamos novamente a estatística multivariada que sintetizou a informação de cada conjunto de dados, calculamos um coeficiente para cada tipo de indicador gerando a fórmula usada no cálculo do Indicador Sintético de Qualidade do Solo (ISQS) (VELASQUEZ; LAVELLE; ANDRADE, 2007).

Passo 4: Ao resultado final do ISQS aplicamos a Análise de Variância (ANOVA) e Teste Tukey para observar as diferenças entre relação aos tipos de usos do solo, apresentamos uma tabela qualidade do solo para cada indicador a fim de verificar o ISQS calculado com 4 indicadores e com 6 indicadores.

9. Resultados

9.1. Indicador Ciclagem de Nutrientes - NUT

Aplicamos a análise multivariada Análise de Componentes Principais (PCA, sigla em inglês *Principal Component Analisis*), técnica estatística que realiza a redução dimensional de um grupo de variáveis. Com este método foi possível identificar, a diferença entre os tipos de uso do solo, em relação as 06 variáveis/atributos microbiológicos: respiração microbiana, biomassa microbiana, enzima βglycosidase, enzima fosfatase ácida, quociente metabólico e quociente de carbono, que formam o indicador de ciclagem de nutrientes (NUT), (Figura 20).

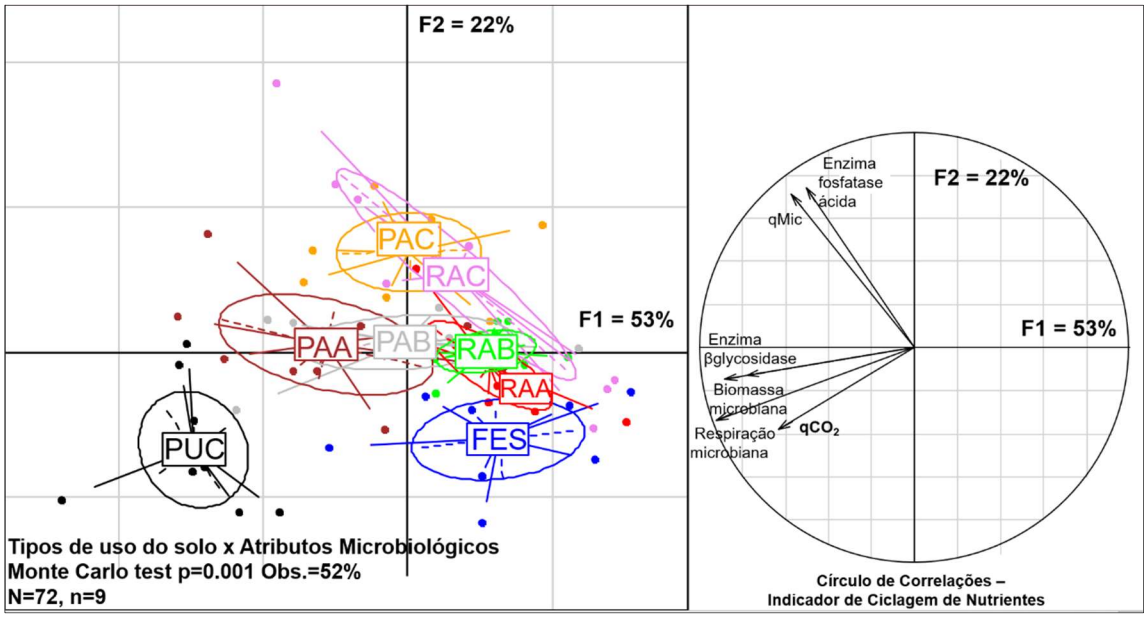


Figura 20: Gráfico da Análise de Componentes Principais entre os atributos do solo: respiração microbiana, biomassa microbiana, βglycosidase: enzima βglycosidase, Fosfatase Ac: enzima fosfatase ácida, qCO_2: quociente metabólico, qMic: quociente microbiano, e os tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração ativa A); RAB (Restauração ativa B); RAC (Restauração ativa C). Total de 72 observações e 06 variáveis resposta, utilizando o pacote ade4, no Programa R Studio.

A soma dos dois primeiros fatores da análise é de 76%, indicando uma análise robusta, o teste de Monte Carlo é significativo (p=0.001) indicando que há diferença entre dos tipos de uso do solo e a observação do teste de permutação é de 52%.

Na tabela 14, apresentamos as coordenadas das variáveis em relação ao Fator 1 e 2, oriundo da análise de PCA, e necessário para construção indicador de Ciclagem de Nutrientes. Os resultados brutos das 6 variáveis microbiológicas foram multiplicados pelos valores de F1 e F2, e transformados homotéticamente.

Na Tabela 15, apresentamos o resultado do indicador NUT. Nas áreas em processo de restauração ativa (RA) encontramos valores baixos (0,25 a 0,34), para este indicador. Na pastagem de uso contínuo o indicador NUT difere significativamente dos outros tipos de uso do solo de acordo com Teste Tukey.

Tabela 14: Valores de F1 e F2 em relação a cada atributo microbiológico, são eles: $Resp_{15}$: respiração microbiana, Cmic: biomassa ou carbono microbiano, enzima βglycosidase, enzima fosfatase ácida, qCO^2: quociente metabólico, qMic: quociente microbiano, representando a correlação ou inércia dada na análise do Análise de Componentes Principais.

	Biomassa microbiana	**Respiração Microbiana**	**qCO_2**	**qMic**	**Enzima βglycosidase**	**Enzima Fosfatase Ácida**
F1	18.86	26.47	12.4	10.13	24.16	7.89
F2	1.21	8.35	10.76	- 37.28	1.56	- 40.81

Tabela 15: Média (desvio padrão entre parênteses) do indicador de ciclagem de nutrientes, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração ativa A); RAB (Restauração ativa B); RAC (Restauração ativa C).

Tipo de Uso do solo	**PUC**	**FES**	**RAA**	**RAB**	**RAC**	**PAA**	**PAB**	**PAC**
Indicador de Ciclagem de Nutrientes	0,80(0,11)	0,51(0,12)	0,35(0,04)	0,34(0,06)	0,25(0,08)	0,48 (0,10)	0,41(0,12)	0,25(0,09)

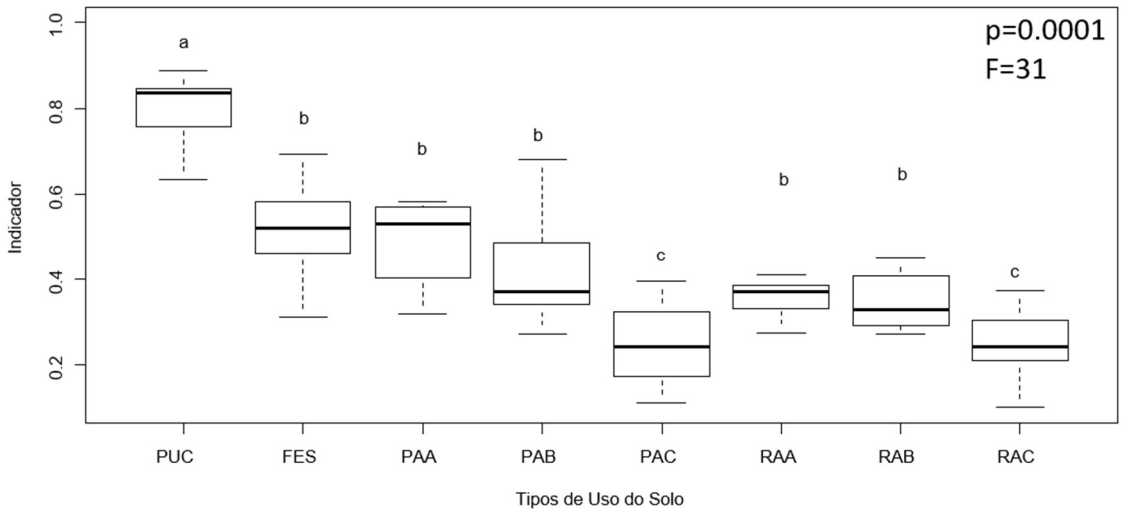


Figura 21: Indicador de Ciclagem de Nutrientes dos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual),); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração ativa A); RAB (Restauração ativa B); RAC (Restauração ativa C).

9.2. Indicador Diversidade da Mesofauna da Serapilheira - DME

Coletamos 17 grupos taxonômicos (GT), ou seja, níveis de classificação como ordem, subordem da mesofauna do solo são eles: Acari, Thysanoptera, Colêmbola, Psocoptera, Isopoda, Diplopoda, Blattodea, Gastropoda, Oligochaeta, Formiga, Coleoptera, Pseudoescorpione, Aranae, Dermaptera, Chilopoda, Hemiptera e Diptera, incluímos dados de invertebrados não identificados considerados imaturos (larvas) e o valor da riqueza de GT (n° de espécies) encontrado em cada tipo de uso do solo. As médias e desvio-padrão da densidade da mesofauna na serapilheira (ind/m²) e também as análises de variância de cada grupo taxonômico apresentamos no ANEXO B.

Os grupos taxonômicos (GT) foram subdivididos em grupos funcionais (GF) que correspondem aos níveis tróficos de acordo com hábito de vida: *Engenheiros da Serrapilheira*: São decompositores e detritívoros que vivem na serapilheira sob solo, estes organismos são os mais abundantes na mesofauna do solo e atuam diretamente na atividade dos microrganismos do solo, não só na fragmentação dos detritos vegetais mais também no controle de populações de bactérias e fungos; *Engenheiros do solo*: Modificam a estrutura do solo de diversas formas tais como escavação de túneis e galerias realizada por minhocas e cupins que são menos frequentes na serrapilheira, mas as formigas podem ser abundantes devido ao hábito de forrageamento sob os detritos nos solos florestais e *Predadores*: Alimentam-se exclusivamente de outros invertebrados, são topo de cadeia alimentar e por isso encontrados em quantidade elevada em locais mais preservados.

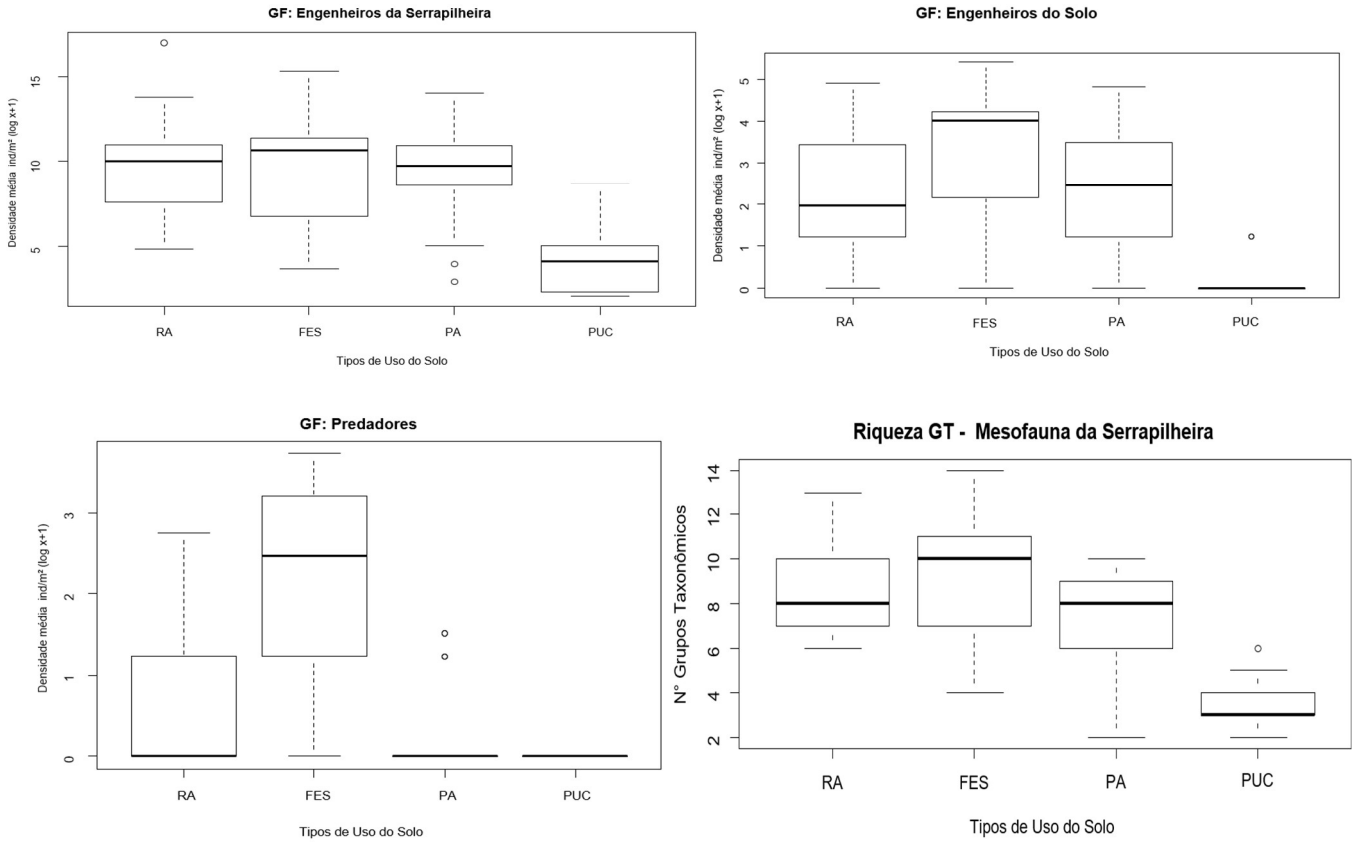


Figura 22: Densidade média e riqueza dos Grupos Funcionais (GF) e Grupos Taxonômicos (GT) encontrados nas amostras de serapilheira nas áreas: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), RA (Restauração Ativa), PA (Pastagem Abandonada), PUC (Pastagem de Uso Contínuo).

Construímos o indicador para a diversidade da mesofauna da serapilheira, a partir da Análise de Componentes Principais utilizando 19 atributos em relação aos 08 tipos de uso do solo (Figura 23). A soma dos dois primeiros fatores da análise é de 36%, o teste de Monte Carlo é significativo (p=0.001) e a observação do teste de permutação é de 31%, representa que trinta por cento da variabilidade dos dados é devido a diferença dos atributos da mesofauna do solo entre os tipos de uso do solo, esta representatividade pode ser considerada baixa.

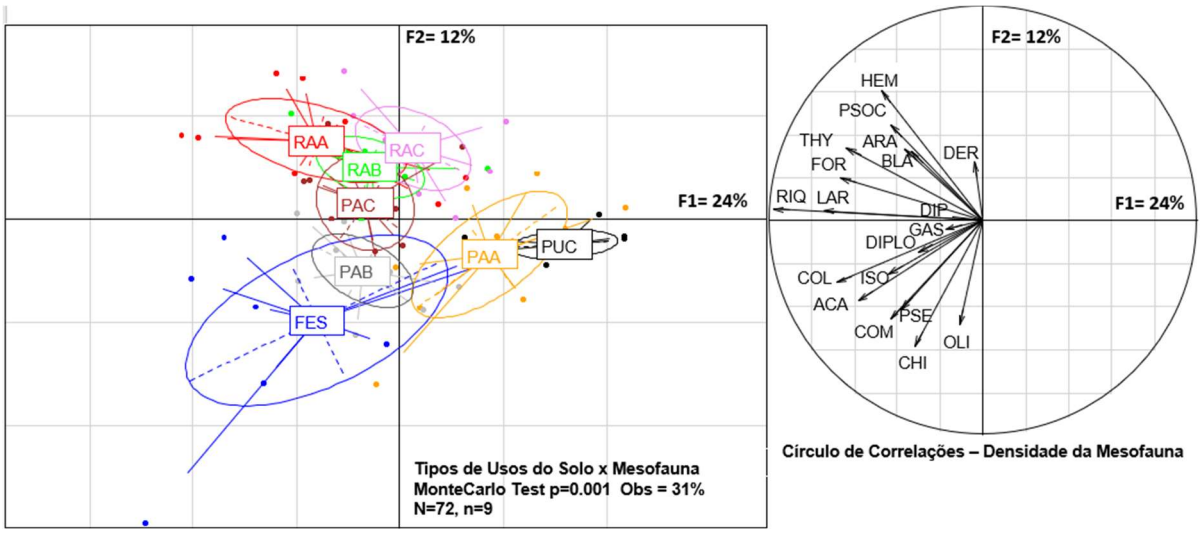


Figura 23: Análise de Componentes Principais para construção do indicador para a diversidade da mesofauna da serapilheira com as variáveis: ACA:Ácaro, THY:Thysanoptera, COM:Colembola, PSOC:Psocoptera, ISO:Isopoda, DIPLO:Diplopoda, BLA:Blattodea, LAR:Larvas, GAS:Gastropoda, OLI:Oligochaeta, FOR:Formiga, COL:Coleoptera, PSE:Pseudoescorpione, ARA:Aranae, DER:Dermaptera, CHI:Chilopoda, HEM:Hemiptera, DIP:Diptera, RIQ: Riqueza de GT da Mesofauna, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), RAA (Restauração ativa A), RAB (Restauração ativa B), RAC (Restauração ativa C), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), PUC (Pastagem de Uso Contínuo). Total de 72 observações e 19 variáveis resposta, utilizando o pacote ade4, no Programa R Studio.

O Fator 1 de 24% separou as áreas com menor densidade e diversidade da mesofauna (PAA e PUC) do restante das áreas. Já o Fator 2 de 12% separou as áreas RAA, RAC, RAB e PAC onde predominam organismos dos GT: Hemiptera, Dermaptera, Psocoptera, Aranae, Blattodea, Thysanoptera, Formigas, das áreas localizadas abaixo FES, PAB, PAA e PUC, onde predominam os GT: Coleoptera, Isopoda, Ácaros, Colêmbolas, Pseudoescorpione e Chilopodas. A Riqueza de GT representa o maior aporte de F1 (20.76), as ordens Hemiptera, Chilopoda e Oligochaeta são as que mais aportam para o eixo F2 da análise, na tabela 16, apresentamos as coordenadas das variáveis da mesofauna em relação ao Fator 1 e 2, com base nestes valores foi construído o indicador da diversidade da mesofauna na serapilheira (Tabela 17, Figura 24).

Tabela 16: Fatores F1 e F2 da PCA em relação a cada atributo da mesofauna: ACA:Ácaro, THY:Thysanoptera, COM:Colembola, PSOC:Psocoptera, ISO:Isopoda, DIPLO:Diplopoda, BLA:Blattodea, LAR:Larvas, GAS:Gastropoda, OLI:Oligochaeta, FOR:Formiga, COL:Coleoptera, PSE:Pseudoescorpione, ARA:Aranae, DER:Dermaptera, CHI:Chilopoda, HEM:Hemiptera, DIP:Diptera, RIQ: n° de GT da mesofauna.

	ACA	**THY**	**FOR**	**COL**	**DER**	**HEM**	**DIP**	**PSE**	**ARA**	**LAR**	**ISO**	**COLE**	**PSO**	**GAS**	**DIPL**	**BLA**	**CHI**	**OLI**	**RIQ**
F1	7.31	8.85	**9.64**	**10.12**	0.03	4.90	0.67	3.18	2.90	**11.98**	4.22	4.07	3.99	0.44	2.01	2.47	2.21	0.27	**20.76**
F2	6.05	5.12	1.78	3.59	3.29	**16.20**	0.06	7.46	4.87	0.09	2.71	**9.08**	8.85	0.02	0.91	4.59	**14.88**	**10.33**	0.13

Tabela 17: Média (desvio padrão entre parenteses) do indicador DME, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), RAA (Restauração ativa A), RAB (Restauração ativa B), RAC (Restauração ativa C), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), PUC (Pastagem de Uso Contínuo).

Tipo de Uso do solo	FES	PUC	RAA	RAB	RAC	PAA	PAB	PAC
Indicador Diversidade da Mesofauna - DME	0,64(0,2)	0,20(0,1)	0,66(0,2)	0,60(0,1)	0,49(0,1)	0,36(0,1)	0,58(0,07)	0,55(0,1)

Nas áreas em processo de restauração ativa (RAA e RAB) o indicador de diversidade da mesofauna na serapilheira é considerado alto e não difere significativamente do Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FES). Na área de restauração ativa C (RAC) o índice tem valor médio e não difere da área de pastagem abandonada A (PAA). O menor valor deste indicador foi encontrado na área de pastagem de uso contínuo (PUC).

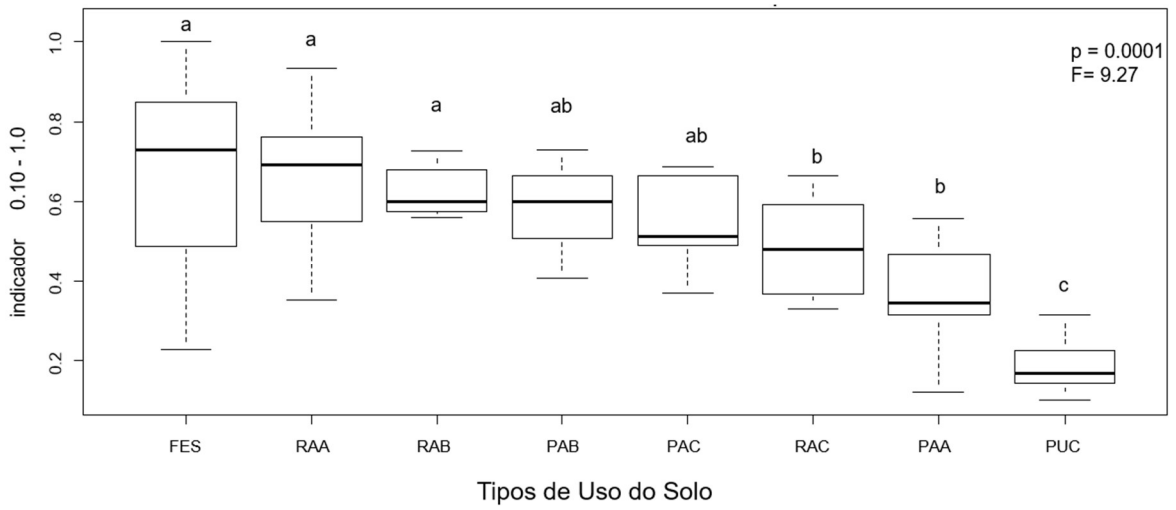


Figura 24: Indicador da Biodiversidade na Serapilheira nos tipos de uso: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), RAA (Restauração ativa A), RAB (Restauração ativa B), RAC (Restauração ativa C), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), PUC (Pastagem de Uso Contínuo).

9.3. Indicador Sintético de Qualidade do Solo (ISQS) com 6 indicadores

Aplicamos a análise de componentes principais na matriz com 6 indicadores de qualidade do solo (FER, EST, NUT, DMA, DME e AGR), (Figura 25), em relação a diferença entre os tipos de uso do solo, o teste de Monte Carlo foi significativo (p=0.001).

A observação do teste de permutação foi de 54%, demonstrando que mais da metade da variação dos dados ocorre devido aos 6 conjuntos de dados edáficos utilizados. Os indicadores de diversidade da fauna do solo (DMA e DME), obtiveram alta correlação com o indicador de estrutura do solo (EST).

Na Tabela 18, apresentamos os valores de coinércia, gerados pela análise de componentes principais (PCA) e o cálculo da fómula do ISQS, que permitiu unir as informações de todos os 06 indicadores de qualidade do solo. A fórmula calculada para os dados deste trabalho foi: ISQS = (EST * 0,89) + (FER*1,22) + (AGR* 1,02) + (DMA* 0,82) + (NUT 1,35) + (DME *0,80).

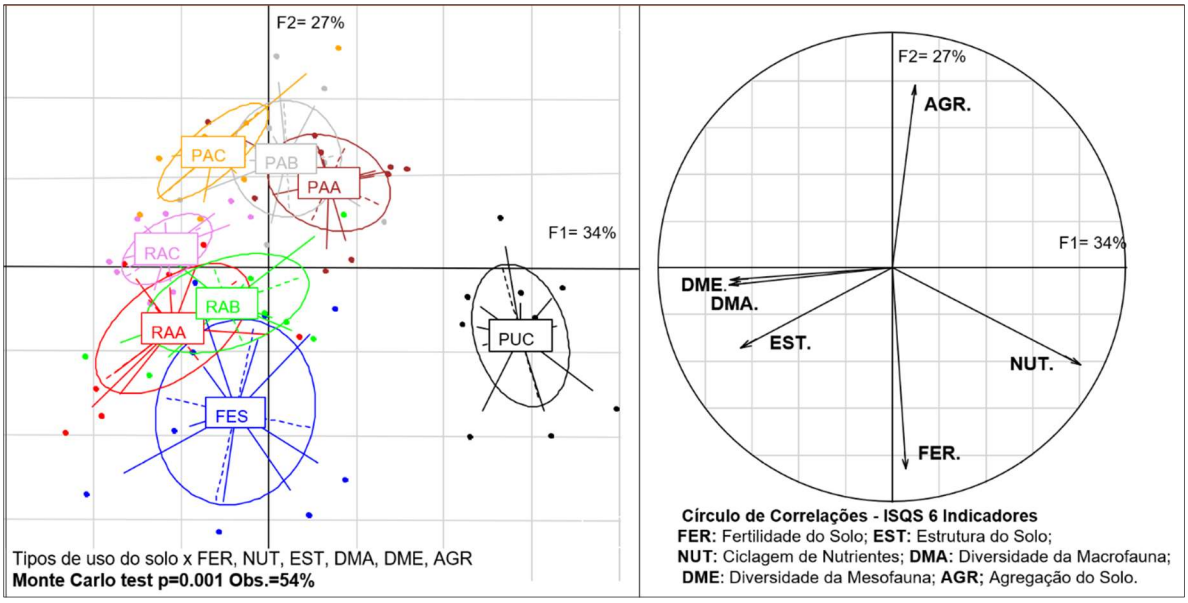


Figura 25: Análise de Componentes Principais com 6 indicadores (NUT: Ciclagem de nutrientes, FER: Fertilidade do solo, EST:Estrutura Física do solo, DMA:Diversidade da Macrofauna, DME: Diversidade da Mesofauna, AGR: Agregação do solo), nos tipos de uso do FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), RAA (Restauração ativa A), RAB (Restauração ativa B), RAC (Restauração ativa C), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), PUC (Pastagem de Uso Contínuo). Total de 72 observações e 06 variáveis resposta, utilizando o pacote ade4, no Programa R Studio.

Tabela 18: Valores de coinércia de Fator 1 e Fator 2 gerados pela da PCA para cada um dos 6 indicadores: NUT: Ciclagem de nutrientes, FER: Fertilidade do solo, EST:Estrutura do solo, DMA:Diversidade da Macrofauna, DME: Diversidade da Mesofauna, AGR: Agregação do solo) e cálculo da Fórmula ISQS.

	Contribuição do atributo em relação ao F1 da análise	**Contribuição do atributo em relação ao F2 da análise**	**Valor do F1 do eixo 1 da PCA**	**Valor do F2 do eixo 2 PCA**
Indicador Estrutura Física do Solo – EST	20,48	7,03	0,34	0,27
Indicador Fertilidade Química do Solo – FER	0,17	44,85	0,34	0,27
Indicador Agregação do Solo – AGR	0,47	37,26	0,34	0,27
Indicador Diversidade da Macrofauna – DMA	23,82	0,32	0,34	0,27
Indicador de Ciclagem de Nutrientes – NUT	31,61	10,37	0,34	0,27
Indicador de Diversidade da Mesofauna – DME	23,42	0,15	0,34	0,27
	Contribuição F1 * Valor F1	**Contribuição F2 * Valor F2**	**Soma**	**Fator ou coeficiente**
Indicador Estrutura Física do Solo – EST	6,96	1,89	8,9	**0,89**
Indicador Fertilidade Química do Solo – FER	0,05	12,10	12,2	**1,22**
Indicador Agregação do Solo – AGR	0,15	10,06	10,2	**1,02**
Indicador Diversidade da Macrofauna – DMA	8,09	0,08	8,2	**0,82**
Indicador de Ciclagem de Nutrientes – NUT	10,74	2,79	13,5	**1,35**
Indicador de Diversidade da Mesofauna – DME	7,96	0,04	8,00	**0,80**
Fórmula ISQS = (EST * 0,89) + (FER*1,22)+ (AGR* 1,02) + (DMA* 0,82) + (NUT 1,35) + (DME *0,80)				

Ao resultado final aplicamos a equação homotética que transforma os resultados da equação em valores de 0,10 a 1,00. Na Tabela 19, apresentamos os resultados finais do ISQS com 6 indicadores, para cada uma das 08 áreas avaliadas neste trabalho.

Tabela 19: Média (desvio padrão entre parenteses) do ISQS com 6 indicadores, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), RAA (Restauração ativa A), RAB (Restauração ativa B), RAC (Restauração ativa C), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), PUC (Pastagem de Uso Contínuo).

Tipo de Uso do solo	FES	PUC	RAA	RAB	RAC	PAA	PAB	PAC
ISQS 6 indicadores	0,80 (0,18)	0,48(0,17)	0,50(0.11)	0,40(0,19)	0,45(0,08)	0,41(0,12)	0,37(0,12)	0,44(0,20)

Os resultados indicam alta qualidade do solo no Fragmento de Floresta (FES) diferindo significativamente do todos os outros tipos de uso do solo (Figura 26).

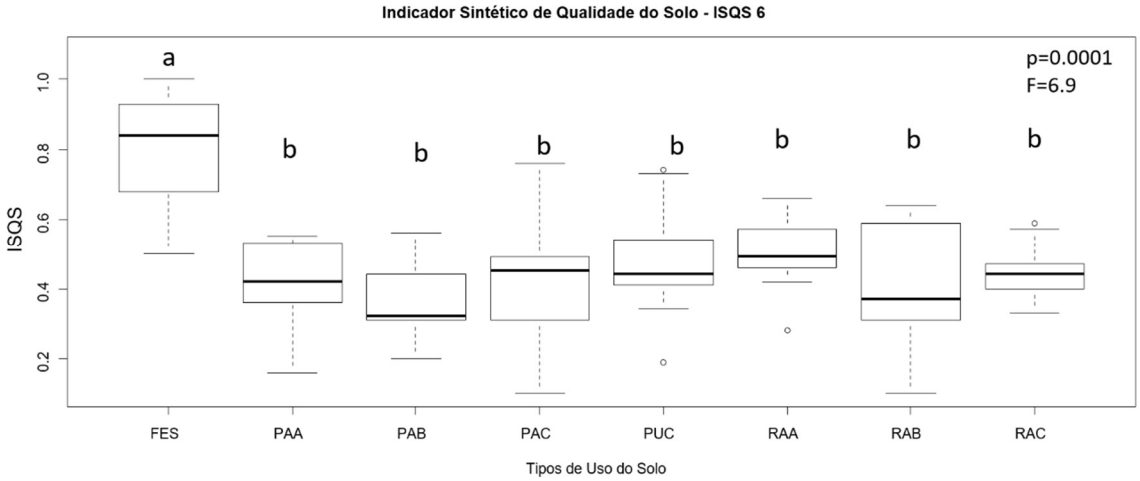


Figura 26: Índice Sintético de Qualidade do Solo (ISQS), calculado com 6 indicadores, nos tipos de uso: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), RAA (Restauração ativa A), RAB (Restauração ativa B), RAC (Restauração ativa C), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), PUC (Pastagem de Uso Contínuo).

Os resultados mostraram que a restauração ativa após 5 anos de implantação, apresentou média qualidade do solo, tanto com o cálculo do ISQS com 04 indicadores ou 06 indicadores (Tabela 20).

Tabela 20: Quadro geral dos resultados(valores das médias de todos indicadores e classificação: baixa, média ou alta qualidade), nos tipos de uso do solo: RA (Restauração ativa: média das áreas RAA, RAB, RAC), PA (Pastagem Abandonada: média das áreas PAA, PAB, PAC), FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), PUC (Pastagem de Uso Contínuo).

	Indicador FER FERTILIDADE DO SOLO	Indicador NUT CICLAGEM DE NUTRIENTES	Indicador EST ESTRUTURA DO SOLO	Indicador AGR AGREGAÇÃO DO SOLO	Indicador DMA DIVERSIDADE MACROFAUNA	Indicador DME DIVERSIDADE MESOFAUNA	ISQS 6 6 indicadores (FER-EST-AGR-DMA-DME-NUT)	ISQS 4 4 indicadores (FER-EST-AGR-DMA)
RA	**0.42 (média)**	**0.31 (baixa)**	**0.69 (média)**	**0.49 (média)**	**0.55 (média)**	**0.58(média)**	**0.45 (média)**	**0.59 (média)**
PA	0.25 (baixa)	0.38 (baixa)	0.51(média)	0.79 (alta)	0.52 (média)	0.49 (média)	0.41(média)	0.56 (média)
FES	0.81 (alta)	0.51 (média)	0.65 (média)	0.56 (média)	0.60 (média)	0.64 (média)	0.80 (alta)	0.80 (alta)
PUC	0.56 (média)	0.80 (alta)	0.40 (baixa)	0.55 (média)	0.23 (baixa)	0.20 (baixa)	0.48 (média)	0.38 (baixa)

10.DISCUSSÃO

10.1. Indicador de ciclagem de nutrientes - NUT

Nas áreas em processo de Restauração ativa (RAA, RAB, RAC) após 5 anos a qualidade do solo para este indicador foi baixa (0,31), as variáveis de biomassa microbiana e respiração microbiana foram reduzidas em relação aos outros tipos de uso do solo. Aas áreas de Pastagem Abandonada (PAA, PAB, PAC) obtiveram o indicador de

ciclagem de nutrientes (0,38) semelhante a Restauração Ativa, nestes dois tipos de uso do solo encontramos a maior atividade da enzima Fosfatase ácida e maior aporte do quociente microbiano. Encontramos a menor atividade da enzima βglycosidase na área de restauração ativa A, indicando pouca ciclagem de carbono no solo, esta enzima é responsável por catalisar as reações de hidrólise da maltose e da celobiose, cujos produtos são importantes fontes de energia para os microrganismos do solo, por isso é encontrada alta correlação desta enzima com a atividade e quantidade de microrganismos do solo (KANG et al., 2018).

No Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FES) encontramos qualidade média (0,51) para o indicador de ciclagem de nutrientes, nestas áreas encontramos biomassa microbiana elevada, o que pode ser por consequência do acúmulo de carbono e nitrogênio no solo. A respiração microbiana foi menor em (FES) do que em (PUC), isto é refletido no menor quociente metabólico encontrado em FES.

Devido presença do gado que trouxe um *input* constante de matéria orgânica dos excrementos, na área da Pastagem em Uso Contínuo (PUC) encontramos alta qualidade de ciclagem de nutrientes (0,80) neste tipo de uso do solo encontramos grande quantidade de Biomassa Microbiana. É interessante observar que este tipo de uso do solo apresentou a mais alta taxa de a respiração microbiana, indicando que a maior parte do carbono está sendo liberado para a atmosfera e não armazenado no solo e também resultou no valor alto de qCO^2, indicando alta atividade dos microrganismos gerando stress e alta liberação de gases para atmosfera. A análise do quociente metabólico e do quociente microbiano são necessários para observar a dinâmica da matéria orgânica (SANTOS et al., 2011; ZAGATTO et al., 2019).

10.2. Indicador de diversidade da mesofauna na serapilheira - DME

Nas áreas em processo de restauração ativa (RAA, RAB, RAC) após 5 anos de implantação, a qualidade do solo para este indicador foi média (0,58) e não diferiu do fragmento de floresta (FES) com (0,64), revelando o desenvolvimento da biodiversidade, resiliência e autogestão do sistema solo nestes tipos de uso. Após 5 anos de restauração são encontrados níveis altos de riqueza e diversidade dos invertebrados do solo (MENTA et al., 2014).

Na pastagem de uso contínuo (PUC), a baixa classificação (0,20) neste indicador, pode representar a perda da biodiversidade neste tipo de uso. Em PUC é reduzida a presença dos detritívoros em relação aos outros tipos de uso do solo. No fragmento de floresta (FES) encontramos o dobro da riqueza de grupos taxonômicos da mesofauna do solo em relação a pastagem de uso contínuo.

Nas áreas de pastagens abandonadas (PAA, PAB, PAC) sem ações de restauração, o indicador DME foi classificado como médio (0,49), e menor que o encontrado nas áreas em processo de restauração ativa. Dentre os engenheiros do solo, as formigas apresentam alta densidade na serapilheira da floresta, devido ao seu hábito de forrageamento sua presença é marcante neste compartimento. O grupo funcional dos predadores da mesofauna foram encontrados com maior densidade em FES, a ordem Pseudoescorpionida, foi exclusiva esta área. Zagatto et al. (2019) encontrou as ordens Pseudoscorpionida e Blattodea exclusivamente em plantios de eucalipto. Devido ao fluxo de energia dentro das comunidades de invertebrados do solo o grupo funcional do predadores pode indicar um funcionamento normal do solo(NEUTEL; HEESTERBEEK; DE RUITER, 2002).

10.3. Indicador Sintético de Qualidade do Solo (ISQS) com 6 indicadores

O ISQS, calculado com 06 indicadores ou com 04 indicadores (artigo 1), resultou em qualidade média para as áreas de restauração ativa, refutando a hipótese de que com 06 indicadores a qualidade do solo aferida é alterada. No entanto o uso de 6 indicadores pode tornar a análise mais robusta, pois utiliza maior quantidade de dados. A qualidade do solo no Fragmento de Floresta (FES), foi alta nos dois cálculos, indicando que a mesma pode ser a referência local para o sucesso do processo de restauração florestal, pois, o indicador só é útil, se o seu valor puder ser interpretado em relação a valores de referência disponíveis. Os pontos mais fortes que trouxeram este resultado foram a alta qualidade dos indicadores de FER e de NUT do ambiente florestal.

Nas áreas em Processo de Restauração ativa (RA), Pastagem Abandonada (PA) e Pastagem de Uso Contínuo (PUC) encontramos os valores médios para o indicador ISQS 6. Os pontos mais fortes que trouxeram este resultado foram a baixa qualidade dos indicadores de fertilidade do solo e de ciclagem de nutrientes nas áreas RA e PA e a baixa qualidade dos indicadores de diversidade e estrutura física na área (PUC).

Embora entendamos mecanicamente muitas relações subjacentes a química do solo, ainda nos deparamos com vários desafios, incluindo a identificação de relacionamentos críticos que afetam a produtividade da floresta em qualquer tipo de local e estabelecimento de linhas de base, isto é, condições de referência para julgar as relações de nível positivo em que um dado solo está funcionando (SCHOENHOLTZ; MIEGROET; BURGER, 2000). Os valores aceitáveis para um indicador também podem ser definidos como aqueles em que não há perda ou prejuízo significativo do funcionamento, ou seja, é preciso verificar onde cada tipo de uso está perdendo qualidade do solo.

Nas áreas em Processo de Restauração ativa (RA) encontramos aportes positivos *(sinergias)* entre os atributos de diversidade da macrofauna e da mesofauna, e estrutura física do solo, com presença de agregados biogênicos e valores adequados da porosidade total e macroposidade, gerando a provisão de serviços ecossistêmicos relacionados ao fluxo do ar e da água no solo.

As áreas em processo de Restauração ativa (RA) sofrem com pressões negativas *(trade-offs)* da alta saturação por alumínio e do baixo pH do solo que pode estar refletido na menor qualidade do indicador com dados microbiológicos, por outro lado (FES) possui alta capacidade de resiliência sob as condições locais mantendo-se com resultados de pH mais básico, este atributo químico é diretamente relacionado com os microrganismos e com a dinâmica de matéria orgânica do solo que é de alta qualidade neste tipo de uso do solo.

11. CONCLUSÃO

Encontramos grande variação entre os intervalos adequados para cada tipo de indicador, em relação aos tipos de uso analisados. Em cada área estudada, há maior aporte de uma propriedade ou processo, em detrimento de outro, visto que no solo as propriedades e funções são altamente correlacionadas. A baixa qualidade dos indicadores de ciclagem de nutrientes e fertilidade do solo, nas áreas de restauração ativa, é balanceada pela alta qualidade dos indicadores de diversidade da macrofauna do solo e mesofauna da serapilheira, que atuando em sinergia, mantêm a estrutura física e agregação do solo com média e alta qualidade. É importante que a área escolhida como referência alcance os níveis máximos dos parâmetros utilizados, a qualidade edáfica geral no Fragmento de Floresta Atlântica é alta, destacamos os valores altos para os indicadores de ciclagem de nutrientes e fertilidade química do solo podendo indicar que a estabilidade do sistema florestal depende mais destes atributos. Na Pastagem Uso Contínuo apesar de média qualidade da fertilidade do solo e alta qualidade da ciclagem de nutrientes, os indicadores de diversidade (macro e mesofauna) e de estrutura física do solo apresentaram nível baixo de qualidade.

A escolha em monitorar do solo pode ocorrer de acordo com o objetivo do projeto de restauração, por exemplo, onde se almeja melhor produtividade das árvores para fins de exploração econômica sustentável indicadores de qualidade da fertilidade química e da ciclagem de nutrientes devem ser avaliados, em plantios para conter a degradação do solo com em encostas a qualidade da estrutura física deve ser avaliada. Onde o objetivo é a conservação das espécies, os indicadores de diversidade da macrofauna e mesofauna devem ser avaliados.

Uma compreensão mais holística do solo pode ser quantificada no cálculo do Indicador Sintético de Qualidade do Solo (ISQS). O uso de indicadores de qualidade do solo no monitoramento do processo de restauração ecológica pode trazer à tona quais os limiares alcançáveis para o sucesso do restabelecimento dos processos ecológicos e serviços ecossistêmicos do solo, por consequência facilitar a comunicação entre a pesquisa acadêmica e as políticas públicas ambientais.

REFERÊNCIAS

AMAZONAS, N. T. et al. Soil macrofauna density and diversity across a chronosequence of tropical forest restoration in southeastern Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 78, n. 3, p. 449–456, 2018.

ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 6, p. 1945–1962, 2004.

ANZALONE, R. A. et al. Establishing reference values for soil microbial biomass-C in agroecosystems in the Atlantic Forest Biome in Southern Brazil. **Ecological Indicators**, v. 117, n. March 2019, p. 106586, 2020.

ARONSON, J. What can and should be legalized in ecological restoration? **Revista Árvore**, v. 34, n. 3, p. 451–454, 2010.

BENNETT, E. M.; PETERSON, G. D.; GORDON, L. J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. **Ecology Letters**, v. 12, n. 12, p. 1394–1404, 2009.

BRANCALION, P. H. S.; GANDOLFI, S.; RODRIGUES, R. R. **Restauração florestal**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

BÜNEMANN, E. K. et al. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, n. September 2017, p. 105–125, 2018.

CALLAHAM, M. A.; RHOADES, C. C.; HENEGHAN, L. A striking profile: Soil ecological knowledge in restoration management and science. **Restoration Ecology**, 2008.

CARDOSO, E. J. B. N.; VASCONCELLOS, R. L. F. P. P.-P. **Floresta com araucária: composição florística e biota do solo**FEALQ, , 2015.

CARDOSO, E. J. N. et al. Soil health : looking for suitable indicators . What should be considered to assess the effects of use and management on soil health ? n. August, p. 274–289, 2013.

CATANI, R. A. **Analise quimica para avaliar a fertilidade do solo**. Piracicaba: Piracicaba Esalq, 1974.

CHERUBIN, M. R. et al. Soil Quality Indexing Strategies for Evaluating Sugarcane Expansion in Brazil.(Research Article). **PLoS ONE**, v. 11, n. 3, p. e0150860, 2016.

CUI, J.; HOLDEN, N. M. The relationship between soil microbial activity and microbial biomass, soil structure and grassland management. **Soil and Tillage Research**, v. 146, n. PA, 2015.

DECAËNS, T. et al. The values of soil animals for conservation biology. **European Journal of Soil Biology**, v. 42, n. SUPPL. 1, 2006.

DOMINATI, E.; PATTERSON, M.; MACKAY, A. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. **Ecological Economics**, v. 69, n. 9, p. 1858–1868, 2010.

DOMÍNGUEZ-HAYDAR, Y. et al. Evaluation of reclamation success in an open-pit coal mine using integrated soil physical, chemical and biological quality indicators. **Ecological Indicators**, v. 103, n. March, p. 182–193, 2019.

DORAN, J. W. **Soil health and global sustainability: Translating science into practice**. Agriculture, Ecosystems and Environment. **Anais**...fev. 2002Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167880901002468>

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 5, p. 601–606, 1988a.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 5, p. 601–606, 1 jan. 1988b.

EMMET-BOOTH, J. P. et al. **A review of visual soil evaluation techniques for soil structureSoil Use and Management**, 2016.

FOLGARATI, P. F. Ant biodiversity and its realtionship to ecosystem function: a review. **Biodiversity and Conservation**, v. 7, p. 1221–1244, 1998.

GATICA-SAAVEDRA, P.; ECHEVERRÍA, C.; NELSON, C. R. Ecological indicators for assessing ecological success of forest restoration : a world review. v. 25, n. 6, p. 850–857, 2017.

GERLACH, J.; SAMWAYS, M.; PRYKE, J. Terrestrial invertebrates as bioindicators: An overview of available taxonomic groups. **Journal of Insect Conservation**, v. 17, n. 4, p. 831–850, 2013.

GONÇALVES, J. L. DE M. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: Piracicaba FEALQ, 2000.

GREINER, L. et al. Soil function assessment: review of methods for quantifying the contributions of soils to ecosystem services. **Land Use Policy**, v. 69, n. September, p. 224–237, 2017.

GUERRA, A. et al. Ecological restoration in Brazilian biomes: Identifying advances and gaps. **Forest Ecology and Management**, v. 458, n. December, 2020.

HARRIS, J. **Soil microbial communities and restoration ecology: Facilitators or followers?Science**, 2009.

HENEGHAN, L. et al. Integrating Soil Ecological Knowledge into Restoration Management. **Restoration Ecology**, v. 16, n. 4, p. 608–617, dez. 2008.

HOLLING, C. S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. **Ecosystems**, v. 4, n. 5, p. 390–405, 2001.

KANG, H. et al. Changes in soil microbial community structure and function after afforestation depend on species and age: Case study in a subtropical alluvial island. **Science of the Total Environment**, v. 625, p. 1423–1432, 2018.

KARLEN, D. L. et al. Soil quality: humankind's foundation for survival.(Research Editorial)(Editorial). **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 58, n. 4, p. 171, 2003.

LAVELLE, P. et al. Soil invertebrates and ecosystem services. **European Journal of Soil Biology**, v. 42, n. SUPPL. 1, nov. 2006.

LAVELLE, P. et al. Soil ecosystem services and land use in the rapidly changing orinoco river basin of colombia. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 185, p. 106–117, 2014.

LAVELLE, P. et al. Ecosystem engineers in a self-organized soil: A review of concepts and future research questions. **Soil Science**, v. 181, n. 3–4, p. 91–109, 2016.

LAVELLE, P. et al. Soil aggregation, ecosystem engineers and the C cycle. **Acta Oecologica**, v. 105, n. December 2019, p. 103561, 2020.

LONDE, V. et al. Reference and comparison values for ecological indicators in assessing restoration areas in the Atlantic Forest. **Ecological Indicators**, v. 110, 1 mar. 2020.

MARICHAL, R. et al. Soil macroinvertebrate communities and ecosystem services in deforested landscapes of Amazonia. **Applied Soil Ecology**, v. 83, p. 177–185, 2014.

MEA, Millennium Ecosystem Assessment series: Ecosystems and Human Well-being: General Synthesis. Island Press, 160pp, 2005.

MENDES, M. S. et al. Look down—there is a gap—the need to include soil data in Atlantic Forest restoration. **Restoration Ecology**, v. 27, n. 2, p. 361–370, 2019.

MOREIRA, F. M. S. **Biodiversidade do solo em ecossistemas brasileiros**. Lavras: Lavras UFLA, 2008.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e Bioquímica do Solo. **Editora UFLA**, v. ed. 2, p. 729, 2006.

NEUTEL, A. M.; HEESTERBEEK, J. A. P.; DE RUITER, P. C. Stability in real food webs: Weak links in long loops. **Science**, v. 296, n. 5570, p. 1120–1123, 2002.

NURIA, R. et al. IBQS: A synthetic index of soil quality based on soil macro-invertebrate communities. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 10, p. 2032–2045, 2011.

OLIVEIRA, R. O estado da arte da ecologia da restauração e sua relação com a restauração de ecossistemas florestais no bioma Mata Atlântica. **Aleph**, 2011.

PALACIOS-VARGAS, JOSÉ G, MEJIA RECAMIER B.E., O. A. **Guía ilustrada para los artrópodos edáficos**. [s.l: s.n.]. v. 20

PEREIRA, N. A. et al. Does the Process of Passive Forest Restoration Affect the Hydrophysical Attributes of the Soil Superficial Horizon ? n. 2011, p. 1–15, 2020.

RODRIGUES, R. R. et al. **Protocolo de Monitoramento para Programas e Projetos de Restauração FlorestalPacto pela Restauração Florestal da Mata Atlântica**, 2013.

RODRIGUES, R. R.; BRANCALION, P. H. S.; NAVE, A. **PROGRAMA DE ADEQUAÇÃO AMBIENTAL E RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA DAS FAZENDAS CAPOAVA , JEQUITIBÁ E INGAZINHO**. Piracicaba: [s.n.].

ROMANELLI, J. P. et al. Assessing ecological restoration as a research topic using bibliometric indicators. **Ecological Engineering**, v. 120, n. March, p. 311–320, 2018.

ROSSI, M. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado.** São Paulo: [s.n.]. v. 124

RUIZ-JAEN, M. C.; AIDE, T. M. Restoration success: How is it being measured? **Restoration Ecology**, v. 13, n. 3, p. 569–577, 2005.

SANTOS, D. C. F. et al. Microbial and soil properties in restoration areas in the jequitinhonha valley, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 6, p. 2199–2206, 2011.

SCHOENHOLTZ, S. H.; MIEGROET, H. V.; BURGER, J. A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, v. 138, n. 1–3, p. 335–356, 2000.

SNYDER, B. A.; HENDRIX, P. F. Current and potential roles of soil macroinvertebrates (earthworms, millipedes, and isopods) in ecological restoration. **Restoration Ecology**, v. 16, n. 4, p. 629–636, 2008.

STRASSBURG, B. B. N.; IRIBARREM, A.; BEYER, H. L. Global priority areas for ecosystem restoration. n. August 2019, 2020.

SUGANUMA, M. S.; DURIGAN, G. Indicators of restoration success in riparian tropical forests using multiple reference ecosystems. **Restoration Ecology**, v. 23, n. 3, p. 238–251, 2015.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 1, n. 4, p. 301–307, 1969.

THOUMAZEAU, A. et al. Biofunctool®: a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A: concept and validation of the set of indicators. **Ecological Indicators**, v. 97, n. October 2018, p. 100–110, 2019.

VALANI, G. P. et al. Soil quality assessments in integrated crop–livestock–forest systems: A review. **Soil Use and Management**, n. October, p. 1–15, 2020.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Eiol. Biochem.**, v. 19, n. 6, p. 1–5, 1987.

VASCONCELLOS, R. L. F. et al. Microbiological indicators of soil quality in a riparian forest recovery gradient. **Ecological Engineering**, v. 53, p. 313–320, 2013a.

VASCONCELLOS, R. L. F. et al. Soil macrofauna as an indicator of soil quality in an undisturbed riparian forest and recovering sites of different ages. **European Journal of Soil Biology**, v. 58, p. 105–112, 2013b.

VELASQUEZ, E. et al. This ped is my ped: Visual separation and near infrared spectra allow determination of the origins of soil macroaggregates. **Pedobiologia**, 2007.

VELASQUEZ, E.; LAVELLE, P. Soil macrofauna as an indicator for evaluating soil based ecosystem services in agricultural landscapes. **Acta Oecologica**, v. 100, n. September, p. 103446, 2019.

VELASQUEZ, E.; LAVELLE, P.; ANDRADE, M. GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. **Soil Biology and Biochemistry**, 2007.

VELOSO, H. P. **Classificação da Vegetação Brasileira, Adaptada a um Sistema Universal**Rio de Janeiro, 1991.

VIANI, R. A. G. et al. Protocol for monitoring tropical forest restoration: Perspectives from the atlantic forest restoration pact in Brazil. **Tropical Conservation Science**, v. 10, 2017.

WORTLEY, L.; HERO, J. M.; HOWES, M. Evaluating ecological restoration success: A review of the literature. **Restoration Ecology**, v. 21, n. 5, p. 537–543, 2013.

ZAGATTO, M. R. G. et al. Interactions between mesofauna, microbiological and chemical soil attributes in pure and intercropped Eucalyptus grandis and Acacia mangium plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 433, n. November 2018, p. 240–247, 2019a.

ZAGATTO, M. R. G. et al. Soil mesofauna in consolidated land use systems: How management affects soil and litter invertebrates. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 2, p. 165–171, 2019b.

MATERIAL COMPLEMENTAR

ANEXO A: Médias, análises e discussões sobre os atributos do solo (químicos, físicos, diversidade da macrofauna e agregação do solo) referente ao Artigo 1.

ANEXO B: Médias, análises e discussões sobre os atributos do solo (microbiológicos, diversidade mesofauna na serapilheira) referente ao Artigo 2.

ANEXOS

ANEXO A

ATRIBUTOS QUÍMICOS

Nas áreas de Restauração Ativa, houve o manejo prévio para o plantio das mudas com preparo do solo, dessecamento (controle químico) do capim braquiária, subsolagem na linha do plantio (devido a alta resistência a penetração do solo encontrada nas áreas com valores de até 2,5 Mpa). Em 2012 na execução do Programa de Adequação Ambiental foram realizadas coletas de solo para verificar a necessidade de adubação dos 12 locais analisados: 7, 8, 10 e 12 correspondem as áreas (RAA, RAB, RAC, PAA, PAB, PAC e FES) remarcadas em 2017 (Tabela 01). No momento da implantação não foi realizada calagem devido ao teor de Cálcio (Ca) encontrado em 2012 (8 a 41 $mmol_c/dm^3$), porém foi aplicado controle químico de formigas cortadeiras e do capim durante os 2 primeiros anos.

Áreas de Pastagem Uso Contínuo (PUC) em 2012 predominavam na fazenda, nestas áreas o pH do solo teve média de 4.6, nestes locais houve a conversão do tipo de uso para Pastagem Abandonada e Restauração Ativa, após 5 anos registra-se uma queda no pH do solo, sendo mais acentuada nas áreas em processo de restauração com média de pH 4.1. O teor de alumínio presente no solo no ponto 7 sobre de 1 $mmol_c dm^{-3}$ em 2012 para 2.7 e 3.0 $mmol_c dm^{-3}$ em 2017. Já no ponto 10 que corresponde as áreas RAC e PAC que em 2012 apresentavam um pH baixo, mas seu teor de Al^{+3} não estava excessivo, nestas áreas com a mudança de uso do solo em 2017, não sofreu queda brusca no pH como ocorre em RAB, PAB. A proximidade das áreas RAC e PAC com a FES pode ser positiva em relação a manutenção do pH do solo sob a proteção da área florestal, no entrando em relação a matéria orgânica aferida pelo carbono do solo todas as situações ambientais de 2017 possuem teores menores em relação a situação anterior de 2012. Algumas áreas em processo de Restauração Ativa, a subsolagem, apesar de importante para a estrutura física do solo, poderia interferir na disposição das camadas do solo, trazendo à tona solos com maior potencial ácido das camadas mais profundas do solo. A Soma de Bases nas áreas de Restauração Ativa em 2017 possui teores maiores em relação a situação anterior de 2012 e também em relação a Pastagem Abandonada, ou seja, a adubação realizada na implantação das áreas de restauração pode ser efetiva. A capacidade de Troca Catiônica Efetiva é maior no ecossistema de referência (FES), porém nas áreas com Restauração Ativa após 5 anos (2017) encontra-se valores de CTCe maiores em relação a situação ambiental anterior (2012), revelando a elevação de sua fertilidade química.

Tabela 1: Atributos químicos do solo na Fazenda Capoava, Jequitibá e Ingazinho em 2012 e 2017, em 8 tipos de uso do solo: PUC=Pastagem Uso Contínuo; FES=Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual; PAA=Pastagem Abandonada A; PAB=Pastagem Abandonada B; PAC=Pastagem Abandonada C; RAA=Restauração Ativa A; RAB=Restauração Ativa B; RAC=Restauração Ativa C.

Local e ano	Tipo de uso do solo (0-20cm)		mmol$_c$dm^{-3}		mg/dm^{-3}	mmol$_c$dm^{-3}						V%	m%	g/kg$_{-1}$	g/kg$_{-1}$
		pH	**Al^{+3}**	**H+Al**	**P**	**K**	**Ca**	**Mg**	**SB**	**CTC**	**CTCE**	**SatB**	**SatAl**	**C (via úmida)**	**C (analisador elementar)**
Ponto 07 (2012)	**PUC**	4,7	1	24	5	3,3	19	4	26,5	50,5	27,3	52	3,64	26	-
Ponto 07 (2017)	**PAA**	4,3	2,7	59,1	14	3,3	14,5	5,9	23,6	82,7	26,4	28,7	12,5	-	21
Ponto 07 (2017)	**RAA**	4,2	3	61,9	13,2	1,8	25,9	7,3	35	96,9	38	35,7	10,3	-	17
Ponto 08 (2012)	**PUC**	4,7	3	45	4	2,3	17	4	23,5	68,5	26,3	34	11,32	33	-
Ponto 08 (2017)	**PAB**	4,4	2,3	49,2	9,5	3,1	10	4,7	17,8	67	20,1	26,3	14,2	-	23
Ponto 08 (2017)	**RAB**	4	5,5	94,9	13,8	2,5	23,8	5	31,3	126,2	36,8	24,6	18,2	-	22
Ponto 10 (2012)	**PUC**	4,4	3	32	5	3,4	14	6	23,6	55,6	26,4	42	11,28	24	-
Ponto 10 (2017)	**PAC**	4,7	0,9	44,3	11,7	4	19,2	8,1	31,3	75,6	32,2	41	3,8	-	19
Ponto 10 (2017)	**RAC**	4,3	1,7	61,8	14,2	2,5	26,5	7,1	36,1	97,9	37,8	36,8	4,9	-	19
Ponto 12 (2012)	**FES**	4,7	1	40	6	4,1	41	11	56,3	96,3	57,1	58	1,75	37	-
Ponto 12 (2017)	**FES**	5,2	0,4	30,4	20,5	4	45,5	18,7	68,2	98,6	68,5	68,1	0,6	-	42
Ponto 13 (2017)	**PUC**	4,8	1,4	47,4	17,7	4,1	31,8	11,3	47,2	94,6	48,5	48,4	3,9	-	37

Tabela 2: Média e desvio padrão dos valores dos atributos químicos do solo na profundidade de 0-10cm em 8 tipos de uso do solo: PUC=Pastagem Uso Contínuo (n=9); FES=Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (n=9); PAA=Pastagem Abandonada A (n=9); PAB=Pastagem Abandonada B (n=9); PAC=Pastagem Abandonada C (n=9); RAA=Restauração Ativa A (n=9); RAB=Restauração Ativa B (n=9); RAC=Restauração Ativa C (n=9). *SMP = (curva de calibração entre o pH na solução tampão e o pH em acetato de cálcio), descrita em RAJI et al. (2001).

Método	$CaCl_2$	KCL	SMP*	Resina	Resina Trocável			SB= Ca+Mg+K	CTC=SB+(H+Al)	CTCe= SB + Al	100*SB/CTC	(Al*100)/(SB+Al)	Analisador Elementar		Relação
Tipos de uso do solo (0-10 cm)	Unidade	$mmol_c dm^{-3}$	$mmol_c dm^{-3}$	mg/dm^{-3}	$mmol_c dm^{-3}$			$mmol_c dm^{-3}$	$mmol_c dm^{-3}$	$mmol_c dm^{-3}$	V %	m %	%	%	%
	pH	$Al+^3$	H+Al	P	K	Ca	Mg	Soma de Bases	CTC	CTC efetiva	Saturação por Bases	Saturação por Alumínio	C	N	C/N
PUC	5,1 (0,4)	0,6 (0,5)	38,8 (13)	22,8 (6,8)	4,4 (1,1)	40,2 (18,3)	15,9 (4,3)	60,5 (20,2)	99,4 (14,1)	61,1 (20)	59,9 (14,3)	1,2 (1,2)	4,5 (1,3)	0,34 (0,09)	13
FES	5,4 (0,5)	0,4 (0,3)	29,9 (11,8)	26,1(10,2)	4,0 (1,2)	47,2 (14,4)	22,1 (7,3)	73,3 (18,8)	103 (17,3)	73,6 (18,8)	70,6 (12,4)	0,6 (0,6)	5,9 (2,5)	0,58 (0,12)	10
PAA	4,5 (0,3)	1,6 (1,3)	55,4 (16)	18,7 (8,3)	4,1 (1,4)	18,8 (5,2)	8,3 (2,9)	31,2 (9,1)	86,7 (9,7)	32,8 (8,3)	36,9 (12,9)	5,8 (5,2)	2,5 (0,2)	0,19 (0,02)	13
PAB	4,6 (0,3)	1,3 (0,7)	46,3 (12,5)	12,9 (4,7)	4,0 (1,1)	14,1 (4,8)	6,6 (1,4)	24,8 (6,8)	71,1 (10,1)	26,1 (6,3)	35 (11,8)	5,6 (3,8)	2,8 (0,1)	0,21 (0,00)	13
PAC	4,8 (0,2)	0,4 (0,4)	42,6 (9,1)	13,1 (2,7)	4,3 (1,8)	24,3 (5,3)	10,5 (3)	39,1 (9,3)	81,6 (8,1)	39,5 (9)	47,8 (9,8)	1,2 (1,4)	2,3 (0,4)	0,18 (0,03)	13
RAA	4,4 (0,3)	1,6 (1,6)	58,4 (19,3)	18 (3,3)	2,5 (0,7)	34,7 (9)	10,4 (3,4)	47,7 (12,5)	106 (16)	49,3 (11,4)	45,7 (11,8)	3,8 (4,9)	2,0 (0,2)	0,16 (0,02)	11
RAB	4,2 (0,2)	2,9 (1,3)	83,8 (8,5)	16,3 (4)	3,1 (1)	31,5 (9,6)	7,7 (3,5)	42,3 (13,4)	126 (13)	45,2 (12,2)	33,1 (8,2)	7,5 (4,9)	2,4 (0,3)	0,20 (0,02)	12
RAC	4,4 (0,2)	1,4 (1)	63,6 (13)	16,3 (3,7)	3,0 (0,9)	26,6 (6,2)	7,1 (2,9)	36,6 (9,3)	100 (13,8)	38 (8,8)	36,7 (8,5)	4,0 (3)	2,2 (0,3)	0,18 (0,02)	11

Tabela 3: Média e desvio padrão dos valores dos atributos químicos do solo na profundidade de 10-20 cm em 8 tipos de uso do solo: PUC=Pastagem Uso Contínuo (n=3); FES=Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (n=3); PAA=Pastagem Abandonada A (n=3); PAB=Pastagem Abandonada B (n=3); PAC=Pastagem Abandonada C (n=3); RAA=Restauração Ativa A (n=3); RAB=Restauração Ativa (n=3); RAC=Restauração Ativa C (n=3). *SMP = (curva de calibração entre o pH na solução tampão e o pH em acetato de cálcio), descrita em RAJI et al. (2001).

Método	$CaCl_2$	KCL	SMP	Resina	Resina Trocável			SB= Ca+Mg+K	CTC=SB+(H+Al)	CTCe= SB + Al	100*SB/CTC	(Al*100)/(SB+Al)	Analisador Elementar		Relação
Tipos de uso do solo (10-20 cm)	Unidade	$mmol_c dm^{-3}$	$mmol_c dm^{-3}$	mg/dm^{-3}	$mmol_c dm^{-3}$			$mmol_c dm^{-3}$	$mmol_c dm^{-3}$	$mmol_c dm^{-3}$	V %	m %	%	%	%
	pH	$Al+^3$	H+Al	P	K	Ca	Mg	Soma de Bases	$CTC_{pH7.0}$	CTC_e	Saturação por Bases	Saturação por Alumínio	C	N	C/N
PUC	4,5 (0,3)	2,2 (0,6)	56 (3,5)	12,4 (4,6)	3,8 (1,7)	23,4 (6,9)	6,6 (3,2	33,8 (11,2)	89,8 (14,2)	36 (10,7)	37 (6,6)	6,7 (3,7)	2,9 (0,7)	0,23 (0,05)	12
FES	5,1 (0,5)	0,4 (0,2)	31 (15,7)	14,9 (1)	4,1 (1,9)	43,7 (20,8)	15,2 (4,7)	63 (26,7)	94 (11,4)	63,3 (26,5)	65,5 (19,9)	0,7 (0,6)	2,5 (0,4)	0,25 (0,04)	9
PAA	4,1 (0)	3,8 (1,2)	62,7 (8,1)	9,4 (2)	2,5 (1)	10,2 (1,3)	3,4 (0,7)	16,1 (2)	78,7 (7,1)	19,9 (1,8)	20,6 (3,5)	19,1 (5,8)	1,7 (0,06)	0,14 (0,00)	12
PAB	4,1 (0,1)	3,3 (1,9)	52 (0)	6,1 (1)	2,3 (0,9)	5,9 (3,1)	2,8 (1,3)	10,9 (5,3)	62,9 (5,3)	14,2 (6,6)	16,9 (7)	22,8 (7)	1,7 (0,1)	0,14 (0,00)	12
PAC	4,5 (0,5)	1,4 (1,5)	46 (10,6)	10,2 (2,7)	3,6 (1,8)	14,1 (4,8)	5,7 (2,1)	23,5 (7)	69,5 (8)	24,9 (5,8)	34,1 (10,1)	6,4 (7,7)	1,5 (0,3)	0,12 (0,02)	12
RAA	3,9 (0,2)	4,4 (2,5)	65,3 (12,7)	8,5 (1,9)	1,1 (0,2)	17 (3)	4,2 (0,9)	22,3 (3,7)	87,6 (13,2)	26,7 (2,3)	25,6 (4,7)	16,7 (9,7)	1,4 (0,2)	0,12 (0,02)	11
RAB	3,8 (0,2)	8,2 (2,6)	106 (16,7)	11,4 (2,1)	2,0 (1,1)	16,1 (3,5)	2,2 (1,1)	20,3 (4,2)	126,3 (19,7)	28,5 (3)	16,1 (2,2)	29 (9,6)	2,0 (0,09)	0,17 (0,00)	11
RAC	4,2 (0,1)	2,1 (0,3)	60 (6,9)	12,1 (0,9)	2,1 (0,6)	26,4 (11)	7,1 (2,3)	35,6 (13,1)	95,6 (6,2)	37,7 (13,4)	36,8 (10,9)	5,8 (1,4)	1,7 (0,2)	0,15 (0,01)	11

O pH do solo é o parâmetro mais comumente reportado em análises no solo na área de restauração florestal (MENDES et al., 2019) este atributo químico influencia fortemente as reações químicas na solução do solo e aparece em quase todos os tipos de avaliação da fertilidade em solos agrícolas, sendo a faixa de pH entre 5,5 e 6,0 recomendada para a maioria das culturas.

Revisando os parâmetros químicos como indicadores de qualidade do solo em solos florestais, agrícolas e também em pastos, Schoenholtz et al. (2000) encontraram definições para um pH ótimo quando >5 para estes autores, os dados químicos de fertilidade são mais rotineiramente encontrados na base de dados do solo, devido a sua medição simples e de baixo custo. Somente no solo do Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FES) encontramos valores de pH > 5,0 tanto na camada de 0-10 quando na camada de 10-20.

Os dados de pH do solo (atividade do íon H^+ na solução do solo) na profundidade 0-10cm diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo (p<0,0001, F=11,63), (Figura 1), a média entre todos os tipos de uso do solo corresponde a pH = 4,6 nesta profundidade.

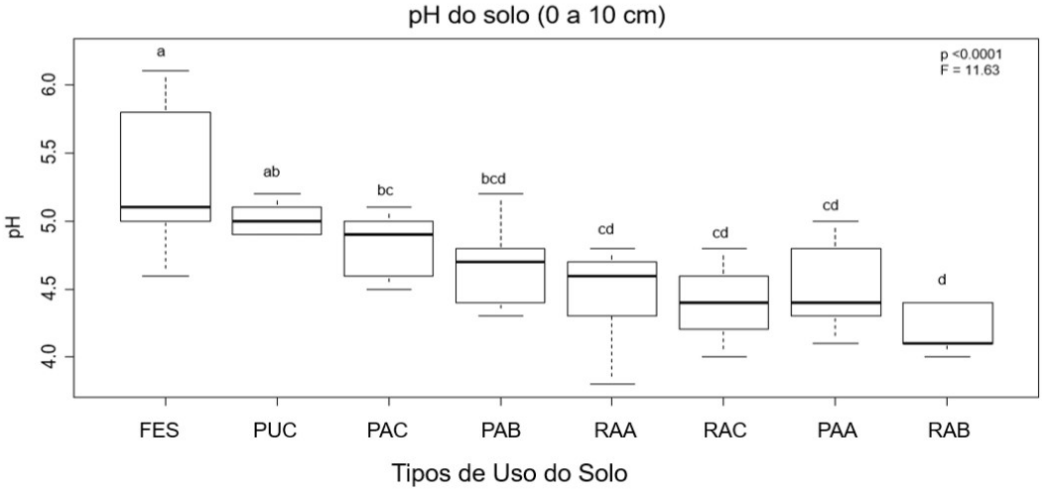


Figura 01: Valores de pH do solo, variáveis de 0-10cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a, b, c, d: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

Para interpretação da acidez ativa do solo (pH em $CaCl_2$) temos que: acidez muito alta (pH<4,3), acidez alta (pH 4,4 a 5,0), acidez média (pH 5,1 a 5,5), acidez baixa (pH 5,6 a 6,0) e acidez muito baixa (pH> 6,0) (RAIJ 1999). Neste parâmetro químico a Floresta (FES) e a Pastagem Uso Contínuo (PUC) não diferem significativamente, porém observamos que variabilidade dos dados em FES é de pH>5. As áreas de Pastagem Abandonada (PAC e PAB) não diferem significativamente do pH encontrado na Pastagem Uso Contínuo (PUC), porém a área de Restauração Ativa B (RAB) difere-se estatisticamente devido a menor média de pH = 4,2. Na profundidade 10-20cm os valores de pH diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo (p<0,0005, F=7,29), (Figura 2) a média entre todos os tipos de uso do solo corresponde a pH = 4,2 nesta profundidade. Na camada de 10-20 centímetros os valores de pH são mais baixos em todos os tipos de usos do solo em relação a camada de 0-10cm. As áreas FES, PAC e PUC não diferem significativamente, apresentando valores médios de pH entre 5,1 e 4,5, as restantes com valores médios de pH entre 4,1 e 3,7 apresentam caráter mais ácido em relação as anteriores.

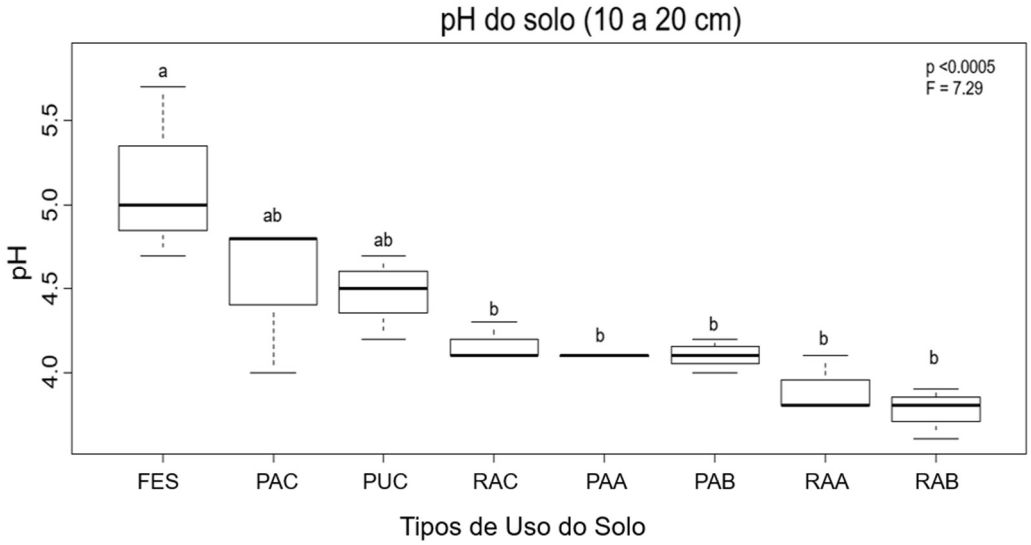


Figura 2: Valores de pH do solo, variáveis de 10-20cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a, b: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

Os dados de alumínio trocável no solo (presença de Al^{+3} na solução do solo) na profundidade 0-10cm diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo ($p<0,0001$, $F=6,22$), (Figura 3), a média corresponde a $Al^{+3}=1,25$ $mmol_c dm^{-3}$ nesta profundidade. Valores considerados baixos de alumínio trocável são $>0,5$ $mmol_c dm^{-3}$, os valores entre 0,5 e 1,0 $mmol_c/dm^{-3}$ são considerados médios, os valores maiores que 1,0 mmolcdm-3 podem ser indício do excesso deste elemento (BRADY & WEIL, 2002). A área de Restauração Ativa B (RAB) possui teor de Al^{+3} mais alto em média 2,85 $mmolcdm^{-3}$ e difere estatisticamente das áreas PAB, FES, PUC e PAC que apresentaram teores médios e baixos de alumínio trocável no solo (1,27 a 0,36 $mmol_c/dm^{-3}$). As áreas de Restauração Ativa (RAA e RAC) e no Pasto Abandonado A (PAA) apresentaram elevados teores de Al^{+3} de 1,38 a 1,61 $mmol_c/dm^{-3}$, não diferindo estatisticamente entre si.

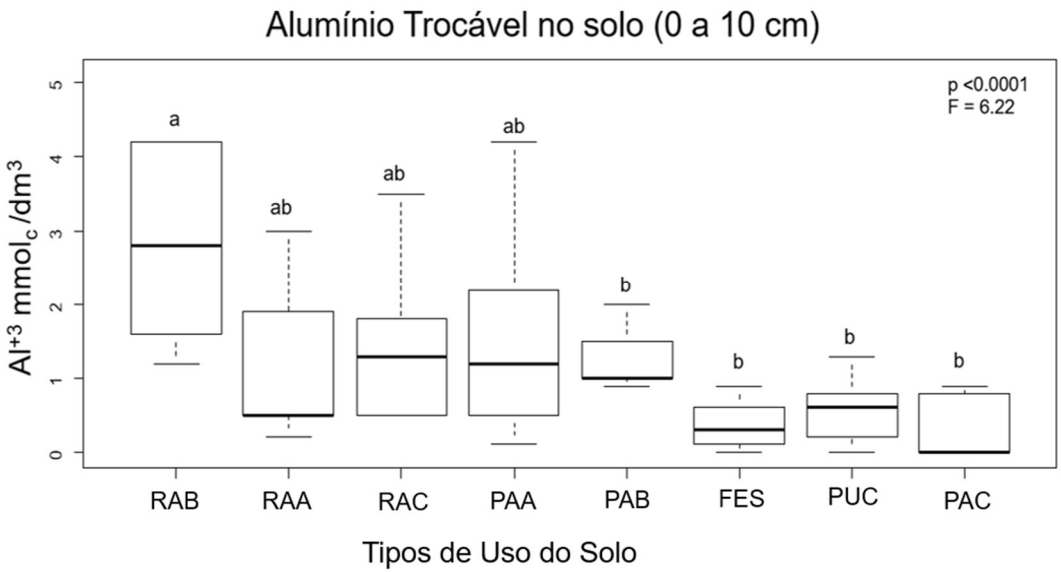


Figura 3: Valores de Alumínio Trocável, variáveis de 0-10cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a, b: são referentes ao teste Tukey, áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

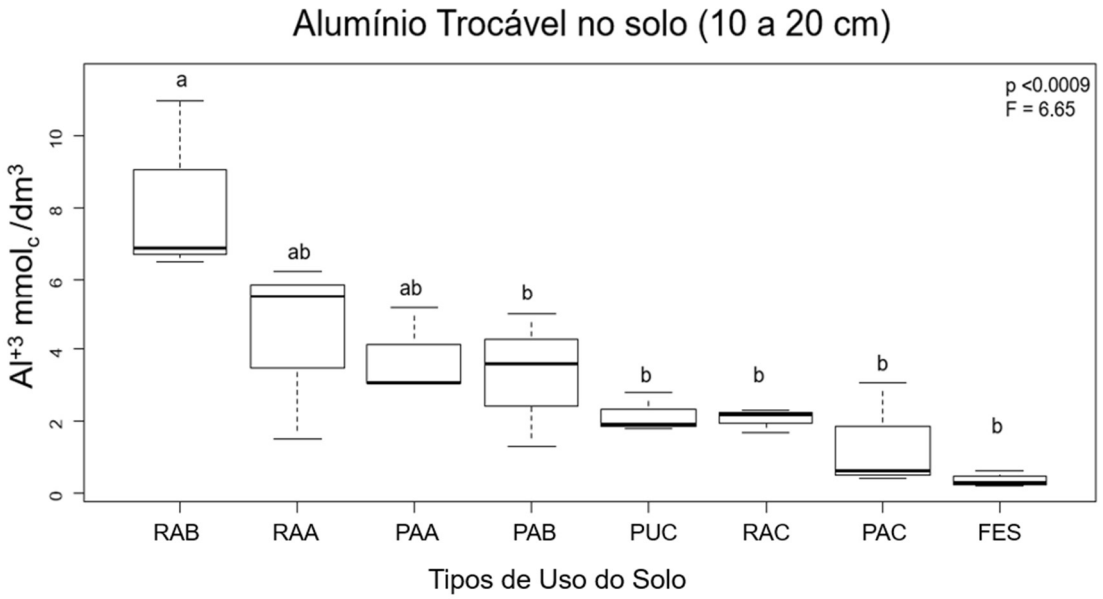


Figura 4: Valores de Alumínio Trocável, variáveis de 10-20cm, tipos de uso do solo: : FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a,b: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

Na profundidade 10-20cm, os valores encontrados de Alumínio Trocável no solo diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo ($p<0,0009$, $F=6,65$), (Figura 4), a média entre todos os tipos de uso do solo corresponde a $Al^{+3}=3,20$ $mmol_c/dm^{-3}$ nesta profundidade.

A acidez potencial do solo é o teor de H+Al apresentado sem cargas, representa formas não trocáveis, funcionando como um reservatório ou potencial ácido que leva em conta a presença de H e Al que pode transformar-se em Al^{3+} e H^{+} disponíveis no solo. Esta acidez é utilizada para o cálculo da Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e da Saturação por Bases (SB). Os dados de H+Al na profundidade 0-10cm diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo ($p<0,0001$, $F=14,34$), (Figura 5), a média entre todos os tipos de uso do solo corresponde a H+Al=52 $mmolcdm^{-3}$ nesta profundidade.

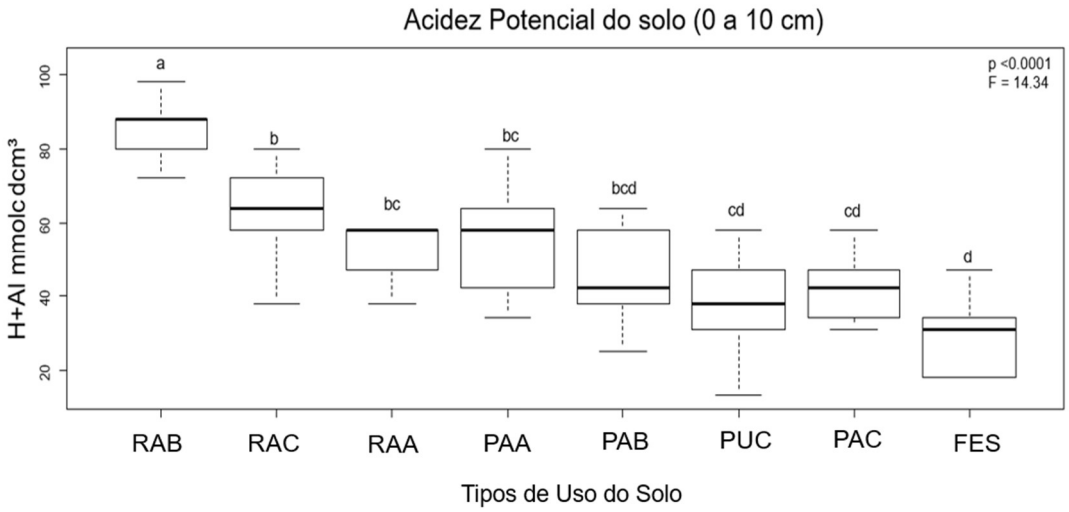


Figura 5: Valores de Acidez Potencial do solo (H+Al), variáveis de 0-10cm, tipos de uso do solo: : FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a, b, c, d: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

Dados da Acidez Potencial na profundidade 10-20cm diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo ($p<0,0001$, $F=12,12$), (Figura 6), a média entre todos os tipos de uso do solo corresponde a H+Al=59,8 $mmol_c dm^{-3}$ nesta profundidade. Em ambas as profundidades a área RAB atinge o máximo de acidez potencial (H+Al >100 $mmol_c dm^{-3}$).

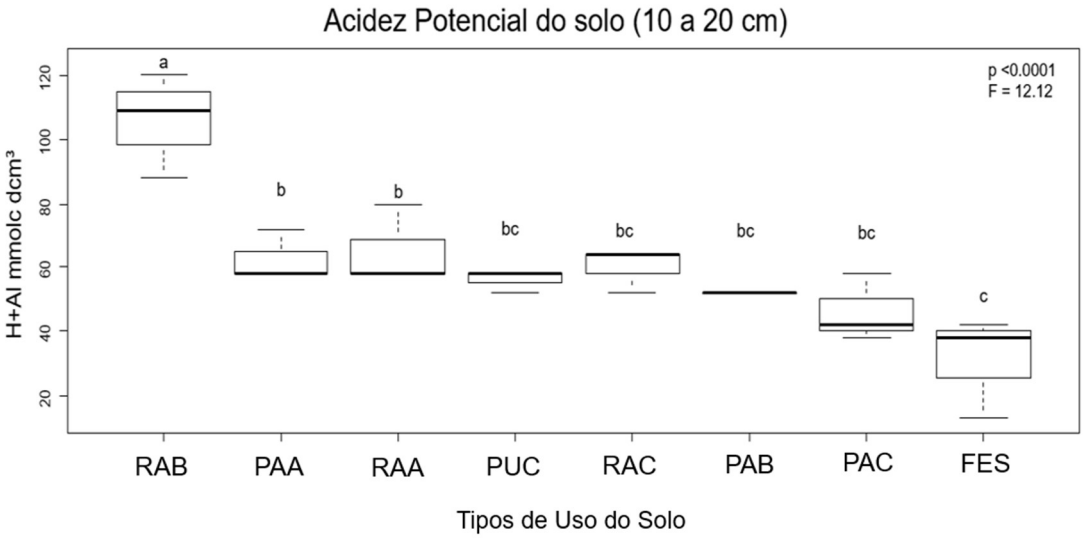


Figura 6: Valores de Acidez Potencial do solo (H+Al), variáveis de 10-20cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a, b, c: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

Dados de fósforo na profundidade 0-10cm (Figura 7) diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo ($p<0,0001$, $F=5,13$), a média entre todos os tipos de uso do solo corresponde a P= 18 mg/dm^3 nesta profundidade. A fonte de P orgânico do solo provem da decomposição dos restos vegetais e animais realizados pelas bactérias, fungos e actinomicetos, através a ação das fosfatases (enzimas que atuam na decomposição da matéria orgânica do solo), assim o P inorgânico é liberado podendo ser absorvidos pelas plantas, imobilizado ou adsorvido pelas argilas presentes no solo.

No Fragmento Florestal (FES) encontramos o maior teor de P no solo, ou seja, é abundante a presença de matéria orgânica em decomposição fornecendo fósforo. Em contraponto nas áreas de Pastagem Abandonada (PAC e PAB) o teor de P é o mais baixo entre os tipos de uso do solo, indicando menor acúmulo de matéria orgânica no solo.

Dados de fósforo na profundidade 10-20cm (Figura 8) diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo ($p<0,009$, $F=4,08$), a média entre todos os tipos de uso do solo corresponde a P= 10,6 mg/dm3 nesta profundidade.

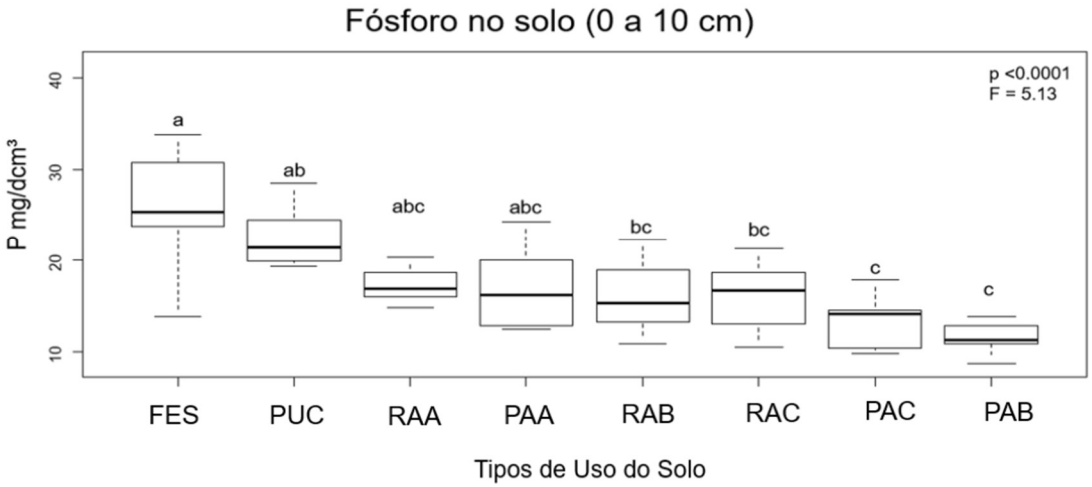


Figura 7: Valores de Fósforo no solo, variáveis de 0-10cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a,b, c: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

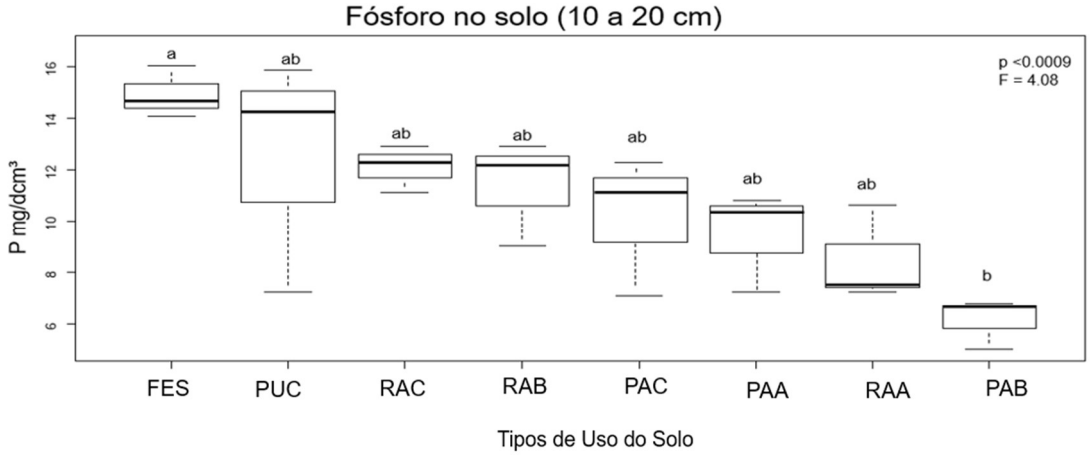


Figura 8: Valores de Fósforo no solo, variáveis de 10-20cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a,b: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

Nas áreas estudadas K trocável no solo varia de forma mais suave entre os tipos de uso do solo do que os outros elementos, em relação a este macronutriente o Fragmento de Floresta (FES), não apresentou diferença acentuada dos outros tipos de uso do solo (Figura 09). Na área de Pastagem Abandonada C (PAC) encontra-se a maior variabilidade em relação ao teor de potássio no solo, os sistemas de pousio tendem a elevar os níveis de K-trocável da camada superficial do solo. Na implantação das áreas de Restauração Ativa, foi utilizado o cloreto de Potássio (KCl) na adubação de plantio, no entanto, na área de Restauração Ativa A (RAA), este potássio ser perdido, retornando a forma não-trocável e ou utilizado em maior quantidade. Porém, na silvicultura a resposta à adubação potássica e a quantidade de K absorvida nem sempre é correlacionada com o K-trocável (GONÇALVES, 2000).

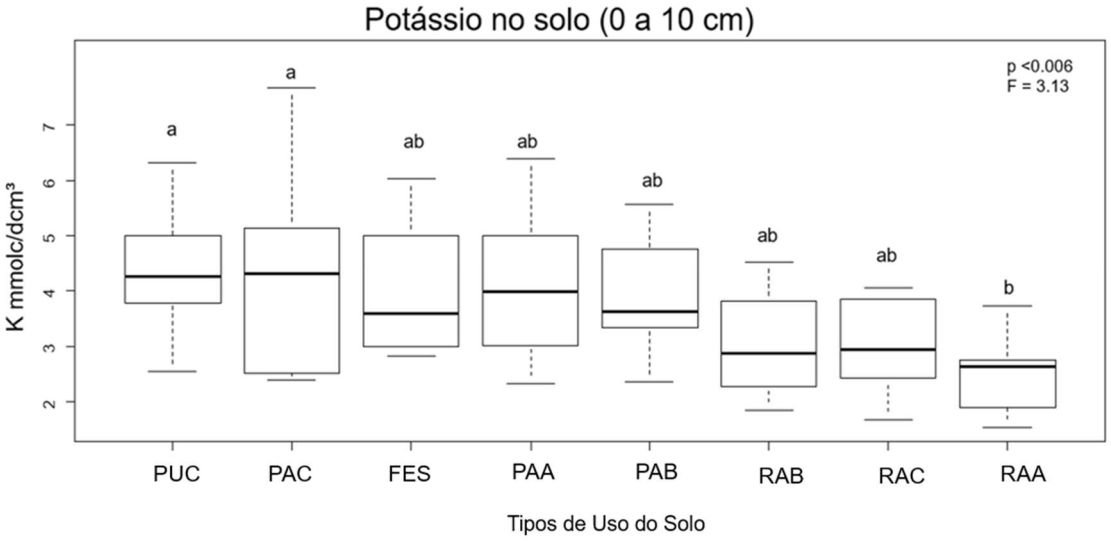


Figura 09: Valores de K no solo para os tipos de usos do solo variáveis de 0-10cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a,b: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

No Fragmento de Floresta (FES) a variabilidade do Ca^{+2} encontra-se entre 25 e 70 $mmol_c/dm^{-3}$, com teor médio de 47 $mmol_c/dm^{-3}$, (Figura 10), os solos com maiores teores de matéria orgânica tendem a ter altos teores de Ca, podendo ser disponibilizado de acordo com a taxa de decomposição. Os limites de interpretação do teor de Ca trocável são: baixo < 20 $mmol_c/dm^{-3}$, médio = 20 a 40 $mmol_c/dm^{-3}$ e alto quando Ca^{2+} > 40 $mmol_c/dm^{-3}$ (CATANI, 1974), em nossas amostras o Fragmento de Floresta (FES) possui teor alto e a Pastagem Uso Contínuo (PUC) possui teor médio.

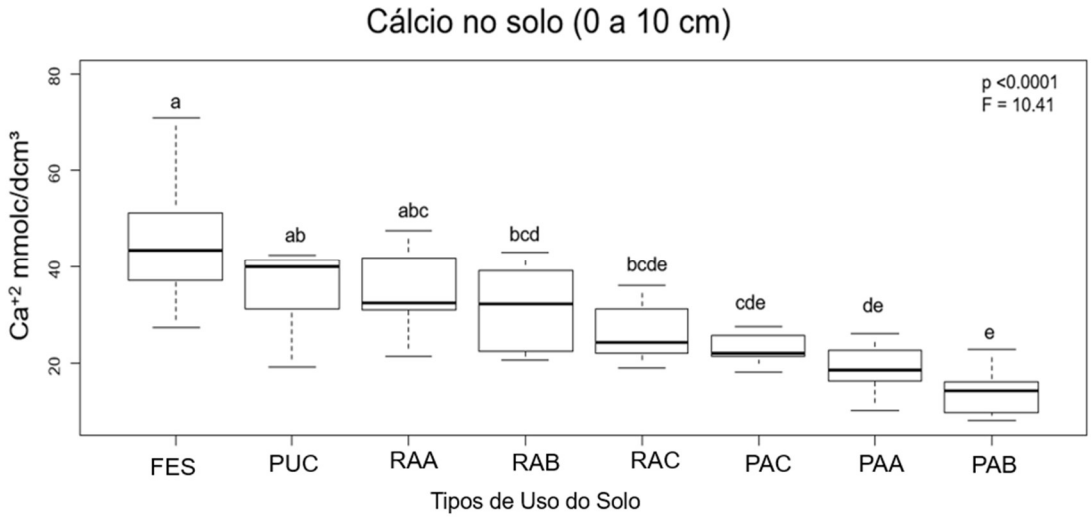


Figura 10: Valores de Cálcio do solo para variáveis de 0-10cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a,b,c,d,e: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

Nas áreas de Restauração Ativa (RAA, RAB, RAC) onde o plantio de espécies arbóreas foi realizado há 5 anos apresentaram teores médios de Ca^{+2} possuem variabilidade entre 20 e 40 $mmol_c dm^{-3}$ de Ca. As espécies arbóreas podem alcançar o Ca^{+2} e Mg^{+2} pela interceptação da CTC das raízes, nas florestas a necessidade de cálcio disponível é menor do que os teores necessários para manter o pH adequado nas culturas agrícolas (GONÇALVES, 2000).

Enquanto que nas áreas de Pastagem Abandonada (PAA, PAB, PAC), encontramos teores baixos de Ca < 20 $mmol_c dm^{-3}$, ou seja, não está conservando este nutriente no sistema.

Dados de cálcio na profundidade 10-20cm (Figura 11) diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo ($p<0,0034$, $F=5,07$), a média entre todos os tipos de uso do solo corresponde a Ca= 15,6 $mmol_c/dm^3$ nesta profundidade.

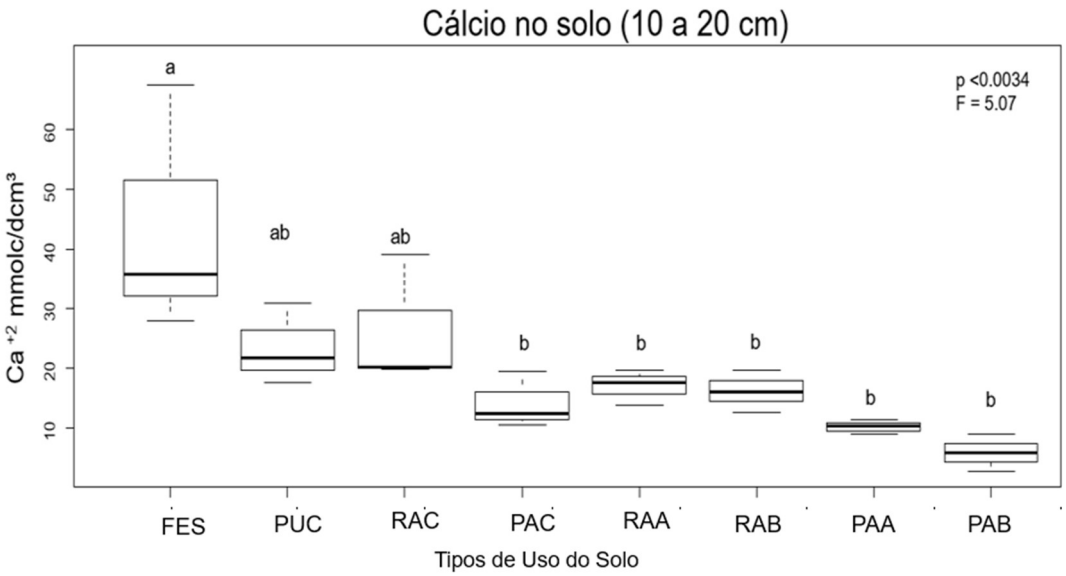


Figura 11: Valores de Cálcio do solo para variáveis de 10-20cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a, b: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

O Cálcio e o Magnésio possuem alta correlação de Pearson ($r = 0,76$), conforme a Figura 12, quanto maior o teor de Ca, maior o teor de Mg. O Teor de magnésio no solo depende da textura do solo e do conteúdo de matéria orgânica, observamos (Figura 13) na área de RAB que valores de Mg^{+2} são os menores em relação as outras áreas e que anteriormente apresentamos nesta área o resultado de pH baixo e maior acidez do solo. A acidez no solo e a proporção baixa de Mg^{+2} na CTC pode desencadear a deficiência de magnésio nas áreas em processo de Restauração Ativa e Pastagens Abandonadas. No Pasto de Uso Contínuo e na área de Pastagem Abandonada C (PAC) o teor de Mg não difere estatisticamente.

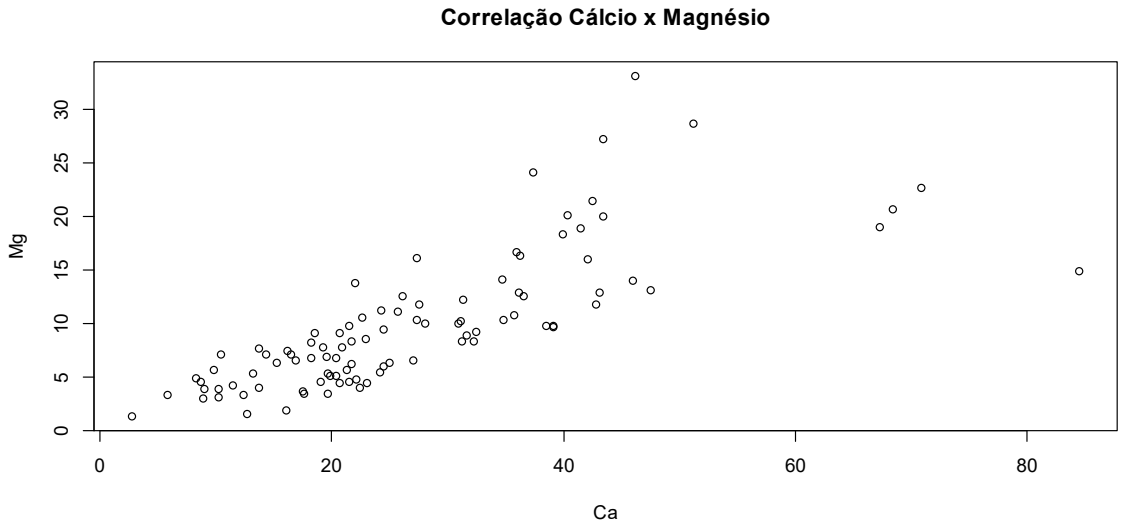


Figura 12: Correlação Ca e Mg com variáveis de 0-20cm em todos tipos de uso do solo.

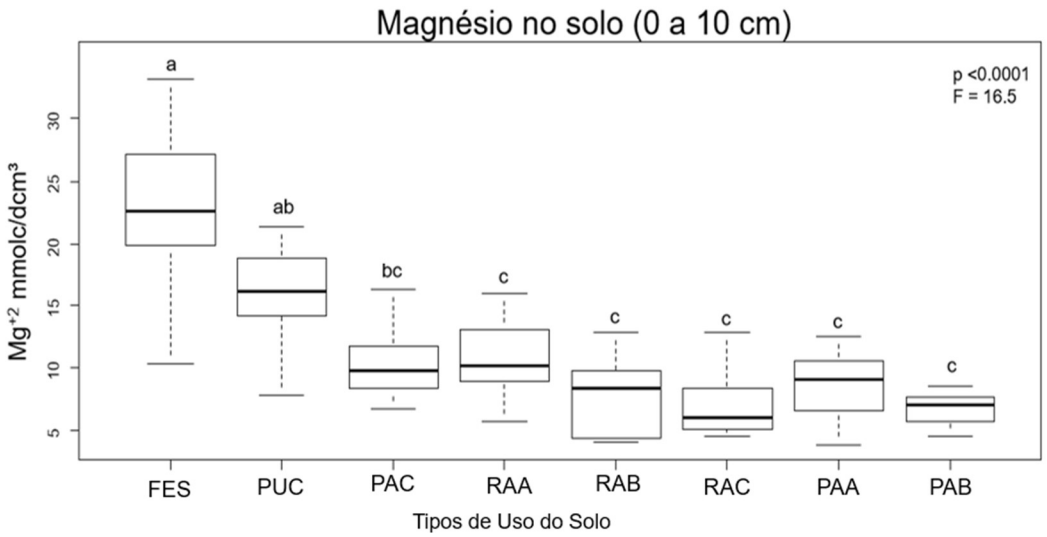


Figura 13: Valores de Magnésio Trocável no solo variáveis de 0-10cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a,b,c: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

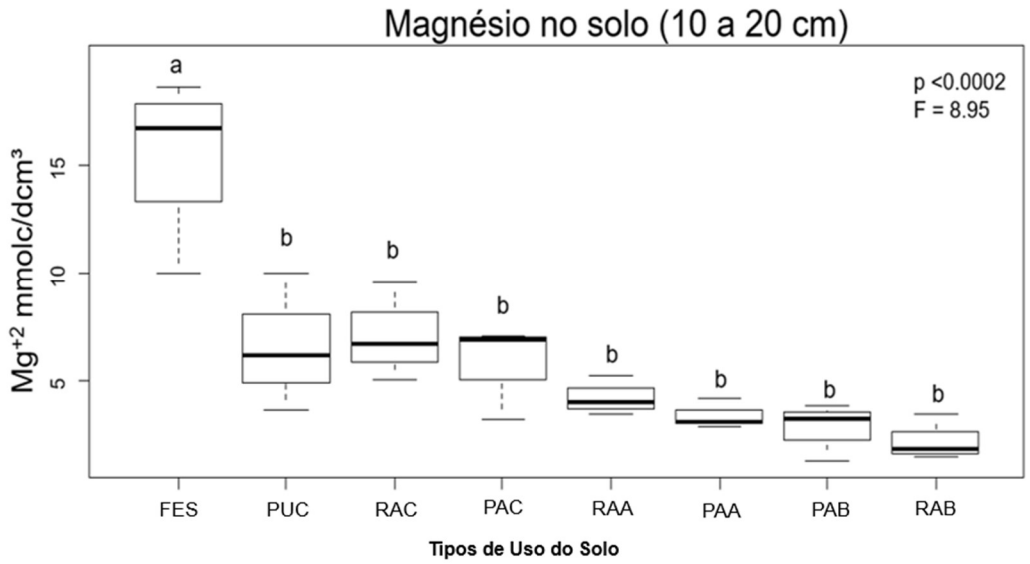


Figura 14: Valores de Magnésio Trocável no solo variáveis de 10-20cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a,b: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

A soma das bases trocáveis do solo (Ca^{2+}, Mg^{2+}e K^{+}) traz informações sobre o montante de cátions disponíveis para as plantas. A maior soma de bases foi encontrada em FES (73 $mmol_c dm^{-3}$), apesar de um grande variabilidade o PUC, neste item não alcança média próxima a da floresta (50 $mmol_c dm^{-3}$), na camada de 10-20cm, é comum os pastos apresentarem sinais de compactação e menor conteúdo de matéria orgânica, neste caso menor presença de cátions trocáveis, na pastagem soma de bases é 50% menor na camada de 10-20 em relação a 0-10cm, (Figuras 15 e 16). Nas áreas de Restauração Ativa (RAB e RAA) na camada 0-10cm não diferem da Pastagem (PUC) em relação a soma de bases trocáveis, mas na camada de 10-20 a Restauração Ativa C (RAC) tem mais disponibilidade de bases trocáveis.

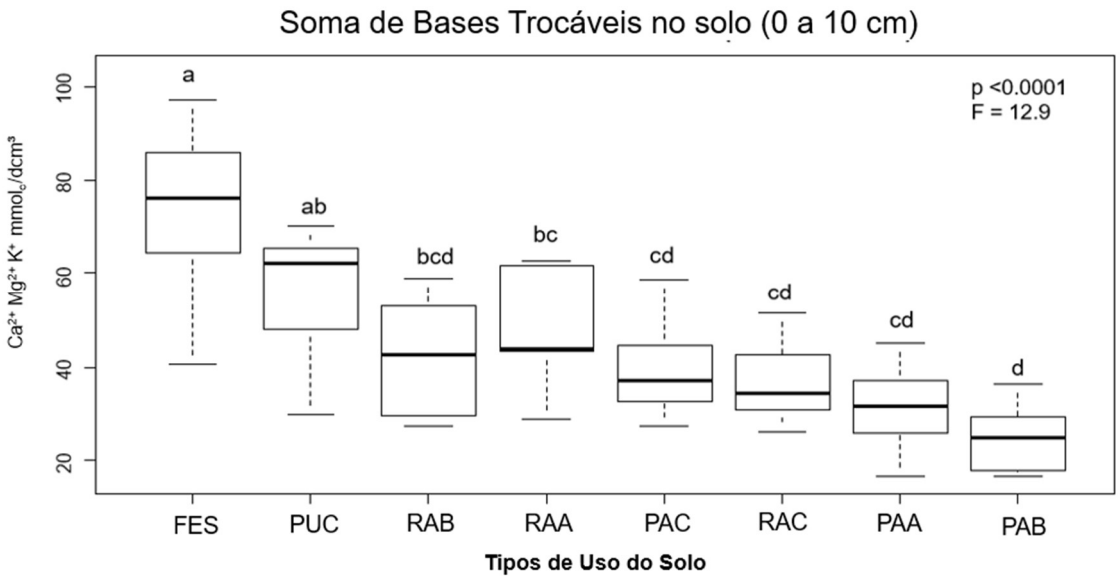


Figura 15: Soma de Bases, variáveis de 0-10cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a, b, c, d: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

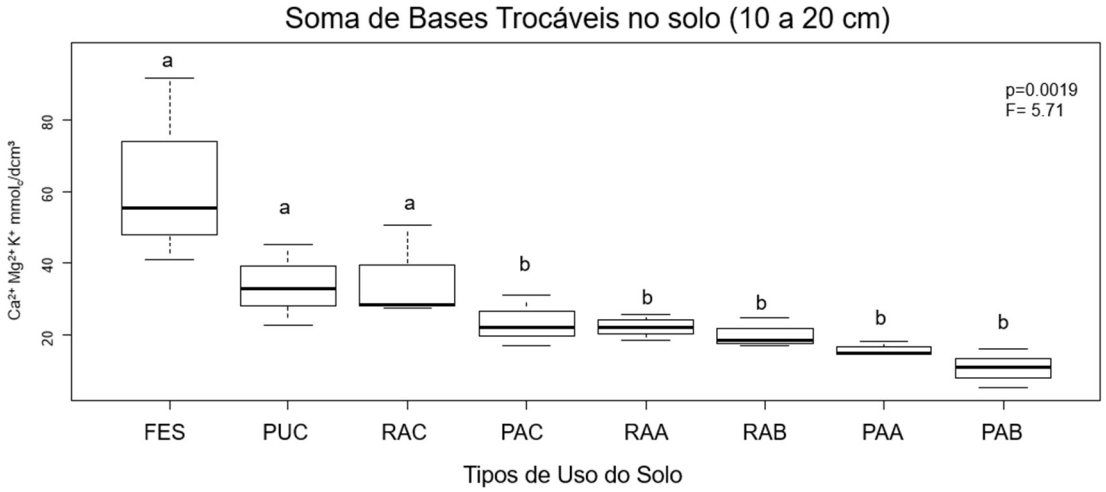


Figura 16: Soma de Bases, variáveis de 10-20cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a, b: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

A CTC representa a quantidade de cátions que um solo é capaz de reter, ela varia de com o pH do solo em decorrência da existência de cargas dependentes do pH. Por isso são feitas duas medidas de CTC: ao pH natural do solo e em um pH pré-estabelecido. A CTC determinada ao pH natural do solo é denominada CTC efetiva, enquanto que a CTC determinada utilizando-se uma solução tamponada a pH 7,0 (maior que o pH do solo) é denominada CTC potencial ou CTC a pH 7,0.

Como em solos ácidos o número de cargas negativas aumenta com a elevação do pH, a CTC potencial será maior que a CTC efetiva. A CTC efetiva reflete com mais veracidade a disponibilidade de cátions na solução do solo assim fica claro que o FES tem a maior CTC_e entre os tipos de uso do solo, ou seja, grande disponibilidade de nutrientes para as plantas. Os limites para CTC_e são: alto > 80 $mmol_c dm^{-3}$, médio entre 43 e 86 $mmol_c dm^{-3}$ e baixo entre 43 e 16 $mmol_c dm^{-3}$. A área de PAB possui nos menores valores de CTC_e, ou seja, a disponibilidade de nutrientes real na solução do solo está reduzida em relação aos outros tipos de usos do solo, (Figuras 17 e 18).

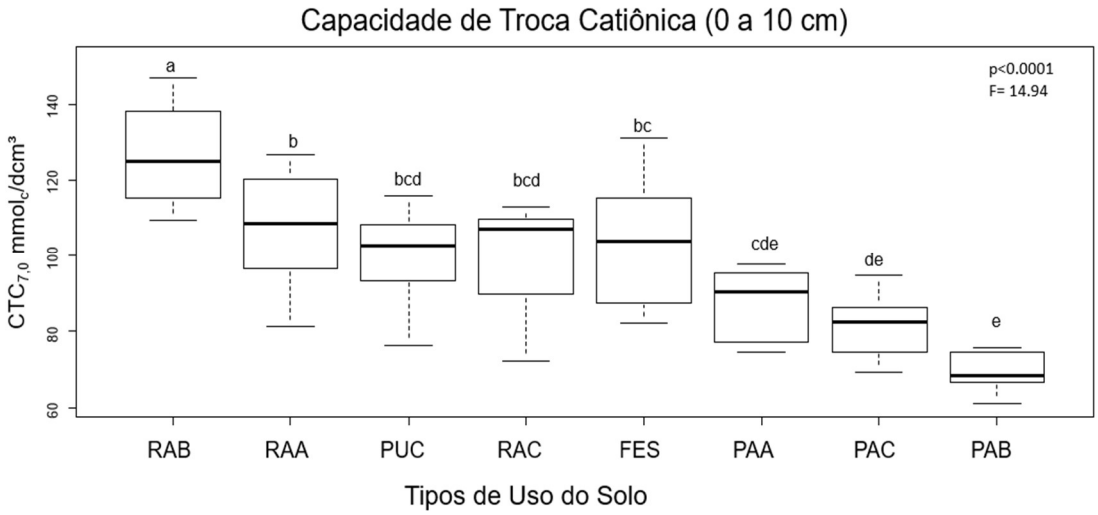


Figura 17: CTC a pH 7,0, variáveis de 0-10cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C).Letras a,b,c,d,e: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

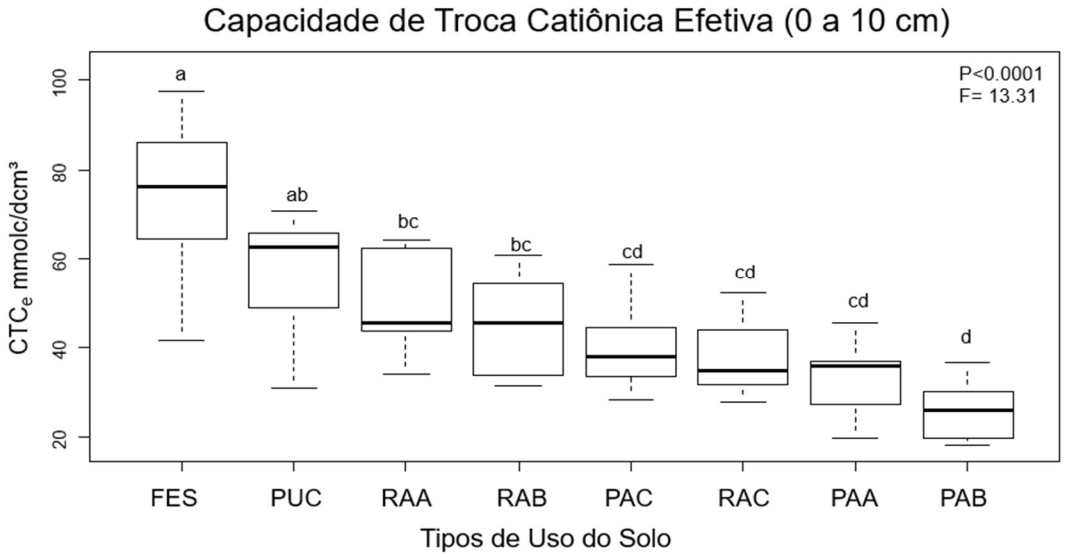


Figura 18: Capacidade de Troca Catiônica Efetiva do solo, variáveis de 0-10cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C);

RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C) . Letras a, b, c, d: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

O Cálculo de Saturação por Bases (V %) representa a porcentagem da CTC ocupada pelos cátions é a quantidade de nutrientes disponíveis no complexo de troca. Pode ser utilizado como um indicativo da fertilidade do solo, onde são considerados solos ideais para os cultivos aqueles com valor V% >50 (dependendo da cultura e do manejo utilizado). Em solos florestais com padrões ácidos a saturação por bases pode ser um melhor indicador de disponibilidade de cátions do que a CTC.

O valor V % também é utilizado na classificação de solos, onde solos com V > 50% são classificados como eutróficos e solos com V < 50% são classificados como distróficos. A mais baixa saturação por bases foi encontrada nas áreas RAB, RAC, PAA e PAB, por outro lado, a Floresta (FES) apresentou alta saturação por bases e a Pastagem Uso Contínuo (PUC) não difere significativamente da RAA e da PAC, (Figura 19).

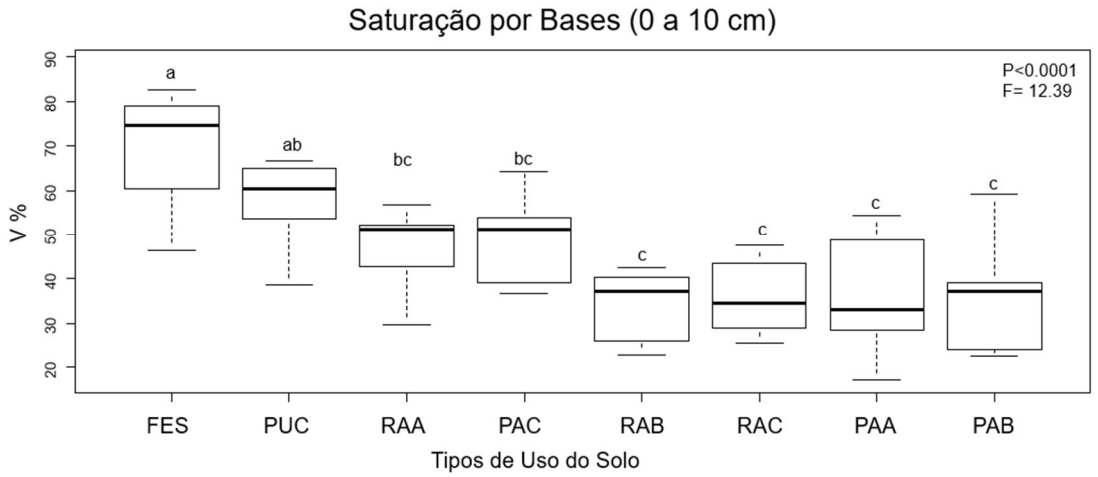


Figura 19: Saturação por Bases (V%), variáveis de 0-10cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a, b, c: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

A Saturação por Alumínio (m%) é a porcentagem de alumínio em relação às bases trocáveis e traz informações sobre a probabilidade de ocorrência da toxidez por alumínio. Para a fertilidade do solo, de modo geral, a saturação por alumínio não deve ser superior a 15%, pois em valores maiores aumenta a probabilidade de ocorrência de toxidez às plantas. Nas áreas de Restauração Ativa (RAB, RAC e RAA) e na Pastagem Abandonada (PAA, PAB), (Figura 20), a saturação por alumínio encontrada é mais alta que nos outros tipos de uso do solo com média em torno de 7,4% e 5,7%, no entanto, nestas áreas existem pontos que alcançam 15% de saturação por alumínio, para culturas agrícolas este valor já pode ser considerado crítico, no entanto para restauração florestal não há parâmetros estabelecidos.

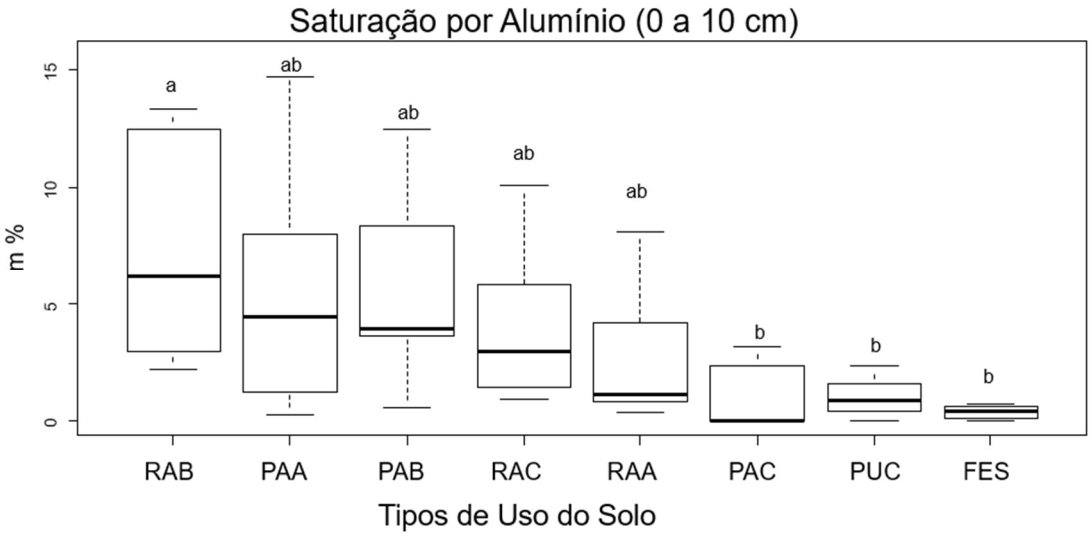


Figura 20: Saturação por Alumínio (m%), variáveis de 0-10cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a, b: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

Analisar o conteúdo de matéria orgânica no solo é muito importante, solos tropicais possuem de 2 a 5 % de carbono no solo, no Fragmento de Floresta (FES) a média de C encontrada é de 5,9%, diferindo significativamente da área de Pastagem de Uso Contínuo (PUC) com média de C= 4,5%, revelando que estes sistemas ao longo do tempo têm acumulado mais carbono no solo, em relação aos outros tipos de uso do solo. Nas áreas em processo de Restauração Ativa (RAB, RAC e RAA) e na Pastagem Abandonada (PAA, PAB e PAC) implantadas a 5 anos, a média de C, variou de 2,8 a 2,0%.

Com o mesmo método de análise de carbono e no bioma Mata Atlântica, (VASCONCELLOS et al., 2013a) encontraram em um Fragmento Florestal Conservado 3,9% de C no solo, 2,4% de C em área de Restauração Florestal com 20 anos, 2,3% de C na área de Restauração Florestal com 10 anos e 1,9% em área de Restauração Florestal com 5 anos.

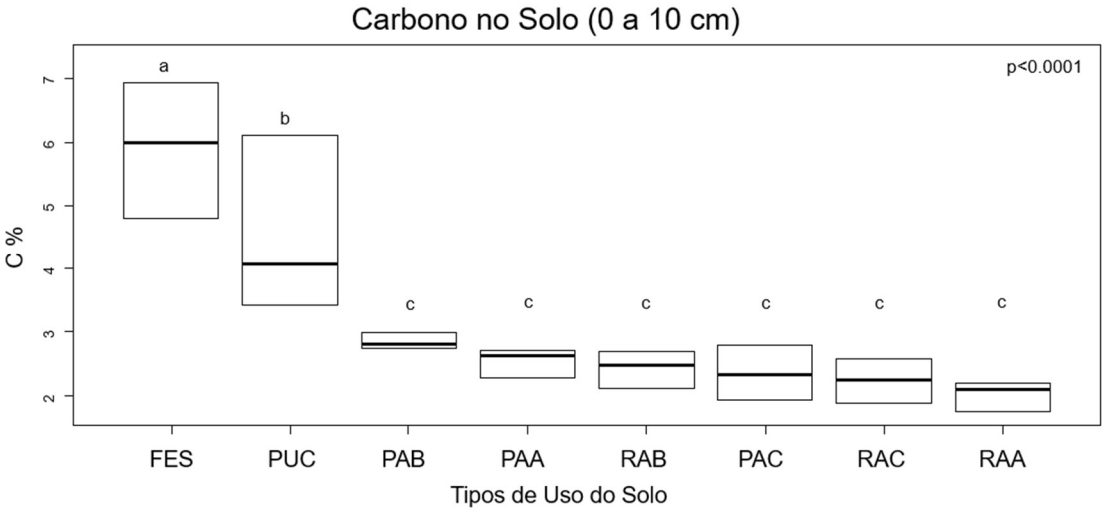


Figura 21: Carbono no Solo (C%), variáveis de 0-10cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a, b, c: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

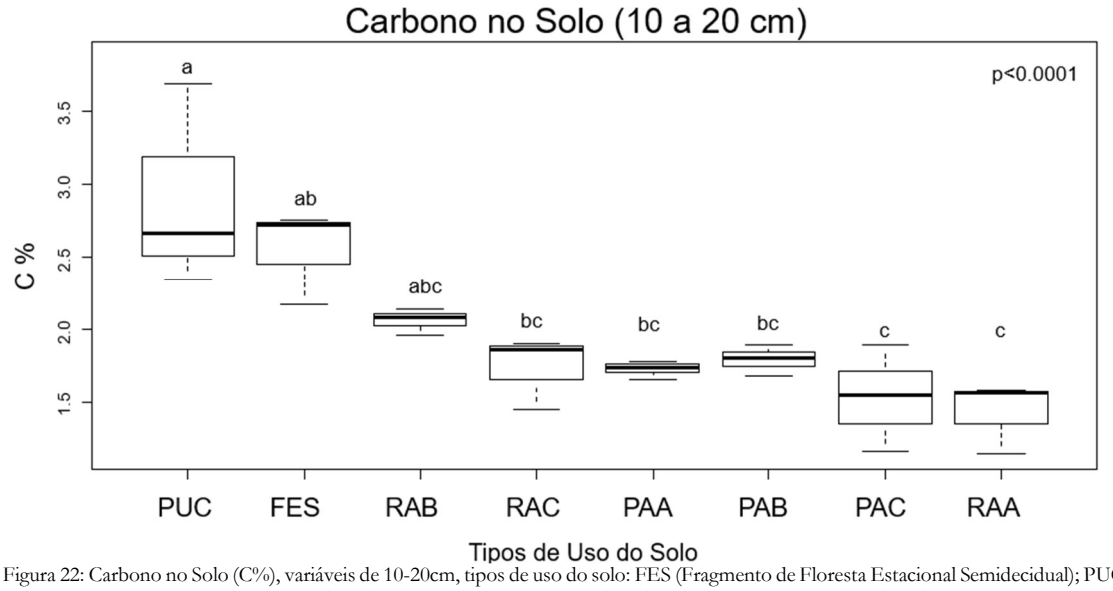


Figura 22: Carbono no Solo (C%), variáveis de 10-20cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C) . Letras a,b, c: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

A quantidade de nitrogênio no Fragmento de Floresta (FES) é significativamente diferente da área de Pastagem Uso Contínuo (PUC), porém, nestes dois tipos de uso do solo pode estar ocorrendo maior fixação de N pelos microrganismos do solo, pois nas áreas de Restauração Ativa (RAA, RAB e RAC) e nas Pastagens Abandonadas (PAA, PAB, PAC) o teor de N é bem menor variando de (0,1 a 0,2%), nestas áreas implantadas há 5 anos a atuação das bactérias nitrificantes pode ser pequena. O teor de nitrogênio encontrado por (VASCONCELLOS et al., 2013a) foi de 0,16% na área de Restauração Florestal com 20 anos, 0,11% na área de Restauração Florestal com 10 anos e 0,15% de N nas áreas de Restauração Florestal com 5 anos, ou seja mesmo após 20 anos a presença de nitrogênio no solo não aumentou significativamente.

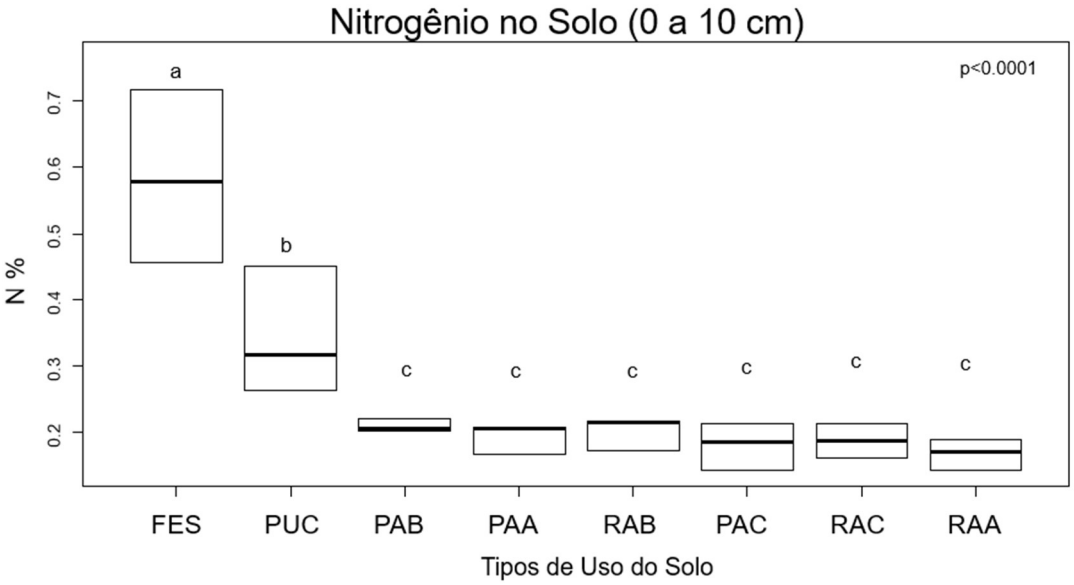


Figura 23: Valores % N no solo, variáveis de 0-10cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a, b, c: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

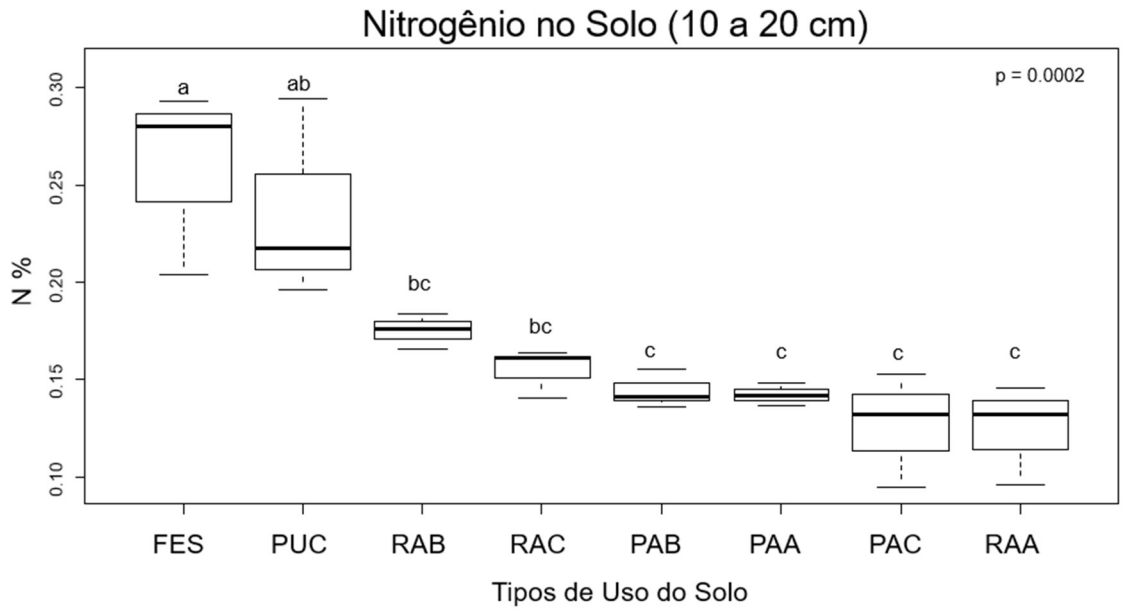


Figura 24: Valores % N no solo, variáveis de 10-20cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a, b, c: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

As áreas de Pastagens PUC, PAA, PAB e PAC possuem a relação C/N mais alta, ou seja, há maior conteúdo de C do que de N, já nas áreas de RAA, RAB, RAC o valor da relação C/N é mais próxima a 12 indicando uma dinâmica de matéria orgânica mais semelhante a FES que tem a menor relação carbono nitrogênio na camada de 0-10cm. Na camada de 10-20 cm todas as áreas diferem significativamente da Floresta que apresentou a relação C/N igual a 9,9%.

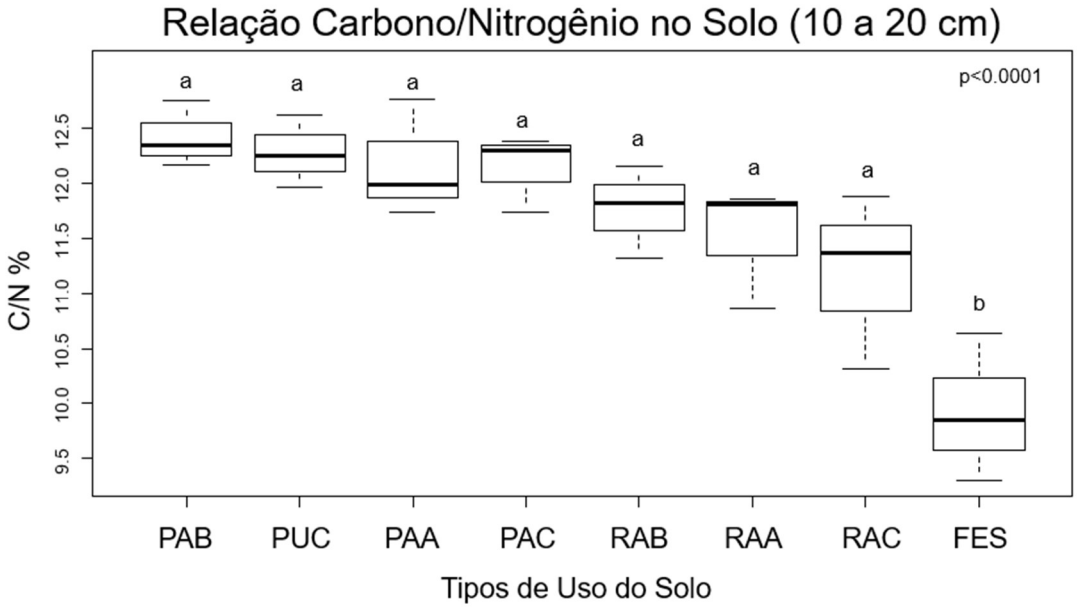


Figura 25: Valores % C/N no solo, variáveis de 10-20cm, tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras a, b: são referentes ao teste Tukey indica que áreas com a mesma letra não diferem significativamente.

A maior estocagem de carbono na profundidade de 0-10cm foi na área da Floresta (FES), com um valor médio de 72 Mg C ha^{-1}, seguido pela Pastagem Uso Contínuo (PUC) com 60 Mg C ha^{-1}, nas áreas de Pastagem

Abandonada (PAA, PAB, PAC) o estoque médio de carbono foi de 28 a 34 Mg C ha⁻¹ e nas áreas de Restauração Ativa (RAA, RAB, RAC) o estoque médio de carbono foi de 27 a 31 Mg C ha⁻¹, (Figura 26). Na camada de 10 a 20cm, maior estocagem de carbono foi na área da Pastagem Uso Contínuo (PUC) com um valor médio de com 44 Mg C ha⁻¹, enquanto que na área da Floresta (FES), o estoque foi de 35 Mg C ha⁻¹. Nesta camada do solo na área de Restauração Ativa B (RAB) encontramos o estoque médio de carbono de 30 Mg C ha⁻¹ e nas áreas de Pastagem Abandonada (PAA, PAB, PAC) o estoque médio de carbono foi de 28 a 22 Mg C ha⁻¹(Figura 27).

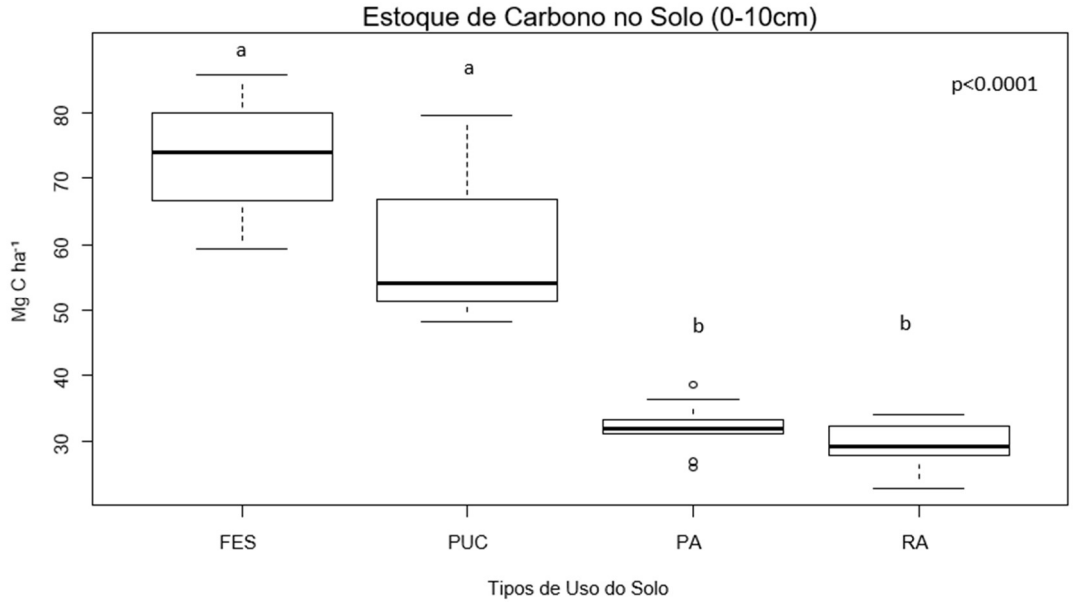


Figura 26: Estoque de Carbono do solo na camada de 0-10cm nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PA (Pastagem Abandonada); RA (Restauração Ativa).

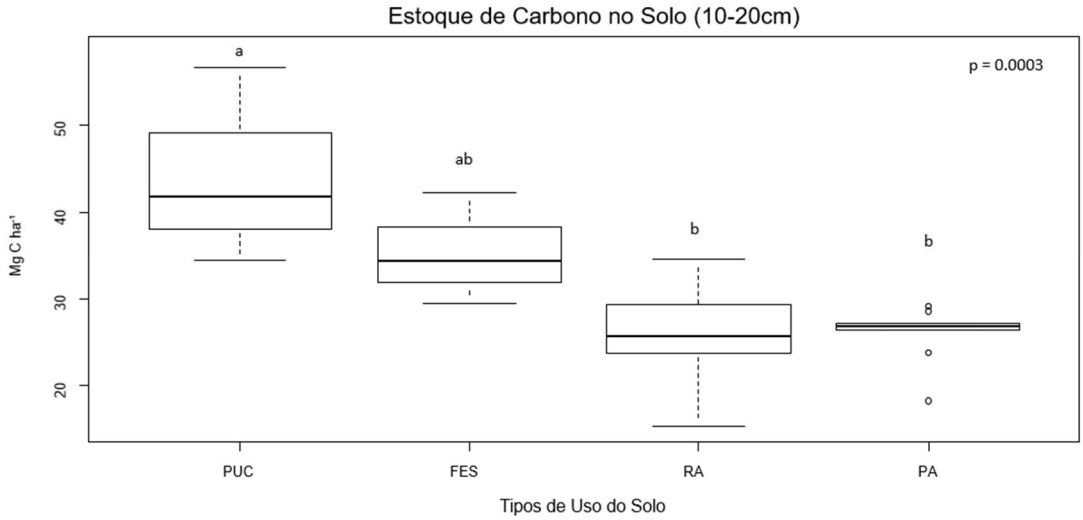


Figura 27: Estoque de C, na camada de 10-20cm, sendo os tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PA (Pastagem Abandonada); RA (Restauração Ativa).

ATRIBUTOS FISICOS

Dentre os principais atributos que definem as características físicas do solo está a granulometria ou textura do solo que consiste em verificar a proporção de areia, argila e silte, conhecidas como partículas sólidas do solo, a estrutura e a textura do solo influenciam as quantidades de macroporos e microporos presentes no solo. Maior teor de areia pode proporcionar maior densidade do solo devido ao tamanho elevado desta partícula, enquanto que a argila

pode proporcionar menor densidade do solo devido a sua ligação com a matéria orgânica do solo e formação de agregados.

A textura e a profundidade do solo sofrem pouca alteração ao longo do tempo e não são sensíveis ao manejo do solo (SCHOENHOLTZ; MIEGROET; BURGER, 2000). Enquanto que a densidade aparente do solo varia entre solos de diferentes texturas, pois a interação das partículas inorgânicas com as partículas orgânicas do solo, determinam algumas características do solo, com por exemplo, solos com menor densidade aparente possuem maior conteúdo de matéria orgânica. O crescimento das raízes pode ser relacionado com as medidas de resistência a penetração, já as relações entre o armazenamento e a infiltração de água podem ser relacionados aos poros do solo, utilizando medidas de porosidade do solo.

Nas Tabelas 04 e 05 apresentamos as médias e desvio-padrão dos atributos físicos nas profundidades de 0-10cm e 10-20cm.

Tabela 04: Atributos físicos do solo na profundidade de 0-10cm, para os tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), PUC (Pastagem Uso Contínuo), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), RAA (Restauração Ativa A), RAB (Restauração Ativa B), RAC (Restauração Ativa C).

unidade	**g/cm^{-3}**	**g/cm^{-3}**	**cm/cm^{-3}**	**cm/cm^{-3}**	**cm/cm^{-3}**	**Mpa**
Tipos de uso do solo (0-10 cm)	**Densidade Aparente**	**Densidade Real**	**Porosidade Total**	**Microporosidade**	**Macroporosidade**	**Resistência à Penetração**
PUC	1,35 (0,04)	2,58 (0)	0,48 (0,02)	0,24 (0,03)	0,24 (0,02)	2,23 (0,29)
FES	1,29 (0,09)	2,59 (0)	0,50 (0,03)	0,21 (0,03)	0,29 (0,04)	1,17 (0,55)
PAA	1,32 (0,12)	2,62 (0)	0,49 (0,04)	0,24 (0,04)	0,26 (0,06)	1,88 (0,64)
PAB	1,21 (0,11)	2,62 (0)	0,54 (0,04)	0,28 (0,04)	0,25 (0,05)	1,70 (0,51)
PAC	1,20 (0,10)	2,62 (0)	0,54 (0,04)	0,31 (0,04)	0,23 (0,04)	1,11 (0,46)
RAA	1,39 (0,09)	2,65 (0)	0,48 (0,03)	0,17 (0,02)	0,30 (0,03)	1,08 (0,39)
RAB	1,30 (0,10)	2,65 (0)	0,51 (0,04)	0,21 (0,04)	0,30 (0,04)	1,62 (0,84)
RAC	1,24 (0,08)	2,65 (0)	0,53 (0,03)	0,22 (0,03)	0,31 (0,03)	0,87 (0,23)

Tabela 05: Atributos físicos do solo na profundidade de 10-20cm, para os tipos de uso do solo: para os tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), PUC (Pastagem Uso Contínuo), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), RAA (Restauração Ativa A), RAB (Restauração Ativa B), RAC (Restauração Ativa C).

unidade	**g/cm^{-3}**	**g/cm^{-3}**	**cm/cm^{-3}**	**cm/cm^{-3}**	**cm/cm^{-3}**	**Mpa**
Tipos de uso do solo (10-20 cm)	**Densidade Aparente**	**Densidade Real**	**Porosidade Total**	**Microporosidade**	**Macroporosidade**	**Resistência à Penetração**
PUC	1,52 (0)	2,63 (0)	0,42 (0)	0,24 (0)	0,19 (0)	3,39 (0,5)
FES	1,38 (0,1)	2,65 (0)	0,48 (0)	0,20 (0)	0,29 (0)	1,43 (0,3)
PAA	1,55 (0,1)	2,69 (0)	0,42 (0)	0,20 (0)	0,22 (0)	2,26 (0,6)
PAB	1,57 (0)	2,69 (0)	0,41 (0)	0,27 (0)	0,15 (0)	3,16 (0,3)
PAC	1,51(0,1)	2,69 (0)	0,44 (0)	0,28 (0)	0,16 (0)	2,64 (0,3)
RAA	1,49 (0)	2,67 (0)	0,44 (0)	0,21 (0)	0,23 (0,1)	2,06 (0,8)
RAB	1,47 (0)	2,67 (0)	0,45 (0)	0,24 (0)	0,21 (0,1)	2,87 (1,0)
RAC	1,44 (0)	2,67 (0)	0,46 (0)	0,22 (0)	0,24 (0)	1,79 (0,5)

Tabela 06: Textura do Solo, profundidade 0-20cm, para os tipos de uso do solo: para os tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), PUC (Pastagem Uso Contínuo), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), RAA (Restauração Ativa A), RAB (Restauração Ativa B), RAC (Restauração Ativa C).

Tipos de uso do solo	textura do solo	profundidade	0-20cm
	Argila (g/kg)	**Silte (g/kg)**	**Areia (g/kg)**
PUC	300 (66)	147 (14)	553 (53)
FES	268 (76)	197 (4)	535 (73)
PAA	386 (14)	144 (17)	470 (26)
PAB	353 (43)	168 (42)	479 (12)
PAC	420 (39)	177 (6)	403 (34)
RAA	352 (25)	141 (6)	507 (31)
RAB	378 (0)	126 (19)	495 (19)
RAC	336 (102)	196 (31)	469 (75)

Em profundidade ocorre um aumento no teor de argila, na camada de 20-40 cm é de 430 g/kg (+/- 76), de 550 g/kg (+/- 62) na camada de 40-60 cm e de 620 g/kg (+/- 102) na camada de 60-80 cm. Enquanto o teor médio de areia ao contrário do teor de argila diminui em profundidade, ou seja, teor médio de areia na profundidade de 20-40 cm é 430 g/kg (+/- 49); em 40-60 cm é de 320 g/kg (+/- 44) e em 60-80cm é de 300 g/kg (+/- 61). A quantidade de silte apresentou menor variação.

Um solo mineral de textura média pode apresentar normalmente a densidade de 1,25 g/cm^3. Somente a densidade média no Fragmento de Floresta em 0-20cm (1,25g/cm^{-3}) aproxima-se da densidade ideal de 1,0 a 1,20 g/cm^{-3} proposta por (CAMARGO E ALEONI, 1997). De maneira geral, pode-se afirmar que, quanto mais elevada for a densidade do solo, maior será sua compactação e menor sua porosidade total o que resulta em baixo crescimento radicular e desenvolvimento das plantas.

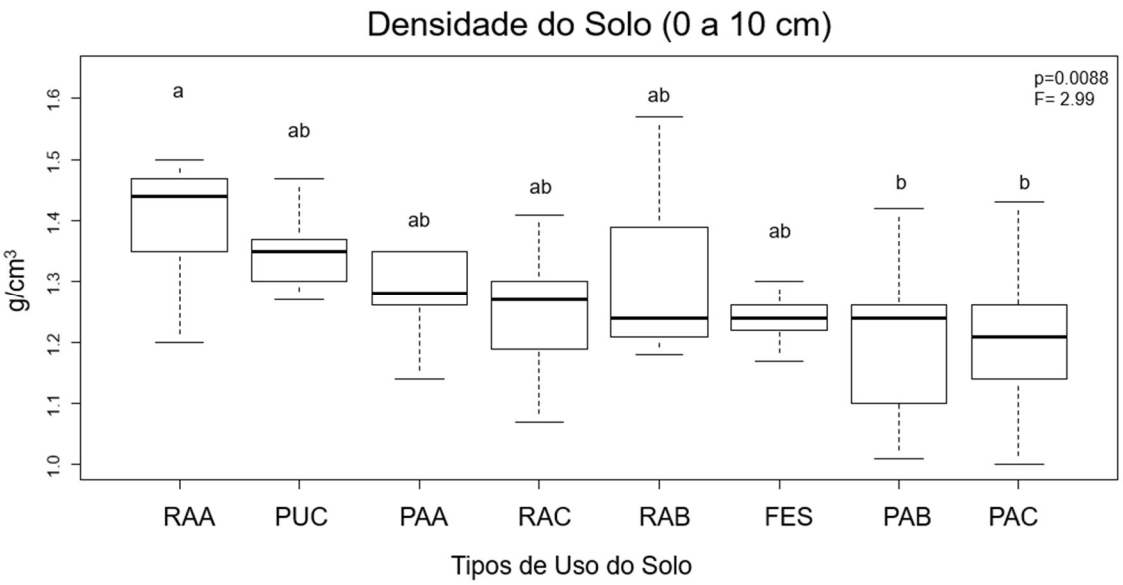


Figura 28: Densidade do solo nos diferente usos do solo, na camada de 0-10cm: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C).

Em geral a camada superficial do solo na profundidade de 0-10 cm apresentou densidades mais baixas, principalmente devido maior quantidade de matéria orgânica depositada sob o solo, na profundidade 10 a 20 cm a densidade do solo e a resistência a penetração possuem valores elevados. Os trabalhos de SATTLER (2006) e SOUZA & ALVES (2003) encontraram altas densidades nas pastagens entre 1,56-1,54 g cm^{-3} em 10–20 cm do solo, valor considerado elevado e possível indicador de compactação, em nossas áreas não só a pastagem alcança estes valores elevados, mas também algumas das áreas de Restauração Ativa e Restauração Passiva. A Densidade do solo na camada de 10 a 20 cm não difere significativamente entre as áreas (p=0,58).

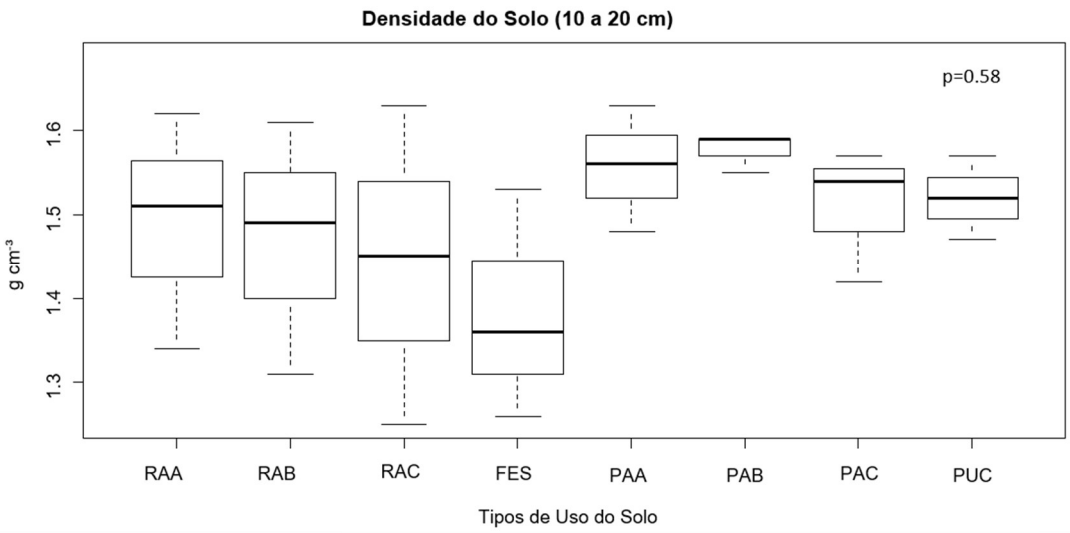


Figura 29: Densidade do solo nos diferente usos do solo, na camada de 10-20cm: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C).

A porosidade total corresponde ao espaço poroso encontrado no solo, todas as áreas estudadas possuem uma Porosidade Total média de 0,50 cm/cm^3 (50 % do volume é ocupado por poros) o que representa boas condições para o crescimento de plantas.

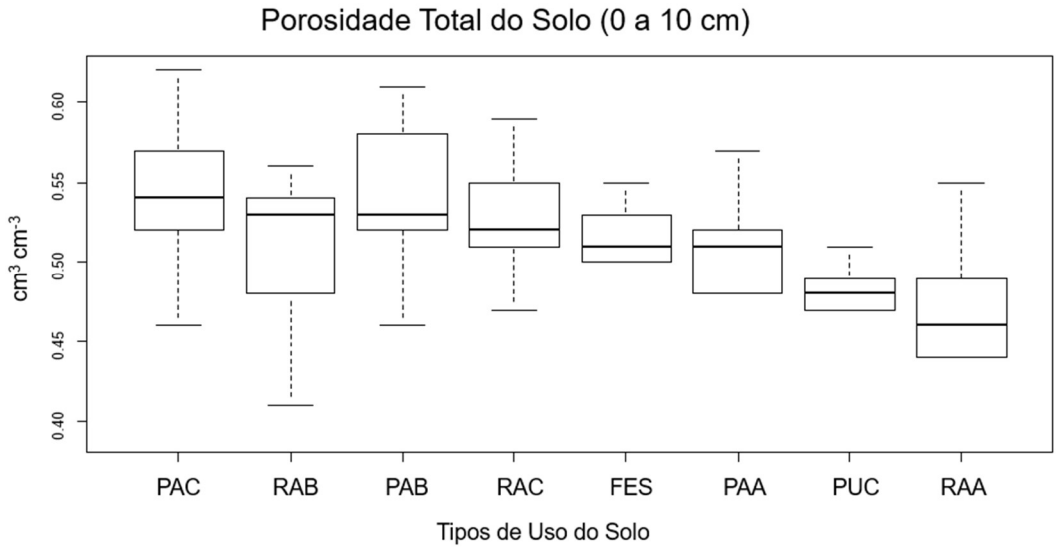


Figura 30: Porosidade Total do solo, na camada de 0-10cm: nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C).

Para avaliar a movimentação da água e do ar no solo medidas de macro e microporosidade podem ser úteis (LAVELLE et al., 2014) utilizaram estes parâmetros para aferir sobre o serviço ecossistêmico relacionado a armazenamento e de infiltração de água no solo. Os macroporos permitem a livre movimentação de ar e condução de água durante o processo de infiltração, pois, são grandes o suficiente para permitir o desenvolvimento do sistema radicular e abrigar organismos de menor tamanho que habitam o solo. A porosidade total não difere significativamente entre os tipos de uso do solo (Figura 30).

O Fragmento de Floresta (FES) e áreas de Restauração Ativa possuem maior macroporosidade em relação as áreas de Pastagem Uso Contínuo (PUC) e as áreas Pastagem Abandonadas (PA), (Figura 31) este padrão é semelhante ao observado para densidade do solo na camada de 10-20 cm.

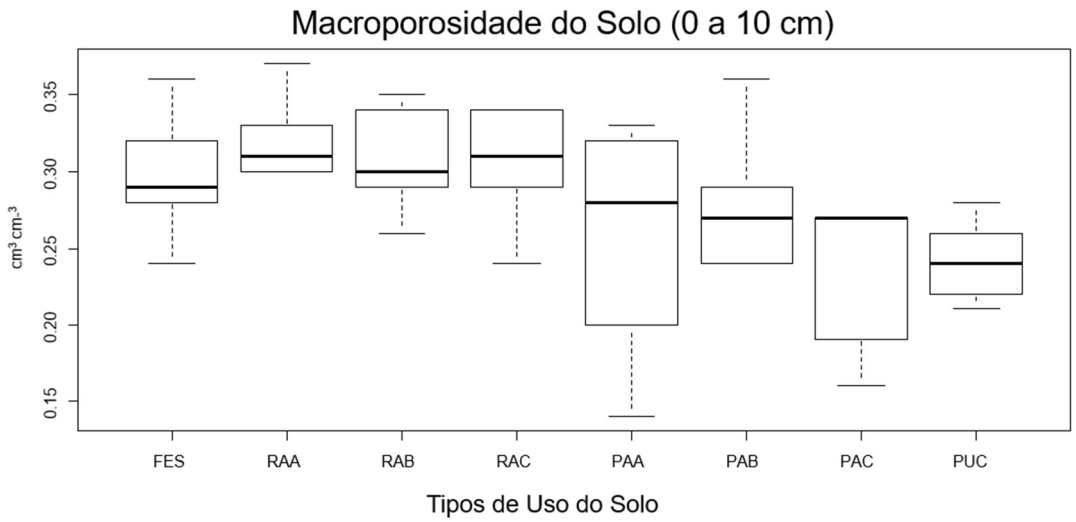


Figura 31: Macroporosidade do solo, na camada de 0-10cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C).

A microporosidade do solo é significativamente diferente entre os tipos de uso do solo (p<0,0001, F=9,77), (Figura 32), as áreas de Pastagens Abandonada (PAC e PAB) têm alta de microporosidade do solo, o movimento nos microporos é lento e parte da água pode ficar retida e não está disponível para as plantas.

Para (SOUZA & ALVES, 2003) o aumento da microporosidade pode estar ligado ao aumento da compactação do solo, estes autores, encontraram a que degradação das propriedades físicas em tipos de usos do solo como uma pastagem em relação a vegetação nativa, pode ser verificada devido a maiores valores de densidade do solo, resistência à penetração e microporosidade.

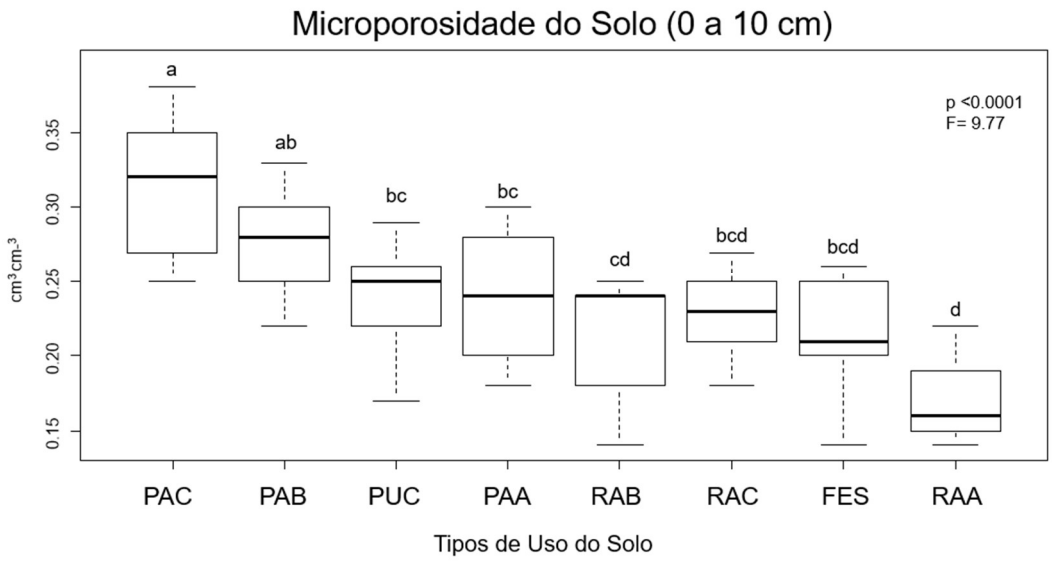


Figura 32: Microporosidade do solo, na camada de 0-10cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras iguais indicam que não há diferença significativa entre as áreas.

A resistência à penetração é um atributo do solo sensível ao manejo, seus valores permitem inferir sobre penetração das raízes e sobre estado de compactação do solo. Dados de resistência à penetração do solo, na profundidade 0-10cm (Figura 33) difere estatisticamente entre os tipos de uso do solo (p<0,0001, F= 5,53) a média entre todos os tipos de uso do solo corresponde 1,41 Mpa, na Pastagem Uso Contínuo (PUC) e nas áreas de Pastagem Abandonada (PAA e PAB) foram observados maiores valores deste atributo físico.

O Fragmento de Floresta como uma referência positiva apresentou baixos valores de resistência a penetração tanto na camada de 0-10cm quanto em 10-20cm também na área de RAA e RAC são encontrados valores mais reduzidos destes atributos em relação aos outros usos do solo, indicando baixa compactação do solo nesta área.

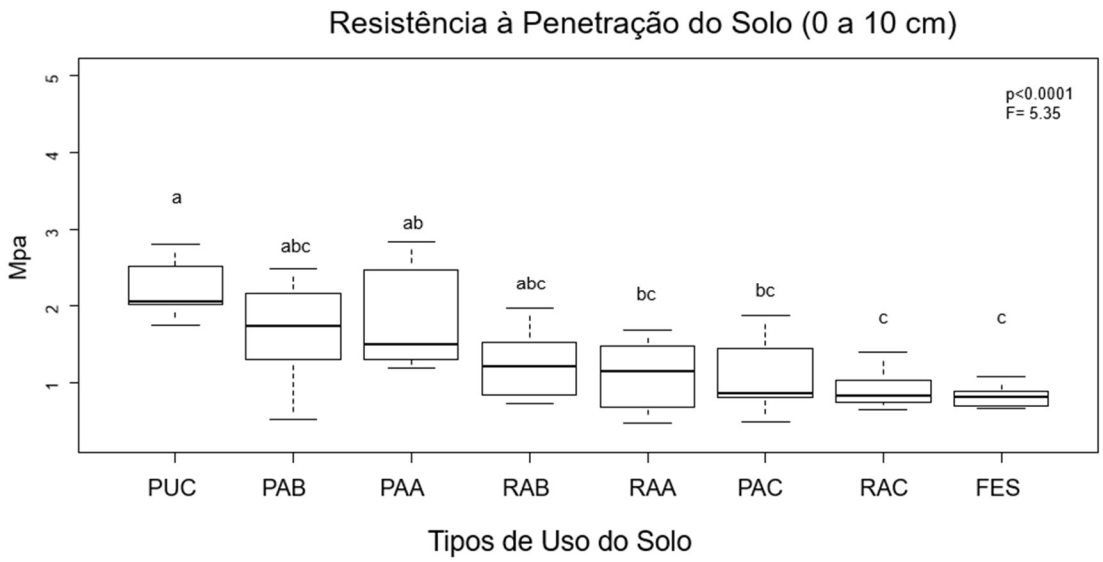


Figura 33: Resistência a Penetração do solo, na camada de 0-10cm: nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras iguais indicam que não há diferença significativa entre as áreas

O Fragmento de Floresta (FES) apresentou menor média de resistência à penetração do solo (0,87 Mpa), nesta profundidade e não difere significativamente da área de Restauração Ativa C (RAC), (0,82 Mpa) média de resistência à penetração do solo. Dados de resistência à penetração do solo, na profundidade 10-20cm (Figura 34) e não difere estatisticamente entre os tipos de uso do solo (p<0,10, F= 2,08), a média entre todos os tipos de uso do solo corresponde 2,45 Mpa, nesta camada o solo torna-se muito mais compactado nas áreas de Pastagens.

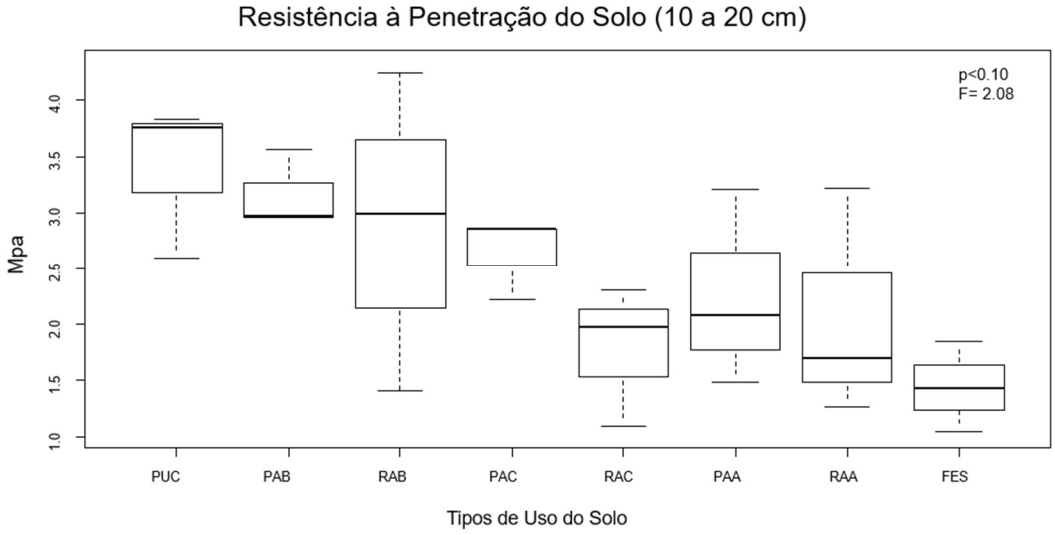


Figura 34: Resistência a Penetração do solo na camada de 10-20cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C).

ATRIBUTOS BIOLÓGICOS – DIVERSIDADE DA MACROFAUNA DO SOLO

A fauna do solo contribui para a manutenção dos serviços ecossistêmicos facilitando a quebra inicial da matéria orgânica, contribuindo para processos ecossistêmicos como: decomposição da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e fertilidade do solo, a macrofauna atua também na estrutura física do solo, pois, favorece o armazenamento e disponibilidade de água do solo (MOREIRA et al, 2008). A classificação da comunidade edáfica é realizada através uma divisão por tamanho: microfauna (tamanho corporal 0,002 a 0,2 mm), mesofauna (tamanho corporal 0,2 a 2,0 mm) e macrofauna (tamanho corporal 2,0 a 20 mm), essa variação confere aos invertebrados habilidades diferenciadas, seja na sua estratégia de alimentação ou na adaptação ao habitat (LAVELLE et al. 1996).

Apresentamos na Tabela 07 as médias e desvio-padrão dos dados de densidade (indivíduos/m²) para cada grupo taxonômico da macrofauna encontrado nas amostras de 0-10cm e 10-20cm. Na Tabela 08 apresentamos o ranking nos Grupos Funcionais e Grupos Taxonômicos da macrofauna.

As Análises de Variância (ANOVA) permitem observar as diferenças entre os tipos de uso do solo em relação a densidade dos invertebrados dados de indivíduos por m² foram transformados por log de x+1, para adquirir normalidade As Análises de Variância (ANOVA) permitem observar as diferenças entre os tipos de uso do solo em relação a densidade dos invertebrados dados de indivíduos por m² foram transformados por log de x+1, para adquirir normalidade.

Entre os engenheiros do ecossistema predominam os cupins (térmitas) e oligochaeta (minhocas) estes organismos podem colonizar mais facilmente as áreas onde não houve intervenção ou manejo, além disso podem formar agregados biogênicos do solo, observados em grande quantidade na área de Pastagem Abandonada. Dados de densidade de minhocas, na profundidade 0-10cm (Figura 35) diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo ($p = 0,02$, $F=2,43$). Na Pastagem Uso Continuo (PUC) existem em média 145 minhocas por metro quadrado na profundidade de 0-10cm em contraponto no Fragmento de Floresta (FES) existem apenas 12 ind/m² destes organismos. No entanto na camada de 10-20cm, na FES e RAA a densidade é maior nesta camada com cerca de 54 e 58 12 ind/m² respectivamente.

Tabela 07: Densidade média de indivíduos da macrofauna do solo (ind/m²) dos Grupos Taxonômicos (GT), oligochaeta, isoptera, coleóptera, formicidae, chilopoda, diplopoda, dermaptera, blattodea, isopoda, arachinida, orthoptera,hemíptera, gastropoda, imaturos(larvas), nas profundidade de 0-10 e 10-20cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), RAA (Restauração Ativa A), RAB (Restauração Ativa B), RAC (Restauração Ativa C).

Tipos de uso do solo	Densidade média de indivíduos da macrofauna do solo (ind/m^2)														
	OLIGOCHAETA	ISOPTERA	COLEOPTERA	HYMENOPTERA – FORMICIDAE	CHILOPODA	DIPLOPODA	DERMAPTERA	BLATTOPTERA	ISOPODA	ARACHINIDA	ORTHOPTERA	HEMIPTERA	GASTROPODA	LARVAS	RIQUEZA GT
PUC (0-10cm)	145(79)	375(276)	234(120)	213(135)	12(4)	2(2)	2(2)	7(2)	0	10(3)	2(2)	7(9.5)	0	138(35)	12
PUC (10-20cm)	74(28)	10(7)	37(28)	405(476)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10(7)	5
FES (0-10cm)	12(16)	5(7)	14(8)	101(24)	62(11)	58(46)	0	18(6)	0	41(17)	2(2)	2(2)	37(18)	78(51)	12
FES (10-20cm)	53(71)	0	0	400(298)	16(0)	85(71)	0	0	0	0	0	0	16(21)	26(14)	6
PAA (0-10cm)	25(13)	212(130)	135(33)	779(597)	11(7)	11(14)	4(5)	18(6)	50(6)	57(19)	5(0)	43(28)	2(2)	155(57)	13
PAA (10-20cm)	11(14)	896(1173)	11(14)	85(57)	0	0	0	0	0	0	0	16(11)	0	53(60)	6
PAB (0-10cm)	37(21)	551(356)	76(38)	802(477)	7(6)	7(9,5)	0	11(11)	32(21)	39(37)	0	12(9)	0	119(61)	11
PAB (10-20cm)	5(7)	0	0	37(11)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16(7)	3
PAC (0-10cm)	20(12)	903(375)	78(22)	222(58)	37(18)	46(58)	0	23(8)	32(4)	30(19)	0	44(20)	0	64(7)	11
PAC (10-20cm)	11(14)	0	0	27(36)	0	11(14)	0	5(7)	0	0	0	0	0	32(21)	5
RAA (0-10cm)	30(22)	155(57)	21(7)	271(309)	14(5)	16(4)	12(6)	30(6)	183(91)	11(7)	4(5)	39(6)	0	55(24)	12
RAA (10-20cm)	58(24)	0	11(14)	0	0	0	0	5(7)	0	0	0	0	0	5(7)	4
RAB (0-10cm)	11(7)	236(187)	55(30)	268(151)	11(7)	5(4)	4(2)	7(5)	12(9,5)	28(13)	2(2)	25(30)	4(5)	34(19)	14
RAB (10-20cm)	11(14)	277(184)	0	352(469)	0	5(7)	0	0	0	0	0	0	0	0	4
RAC (0-10cm)	35,6(13)	439(386)	23(5)	395(195)	21(14)	4(5)	12(13)	21(7)	132(83)	25(4,7)	1,8(2,4)	23(9,5)	7(6)	64(11)	14
RAC (10-20cm)	37(7)	0	0	208(106)	0	0	0	5(7)	0	0	0	0	0	21(14)	4

Área	PUC		FES		PAA		PAB		PAC	
	GF	**GT**	**GF**	**GT**	**GF**	**GT**	**GF**	**GT**	**GF**	**GT**
1°	**Engenheiro**	Termita	**Engenheiro**	Hymenoptera	**Engenheiro**	Hymenoptera	**Engenheiro**	Hymenoptera	**Engenheiro**	Termita
2°	**Engenheiro**	Hymenoptera	**Decompositor**	Diplopoda	**Engenheiro**	Termita	**Engenheiro**	Termita	**Engenheiro**	Hymenoptera
3°	**Engenheiro**	Coleoptera	**Decompositor**	Larvas	**Decompositor**	Larvas	**Decompositor**	Larvas	**Engenheiro**	Coleoptera
4°	**Engenheiro**	Oligochaeta	**Predador**	Chilopoda	**Engenheiro**	Coleoptera	**Engenheiro**	Coleoptera	**Decompositor**	Larvas
5°	**Decompositor**	Larvas	**Decompositor**	Gastropoda	**Predador**	Aracnideos	**Engenheiro**	Oligochaeta	**Decompositor**	Diplopoda
6°	**Predador**	Chilopoda	**Predador**	Aracnideos	**Decompositor**	Isopoda	**Predador**	Aracnideos	**Herbívoro**	Hemiptera
7°	**Predador**	Aracnideos	**Engenheiro**	Oligochaeta	**Herbívoro**	Hemiptera	**Decompositor**	Isopoda	**Predador**	Chilopoda
8°	**Herbívoro**	Hemiptera	**Decompositor**	Blattodea	**Engenheiro**	Oligochaeta	**Herbívoro**	Hemiptera	**Decompositor**	Isopoda
9°	**Decompositor**	Blattodea	**Engenheiro**	Coleoptera	**Decompositor**	Blattodea	**Decompositor**	Blattodea	**Predador**	Aracnideos
10°	**Decompositor**	Diplopoda	**Engenheiro**	Termita	**Predador**	Chilopoda	**Predador**	Chilopoda	**Decompositor**	Blattodea

Tabela 08: Ranking e Grupos Funcionais (GF) e Grupos Taxonômicos (GT).

Área	RAA		RAB		RAC	
	GF	**GT**	**GF**	**GT**	**GF**	**GT**
1°	**Engenheiro**	Hymenoptera	**Engenheiro**	Hymenoptera	**Engenheiro**	Hymenoptera
2°	**Decompositor**	Isopoda	**Engenheiro**	Termita	**Engenheiro**	Termita
3°	**Engenheiro**	Termita	**Engenheiro**	Coleoptera	**Decompositor**	Isopoda
4°	**Decompositor**	Larvas	**Decompositor**	Larvas	**Decompositor**	Larvas
5°	**Engenheiro**	Oligochaeta	**Predador**	Aracnideos	**Engenheiro**	Oligochaeta
6°	**Herbívoro**	Hemiptera	**Herbívoro**	Hemiptera	**Predador**	Aracnideos
7°	**Decompositor**	Blattodea	**Engenheiro**	Oligochaeta	**Engenheiro**	Coleoptera
8°	**Engenheiro**	Coleoptera	**Decompositor**	Isopoda	**Decompositor**	Blattodea
9°	**Decompositor**	Diplopoda	**Predador**	Chilopoda	**Herbívoro**	Hemiptera
10°	**Predador**	Chilopoda	**Decompositor**	Diplopoda	**Predador**	Chilopoda

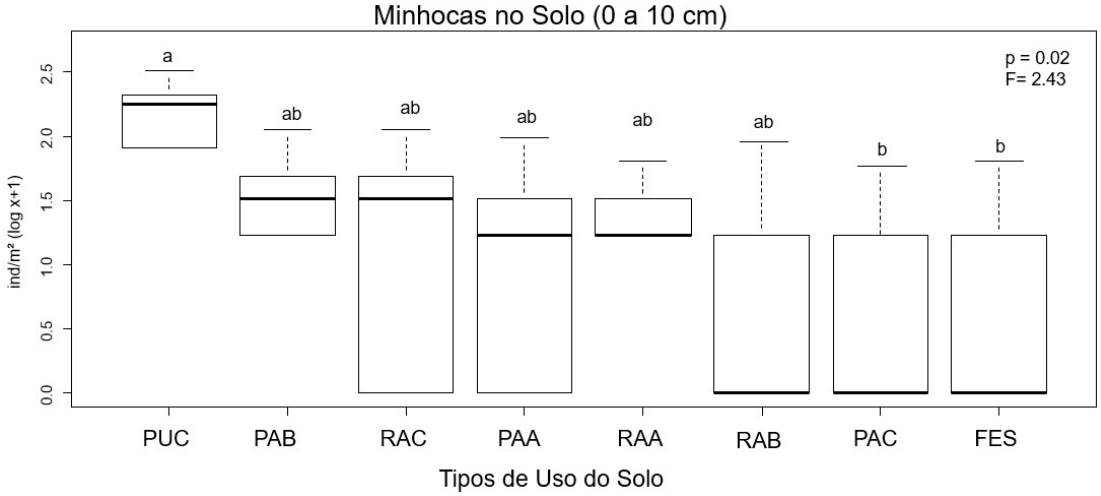


Figura 35: Densidade de Minhocas na profundidade de 0 a 10 cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras iguais indicam que não há diferença significativa entre as áreas.

Os cupins também têm a capacidade transformar fisicamente o habitat, agregando partículas e transportando material verticalmente solo, este grupo taxonômico apresentou baixa densidade na área do Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual com apenas 5 indivíduos por metro quadrado em contraponto na área de Pastagem Abandonada C (PAC) a densidade média de cupins foi de 930 ind/m². Dados de densidade de cupins, na profundidade 0-10cm (Figura 36) não diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo (p = 0,19, F= 1,47).

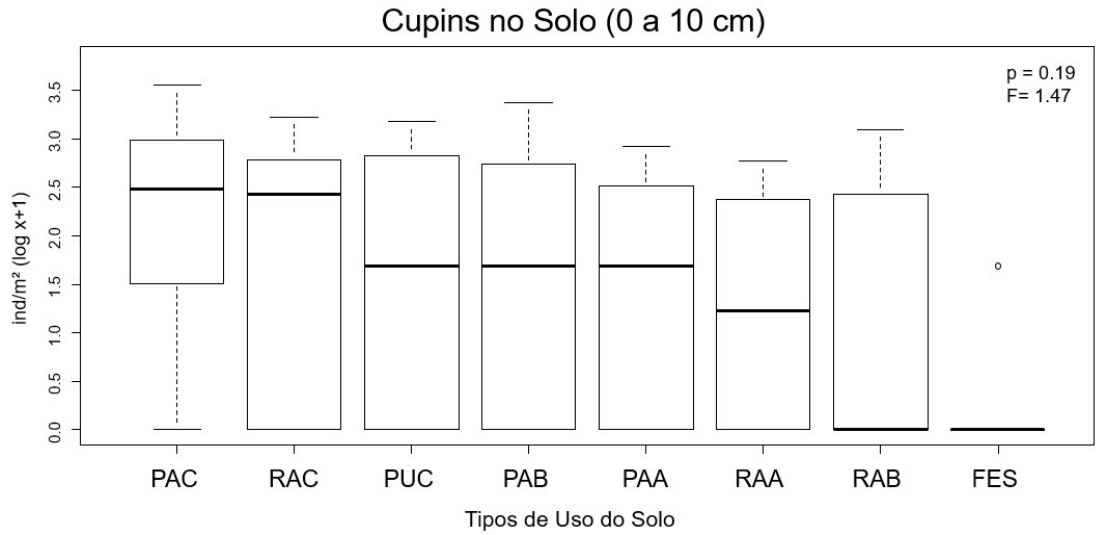


Figura 36: Densidade de Cupins na profundidade de 0 a 10 cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C).

Formigas são insetos sociais, predadores e herbívoros, muito abundantes em florestas tropicais onde modificam fisicamente seu habitat, formam ninhos e galerias, aumentando a drenagem e porosidade do solo (FOLGARATI, 1998), por exemplo, o solo modificado pelas formigas é geralmente mais rico em matéria orgânica, N, P e K, o que contribui para melhor desenvolvimento da vegetação principalmente em solos pobres (MOREIRA, 2008). Na profundidade 0-10cm a densidade de formigas não difere estatisticamente entre os tipos de uso do solo (p = 0,27,

F= 1,27). Na área de Pastagem Abandonada (PAA) existem em média 779 formigas por metro quadrado na profundidade de 0-10cm e no Fragmento de Floresta (FES) existem em média 110 ind/m², no entanto na camada de 10-20cm as formigas, tal como as minhocas e os cupins tem maior densidade na área de Floresta com 400 ind/m².

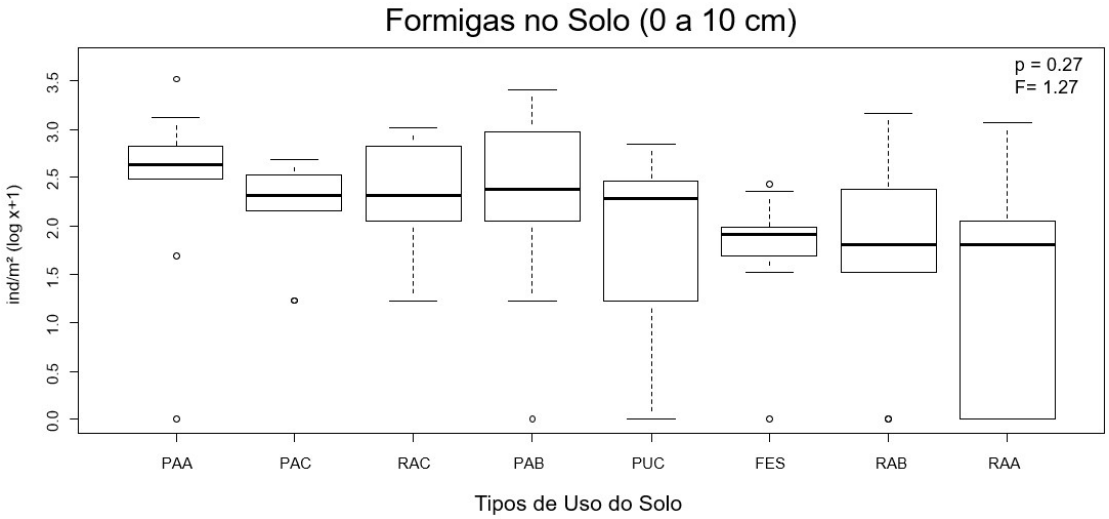


Figura 37: Densidade de Formigas na profundidade de 0 a 10 cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C).

Dentre os insetos com maior diversidade específica estão os besouros (Ordem coleoptera) que representam cerca de 40% de todos os insetos e têm grande diversidade alimentar, maioria detritívoros, mas podem ser predadores, herbívoros, brocadores de semente, galhadores e polinizadores (MOREIRA, 2008). A importância dos coleopteras para o sistema solo/planta reside em uma série de atividades que este grupo executa, tais como: o ataque a raízes de plantas, ação mecânica sobre os troncos mortos e outros detritos, aeração do solo pela escavação de túneis e revolvimento das camadas superficiais, devido a todas estas atividades alguns autores podem classifica-los também como engenheiros do ecossistema.

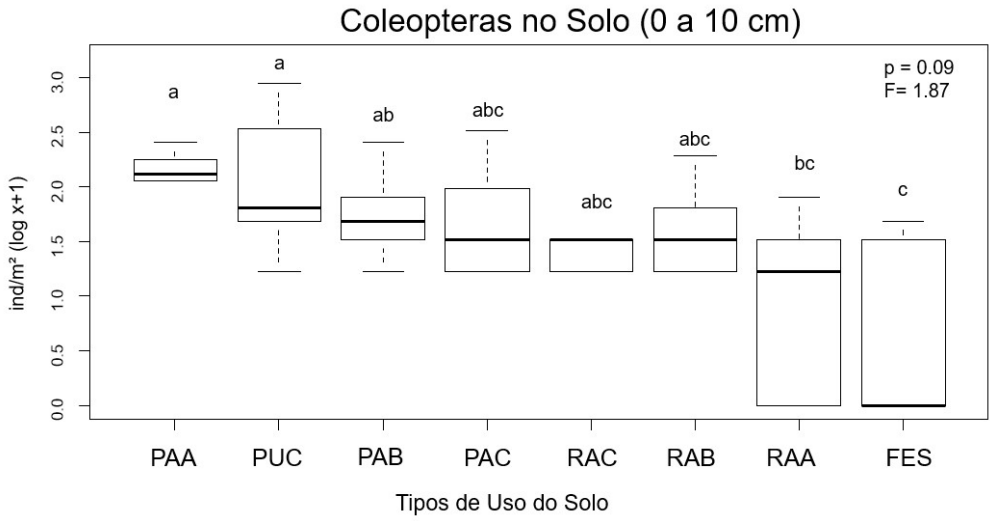


Figura 38: Densidade de Coleopteras na profundidade de 0 a 10 cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras iguais indicam que não existe diferença significativa pelo teste Tukey.

Dados de densidade de besouros, na profundidade 0-10cm (Figura 38) diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo (p = 0,09, F= 1,87), nas áreas em processo de Restauração Ativa (RAC, RAB, RAA) e no Fragmento de Floresta (FES) a densidade de coleópteras menor. Nas áreas cobertas por gramíneas como na Pastagem Abandonada e na Pastagem Uso Contínuo encontramos a maior densidade de coleopteras que devido a sua amplitude nutricional está presente em ambientes ricos em matéria orgânica animal e vegetal. Os organismos de hábito detritívoro podem ser usados como bioindicadores no monitoramento dos processos ecológicos em área de Restauração Florestal (SNYDER & HENDRIX, 2008). Dados de densidade de diplopodas na profundidade 0-10cm (Figura 39) diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo (p=0,04, F= 2,25). A maior média ocorre na FES, mas há grande variabilidade nas áreas RPC, RAA. No Fragmento de Floresta (FES) este grupo pode estar associado a matéria orgânica já bem transformada e mesclada ao solo devido ao tempo de existência deste fragmento de vegetação nativa, em áreas com 20 anos de implantação da Restauração Florestal Ativa (VASCONCELLOS et al., 2013b) encontraram maior abundância de diplopodas. Estes organismos favorecem a conversão de detritos vegetais em húmus e desempenham um papel vital no ciclo da matéria, energia e nutrientes, além disso, podem ser encontrados em qualquer tipo de ecossistema terrestre (GEOFFROY, 2015).

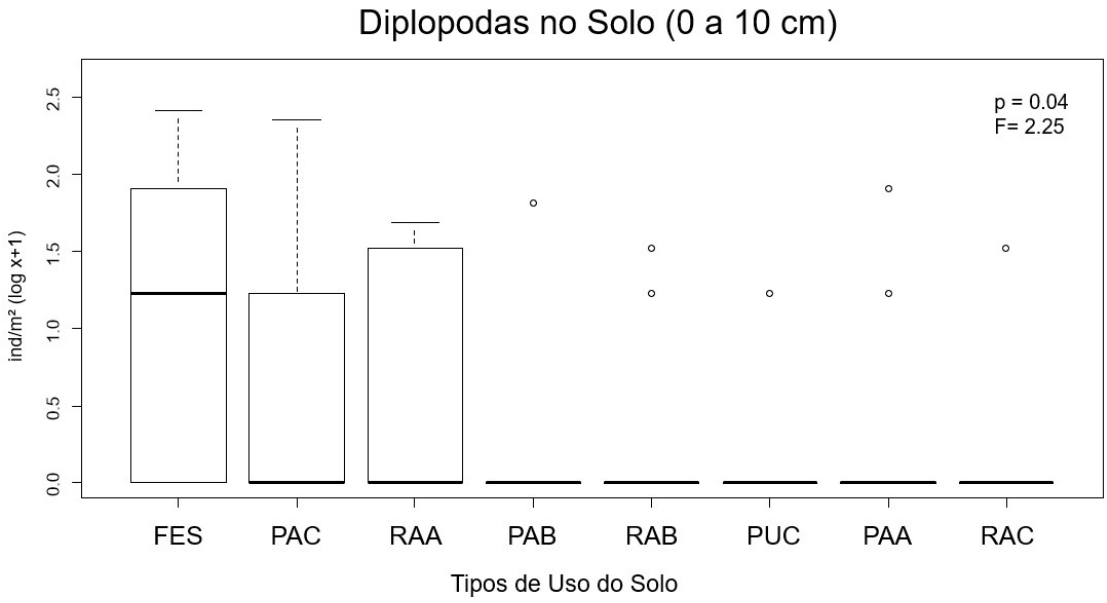


Figura 39: Densidade de Diplopodas do solo na profundidade de 0 a 10 cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C).

Os Isopodas têm papel importante no funcionamento dos solos e consequentemente nos serviços ecossistêmicos, eles atuam no processo de fragmentação de detritos, contribuindo para a entrada de matéria orgânica de alta qualidade e aumentando o micro bioma para ciclagem de nutrientes no solo, segundo (SNYDER; HENDRIX, 2008) estes invertebrados podem ser recomendados para avaliação de áreas em processo de restauração ecológica. Os isopodas apresentaram diferença significativa entre os tipos de uso do solo ($p<0,0001$), (Figura 40), com maior densidade nas áreas de RAA, RAC, PAA e PAC que pode ser associado ao microcosmos produzido pelo desenvolvimento da biomassa das gramíneas, trazendo maior umidade que favorece a presença destes organismos decompositores.

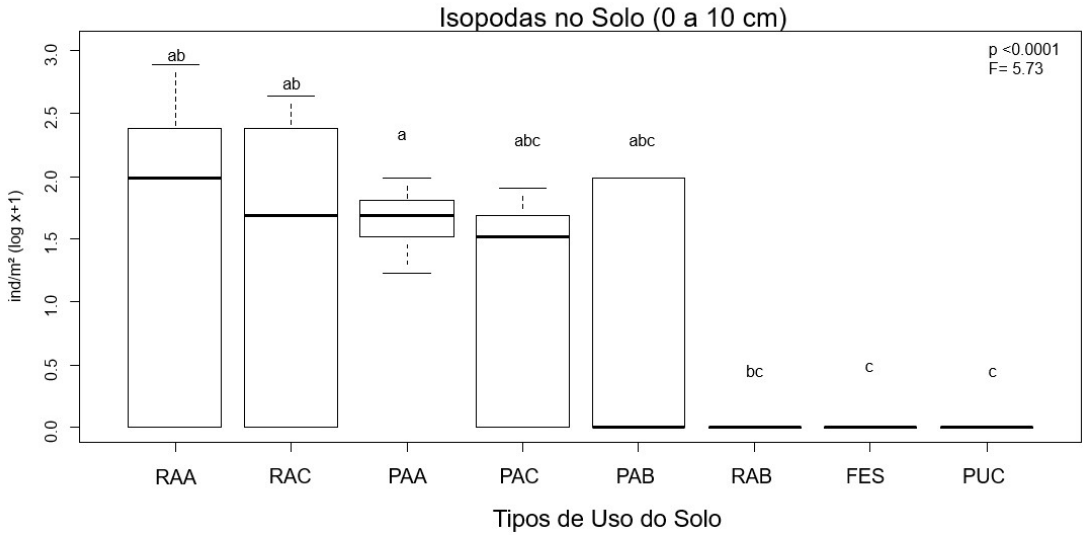


Figura 40: Densidade de Isopodas do solo na profundidade de 0 a 10 cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras iguais indicam que não existe diferença significativa pelo teste Tukey.

Em relação aos organismos pertencentes ao grupo funcional dos decompositores ou detritívoros, a ordem Blattodea é comumente abundante nos solos florestais, possuem aparelho bucal mastigador e podem ser herbívoros, carnívoros ou onívoros. Este grupo taxonômico possui maior densidade nas áreas de Restauração Ativa (RAA e RAC) e nas áreas correspondentes de Pastagem Abandonada (PAA e PAC), a alta densidade destes organismos no solo pode favorecer este nicho de organismos que favorecem a decomposição da matéria orgânica. Utilizando a macrofauna como indicadora de qualidade em áreas em processo de restauração florestal com diferentes idades (VASCONCELLOS et al., 2013b) encontraram o grupo taxonômico das baratas associado com as áreas mais recentes com 5 e 10 anos.

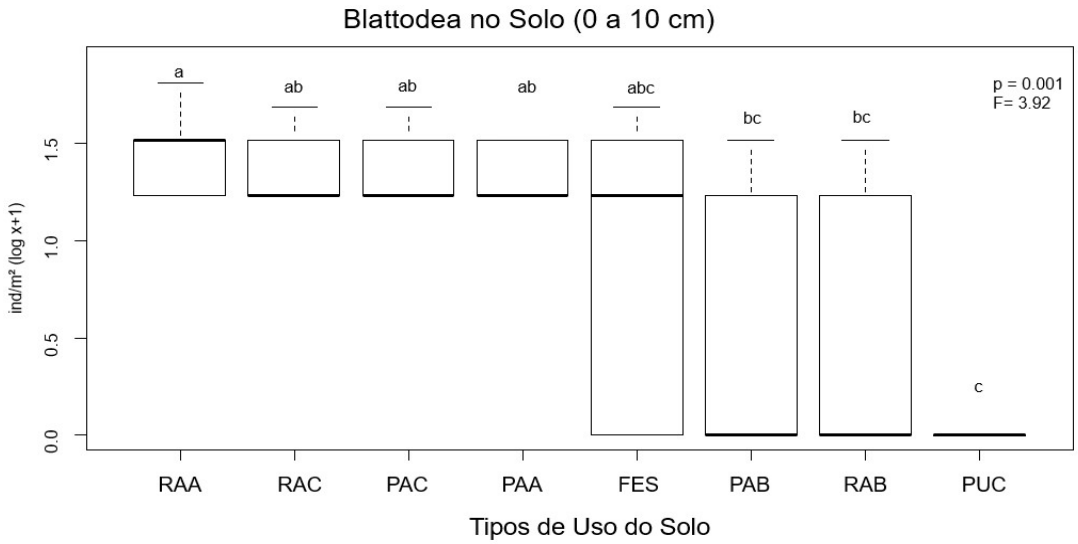


Figura 41: Densidade de blattodea do solo na profundidade de 0 a 10 cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras iguais indicam que não existe diferença significativa pelo teste Tukey.

Em relação a Classe Chilopoda que também são miriápodes, mas com hábito predador, foram mais abundantes no Fragmento de Floresta (FES), que representa a nossa área referência de floresta conservada, na pesquisa de (VASCONCELLOS et al., 2013b) esse grupo taxonômico foi associado com as áreas de restauração florestal com mais de 20 anos de implantação.

Outro grupo de predadores facilmente encontrado no solo são os dermapteras destaca-se a maior abundância destes organismos nas áreas de Restauração Ativa (RAA e RAC) a presença destes predadores pode ser muito positiva para a qualidade destas áreas, vimos que predadores como Chilopodas e aracnídeos estiveram com maior abundância na área de floresta, porém sabemos que há uma redundância funcional entre os organismos, no caso os Dermapteras estão ocupando o nicho de predadores nas áreas de Restauração Ativa.

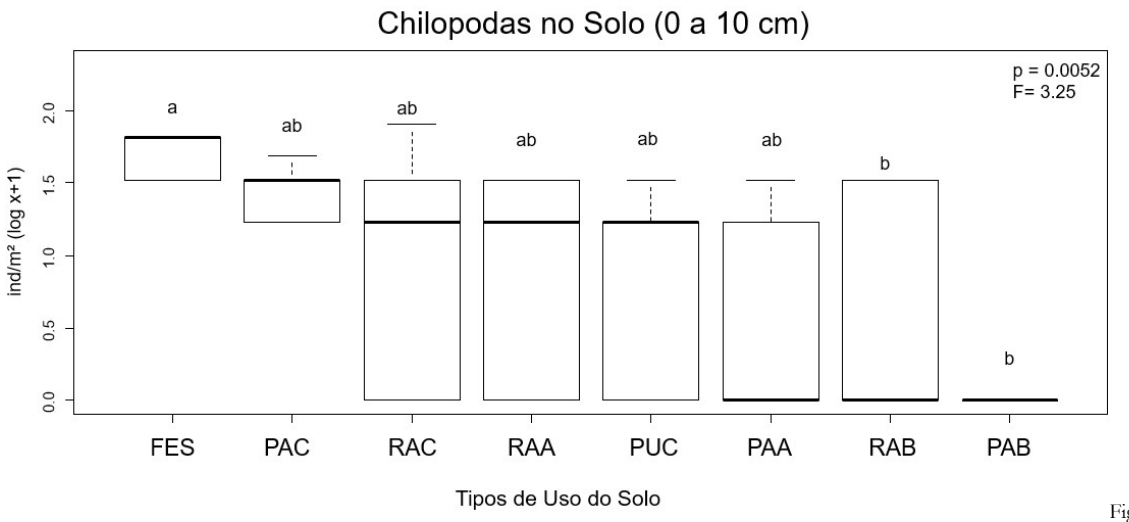


Figura 42: Densidade de Chilopodas do solo na profundidade de 0 a 10 cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras iguais indicam que não existe diferença significativa pelo teste Tukey.

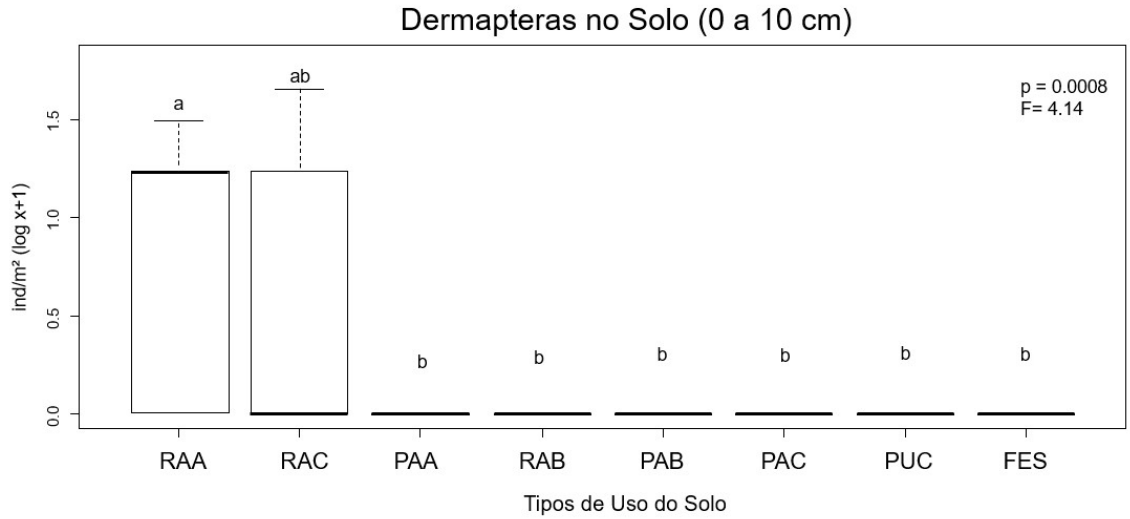


Figura 43: Densidade de Dermapteras do solo na profundidade de 0 a 10 cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras iguais indicam que não existe diferença significativa pelo teste Tukey.

A classe Arachinida está ligada a processos essenciais no ecossistema, tais como as transferências de energia nas cadeias alimentares, a presença destes predadores no conjunto da macrofauna local pode ser associada com ambientes menos perturbados A maioria dos predadores foram mais abundantes na área do Fragmento Florestal (FES), que representa a área referência de floresta conservada, também na pesquisa de (VASCONCELLOS et al., 2013b) esse grupo taxonômico foi associado com as áreas de restauração florestal com mais de 20 anos de implantação. Nas áreas PAA, RAB, RAC, e PAC encontra-se a maior densidade média de aracnídeos em contraponto na Pastagem Uso Contínuo (PUC), PAB e RAA a presença destes organismos é reduzida, no entanto não há diferença significativa (ANOVA p=0,23), (Figura 44).

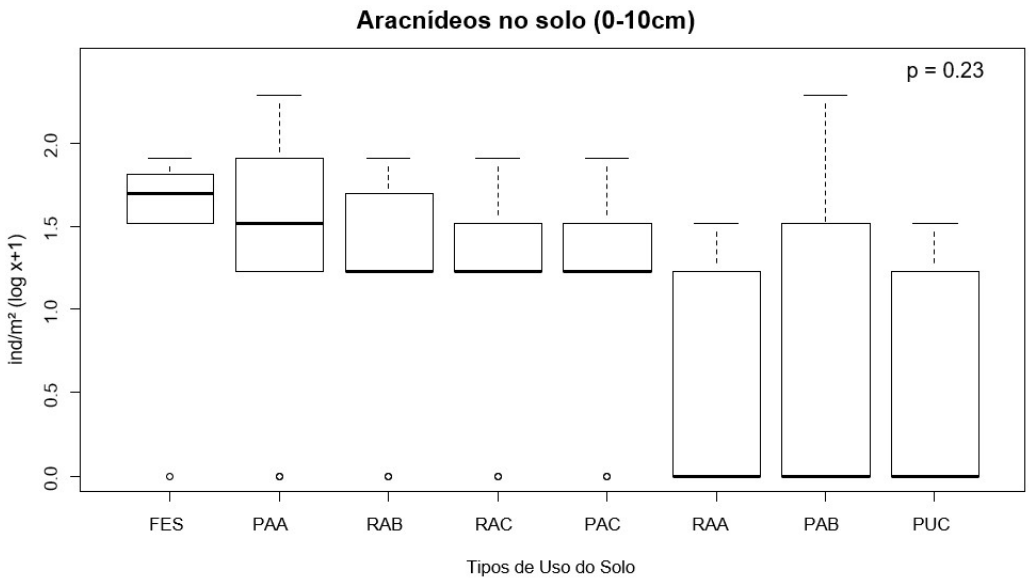


Figura 44: Densidade de Aracnídeos na profundidade de 0 a 10 cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C).

A riqueza GT difere significativamente entre as áreas (p=0,01, F=3,1), (Figura 45), áreas com mais diversidade de macrofauna são: Pastagem Abandonada A e C (PAA e PAC) e Restauração Ativa A e C (RAA e RAC).

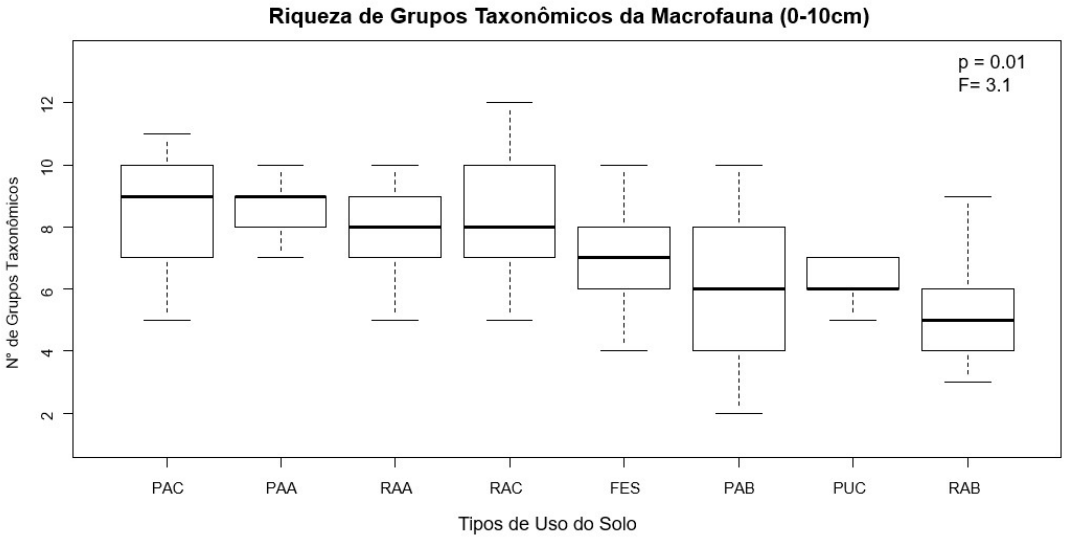


Figura 45: Riqueza de GT, na profundidade de 0 a 10 cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C).

ATRIBUTOS DE AGREGAÇÃO DO SOLO

Apresentamos as médias e desvio-padrão de cada categoria dos atributos de agregação do solo em gramas e também valores expressos porcentagem, referente a amostras na profundidade de 0-10cm (Tabela 09). A variabilidade expressa nos gráficos box-plot, com resultados da análise de variância e teste Tukey, apresentamos em seguida a partir da Figura 46. Os agregados biogênicos, formados pela interação dos organismos edáficos com as partículas do solo, são muito importantes para a formação do solo, sua presença pode representar melhor qualidade ao solo, devido a agregação que preserva os nutrientes do solo , os agregados físicos realmente são mais difíceis de serem classificados, quando não há observação de características biogênicas, o agregado terá sua origem física devido ao umedecimento e secamento do solo, formas angulares e ausência de matéria orgânica evidente (LAVELLE et al., 2020). Nas áreas FES, RAB e RAC a quantidade de agregados físico foi bem pequena.

Tabela 09: Atributos de agregação do solo na profundidade de 0 a 10 cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C).

Morfologia do Solo - Unidade (gramas)

Tipos de Uso (0-10cm)	AB	AF	SE	R	AR	SA 5	SA 2
PUC	42 (23)	39(14)	6,8(0,4)	17(1,3)	116(18)	201(45)	556(70)
FES	27(17)	0	17(8,3)	8,8(1,4)	58(51)	276(45)	357(72)
PAA	69(33)	47(51)	10(1,4)	10(1,8)	150(34)	201(54)	294(67)
PAB	162(129)	30(26)	18(13)	9(0,7)	161(45)	269(54)	298(41)
PAC	200(41)	9(6)	9,3(2)	9,7(1,3)	152(20)	181(25)	241(52)
RAA	114(2,8)	54(34)	9,8(2,3)	5(0,6)	24(20)	265(60)	571(98)
RAB	125(30)	7,2(5)	6(0,6)	6,4(1)	42(29)	353(30)	514(48)
RAC	145(21)	7,9(11)	11(2,3)	6,1(0,4)	26(7)	243(59)	385(150)

Morfologia do Solo - Unidade (gramas)

Tipos de Uso (0-10cm)	AB	AF	SE	R	AR	SA 5	SA 2
PUC	42 (23)	39(14)	6,8(0,4)	17(1,3)	116(18)	201(45)	556(70)
FES	27(17)	0	17(8,3)	8,8(1,4)	58(51)	276(45)	357(72)
PAA	69(33)	47(51)	10(1,4)	10(1,8)	150(34)	201(54)	294(67)
PAB	162(129)	30(26)	18(13)	9(0,7)	161(45)	269(54)	298(41)
PAC	200(41)	9(6)	9,3(2)	9,7(1,3)	152(20)	181(25)	241(52)
RAA	114(2,8)	54(34)	9,8(2,3)	5(0,6)	24(20)	265(60)	571(98)
RAB	125(30)	7,2(5)	6(0,6)	6,4(1)	42(29)	353(30)	514(48)
RAC	145(21)	7,9(11)	11(2,3)	6,1(0,4)	26(7)	243(59)	385(150)

A quantidade de agregados biogênicos (AB) difere estatisticamente entre os tipos de uso do solo ($p<0,0002$, $F= 4,84$), (Figura 46). Encontramos a maior presença de AB

em todas as áreas de Restauração Ativa e Pastagem Abandonada (RAA, RAB, RAC e PAA, PAB, PAC), por outro lado a Pastagem Uso Contínuo (PUC) apresentou baixa quantidade deste tipo de agregado.

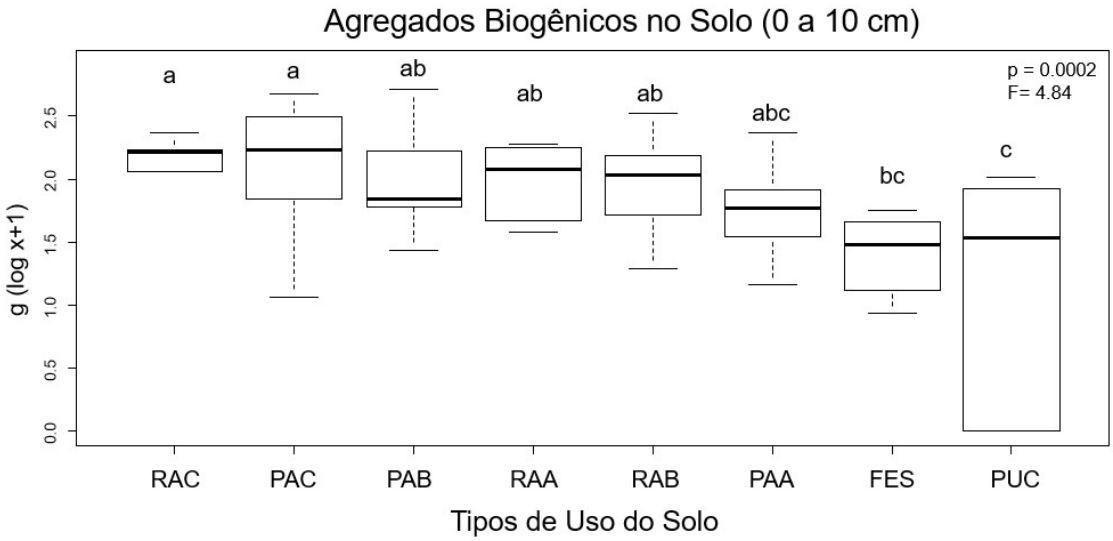


Figura 46: Agregados biogênicos na profundidade de 0-10cm, em relação aos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras iguais indicam que não a diferença significativa de acordo com Teste Tukey.

A quantidade de agregados físicos é acentuada na área de Pastagem Uso Contínuo (PUC) e nas áreas Pastagem Abandonada (PAA, PAB e PAC), no entanto os dados não diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo ($p<0,07$, $F= 1,99$), (Figura 47). Áreas erodidas e pastagens podem apresentar mais agregados físicos, enquanto que áreas de floresta apresentam mais agregados biogênicos (VELASQUEZ; LAVELLE; ANDRADE, 2007).

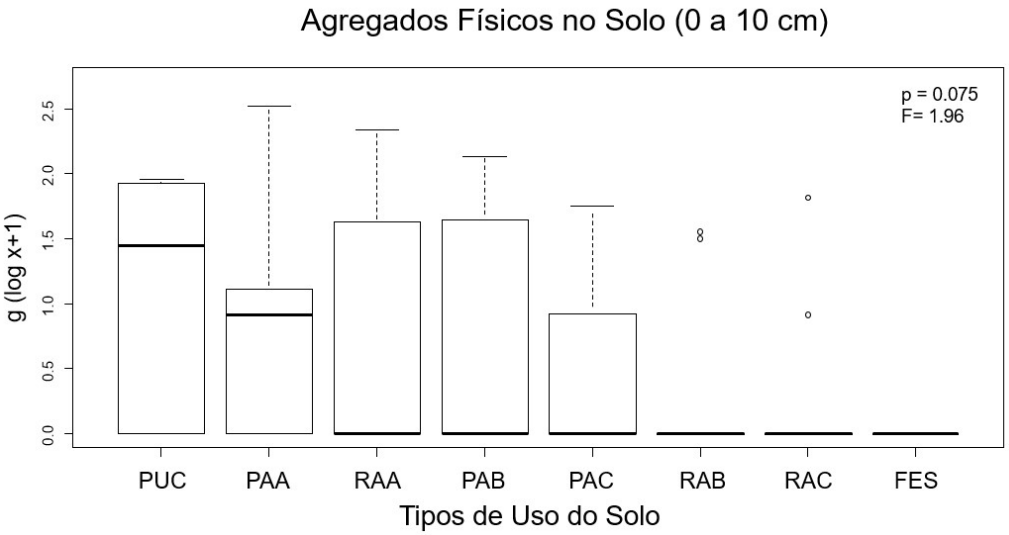


Figura 47: Agregados físicos na profundidade de 0-10cm, em relação aos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PAS (Pastagem de uso contínuo); RPA (Restauração Passiva A); RPB (Restauração Passiva B); RPC (Restauração Passiva C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Anova $p=0,07$, não significativo.

Dados referentes aos Agregados de Raiz diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo ($p<0,0001$, $F= 6,78$), (Figura 48), nas áreas de Pastagem Abandonada (PAA, PAB, PAC) e na Pastagem Uso Contínuo (PUC)

encontramos maior quantidade de agregados de raiz e diferem significativamente das áreas restantes. A quantidade de agregados de raiz na Restauração Ativa (RAA, RAB e RAC) e no Fragmento de Floresta (FES) é menor que nas pastagens e não diferem significativamente entre si. A morfologia do solo possibilita entender o processo de formação em cada tipo de uso do solo, área de Pastagem (PAS) e Floresta (FES) o input de biomassa vegetal é distinto entre as áreas, mas a efeito na química do solo é positivo para os dois tipos de uso do solo

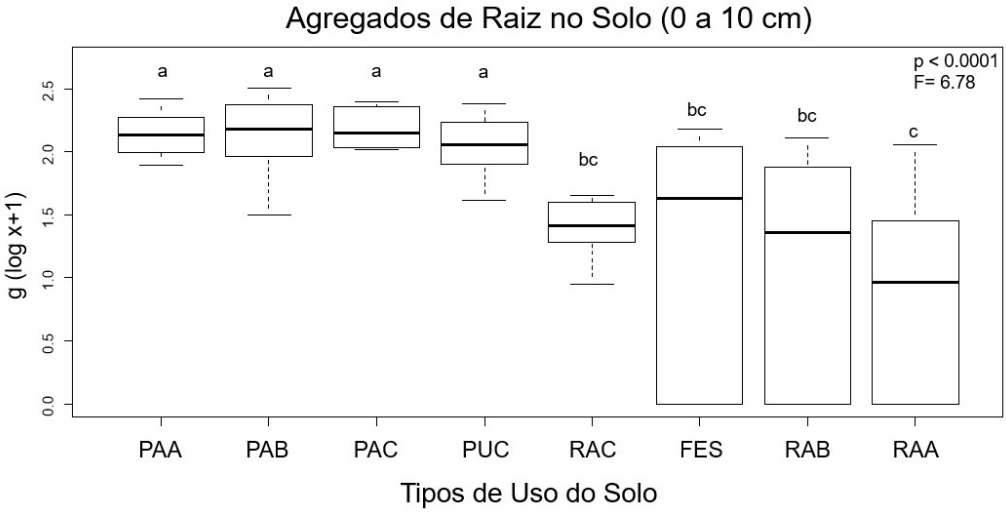


Figura 48: Agregados de raiz na profundidade de 0-10cm, em relação aos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras iguais indicam que não a diferença significativa de acordo com Teste Tukey.

As raízes foram separadas (à parte do solo agregado de raiz) gerando dados de quantidade de raízes no solo (R) que diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo (p<0,0001, F=10,10), (Figura 49). A quantidade de raízes é maior na Pastagem Uso Contínuo (PUC) e difere significativamente dos outros tipos de uso do solo.

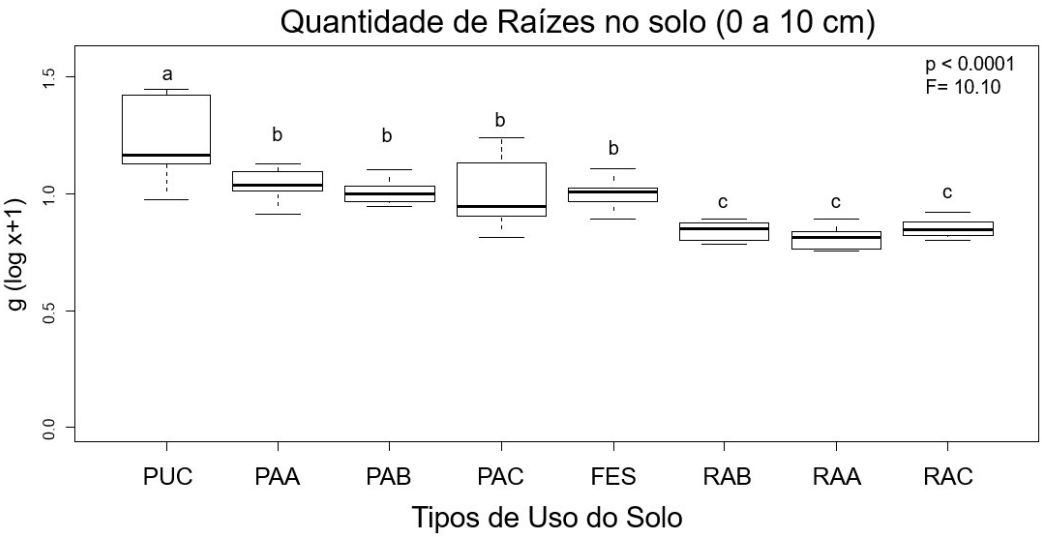


Figura 49: Quantidade de raízes no solo, na profundidade de 0-10cm, em relação aos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras iguais indicam que não a diferença significativa de acordo com Teste Tukey.

Galhos, folhas e material vegetal em decomposição encontrados nas amostras os dados de quantidade serapilheira (SE), estes dados diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo (p<0,004, F= 3,34), (Figura 50).

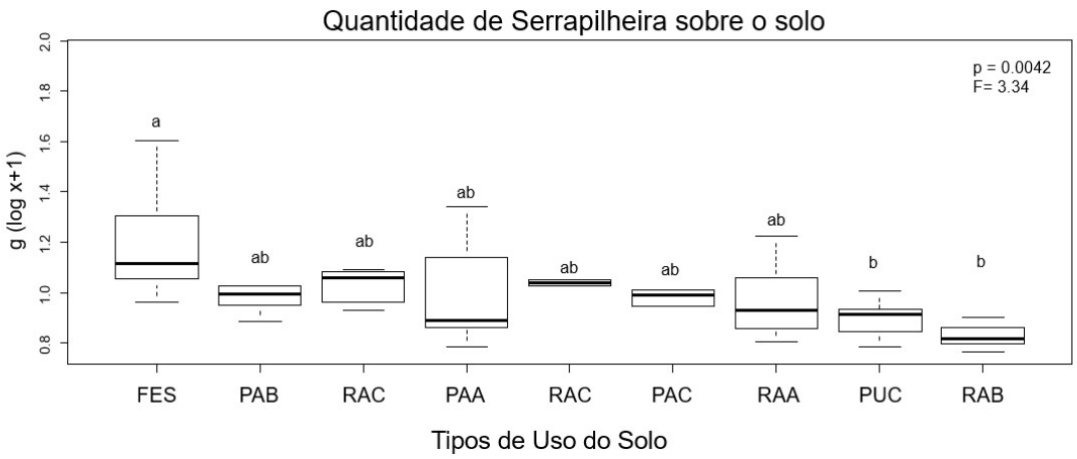
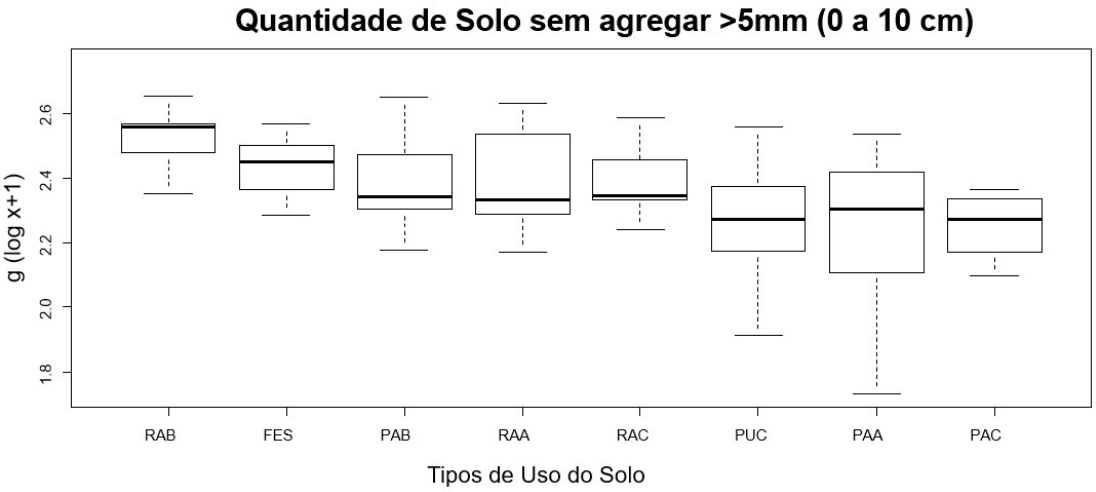


Figura 50: Quantidade de serapilheira sob o solo, em relação aos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras iguais indicam que não a diferença significativa de acordo com Teste Tukey.

Os dados referentes a quantidade de solo sem macro agregar foram divididos em dois tamanhos (>5mm) e (<2mm) que diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo (SA5: p=0,0037, F= 3,41; SA2, p<0,0001, F=8,75), (Figura 51).



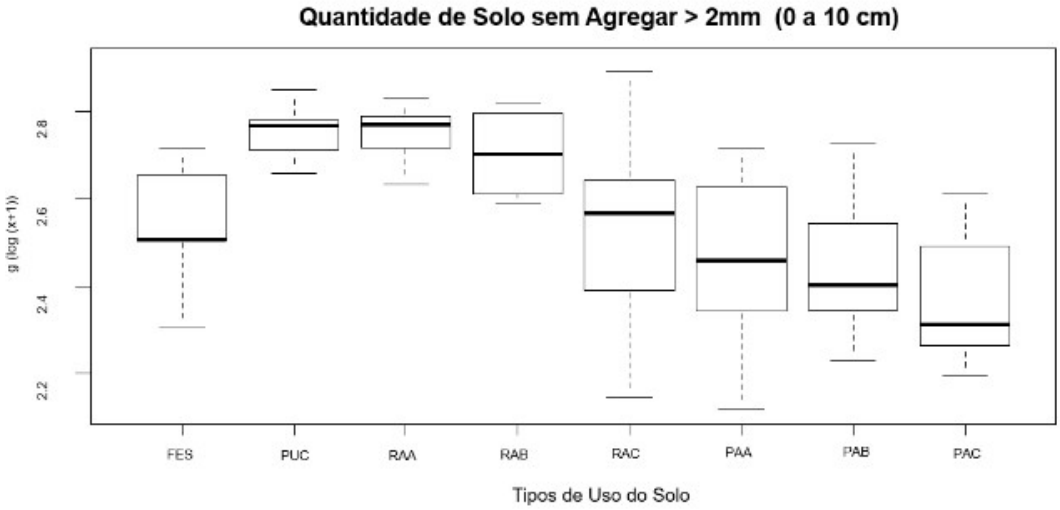


Figura 51: Quantidade de solo sem agregar >5mm e >2mm, respectivamente, em gramas (trans. log (x+1) de profundidade de 0-10cm, em relação aos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C).

ANEXO B

ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

Mudanças na comunidade microbiana do solo ocorrem de acordo com o tipo de uso do solo, utilizamos 9 atributos utilizados para formação do indicador de ciclagem de nutrientes (Artigo 2) e neste material complementar apresentamos os dados detalhadamente (Tabela 1).

Tabela 1: Média e desvio-padrão dos 9 atributos utilizados para formação do indicador de ciclagem de nutrientes, solo coletado na profundidade de 0-5cm, nas áreas em processo de Restauração Ativa (RAA, RAB, RAC), Pastagem Abandonada (PAA, PAB, PAC), Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FES), Pastagem de Uso Contínuo (PUC).

profundidade 0-5cm	**% Matéria Orgânica do Solo**			**µg C g^{-1}solo**	**µg CO_2 g^{-1}solo.dia**	**qCO_2**	**% Cmic/Ctot**	**Enzimas mg PNF. kg_{-1} solo.hora**	
Tipos de Uso do Solo	**Carbono Total**	**Nitrogênio Total**	**C/N**	**Biomassa Microbiana**	**Respiração Microbiana**	**Quociente Metabólico**	**Quociente Microbiano**	**Fosfatase ácida**	**βGlycosidase**
RAA	2,2 (0,1)	0,1 (0,01)	12	67,4 (175)	91 (0)	0,14 (0,03)	3,0 (0,5)	728 (112)	68 (37)
RAB	2,6 (0,2)	0,2 (0,02)	12	69,6 (115)	77(21)	0,11 (0,03)	2,6 (0,3)	795 (101)	138 (24)
RAC	2,7 (0,2)	0,2 (0,02)	13	89,2 (304)	84 (31)	0,09 (0,01)	3,3 (1,1)	934 (286)	109 (40)
PAA	2,8 (0,2)	0,2 (0,02)	13	111,0 (173)	148 (42)	0,13 (0,03)	3,9 (0,5)	824(169)	195 (76)
PAB	3,3 (0,0)	0,2 (0,00)	14	98,4 (198)	124 (52)	0,12 (0,03)	2,8 (0,4)	900 (108)	133 (52)
PAC	2,6 (0,3)	0,2 (0,02)	12	100,7 (54)	99 (25)	0,09 (0,03)	3,9 (0,5)	962 (115)	132 (51)
FES	7,3 (0,6)	0,7 (0,08)	10	118,0 (265)	105 (39)	0,09 (0,02)	1,6 (0,3)	620 (147)	95 (51)
PUC	5,2 (0,1)	0,3 (0,08)	13	155,7 (118)	243(17)	0,16 (0,02)	3,1 (0,7)	804(80)	270 (96)

O Carbono Microbiano (Cmic) também pode ser referido como biomassa microbiana, de acordo com a Análise de Variância ($p=0,001$, $F=19,7$) há diferença significativa entre os tipos de uso do solo, complementado com o teste Tukey que indica diferenças par a par (Figura 01).

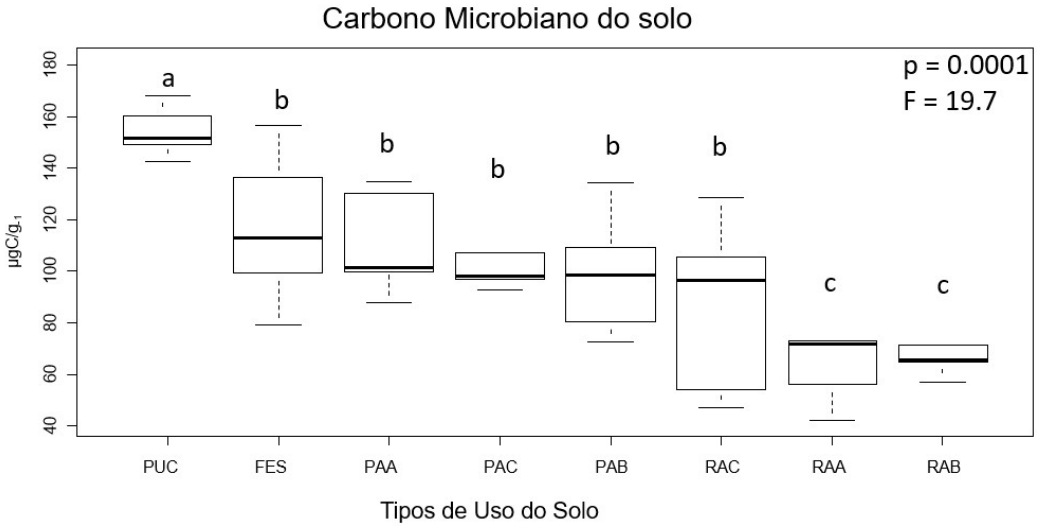


Figura 01: Biomassa Microbiana ou Carbono Microbiano, na superfície do solo 0-5cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras iguais indicam que não há diferença significativa de acordo com teste Tukey.

Encontramos os menores valores (67,4 e 69,6 µgC/g_{-1}) de biomassa microbiana nas áreas de Restauração Ativa (RAA, RAB e RAC), indicando menor presença de microrganismos no solo destas áreas. O valor mais alto deste atributo ocorreu na área de Pastagem Uso Contínuo (PUC) com a média de 155,7 µgC/g, que diferiu do Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FES) com média 118,0 µgC/g_{-1}. É comum em pastagens o *input* constante de matéria orgânica (excrementos) favorecer a presença dos microrganismos do solo. Em plantio de milho com melhor produtividade a biomassa microbiana teve média de 170 µgC/g_{-1} (ANZALONE et al., 2020) .

A Respiração Basal ou respiração microbiana representa a oxidação da matéria orgânica por organismos aeróbios, ou seja, que consomem O_2 e liberam CO_2, entre os tipos de usos do solo em análise a Respiração variou de 268 a 40 µg CO g^{-1}solo em 15 dias de incubação.

Há diferença significativa entre os tipos de usos (p=0,001, F=19,7), de acordo com o teste Tukey (Figura 2) na área de Pastagem Uso Contínuo (PUC) a respiração possui o valor mais alto e difere-se significativamente das áreas restantes, a respiração microbiana na Floresta (FES) possui metade do valor encontrado em PUC, no entanto, Pastagem Abandonada (PAB, PAC) e Restauração Ativa (RAA, RAB e RAC) não diferiram significativamente em relação este atributo.

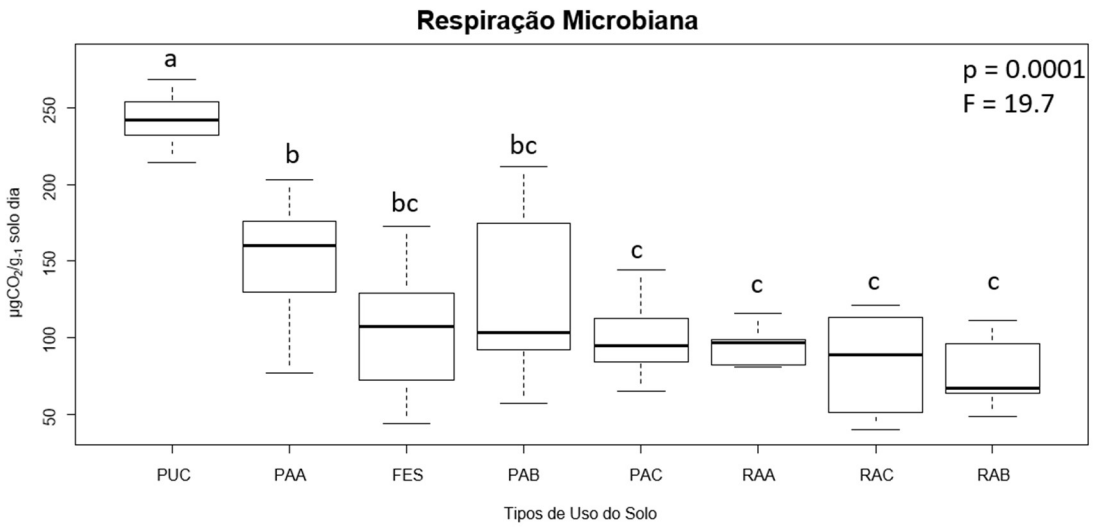


Figura 2: Respiração Microbiana ou Respiração Basal, na superfície do solo 0-5cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras iguais indicam que não há diferença significativa de acordo com teste Tukey.

O Quociente Metabólico (qCO_2) é a razão entre a Respiração Basal e o Carbono Microbiano, espera-se que em um ambiente em equilíbrio: a biomassa seria mais eficiente para assimilar o C e perderia menos CO^2 para atmosfera (CARDOSO; VASCONCELLOS, 2015; ANDERSON;DOMSCH, 1986). Há diferença significativa entre os tipos de uso do solo (p=0,001, F=19,7). Na Figura 3, observamos a variabilidade deste atributo entre 0,02 e 0,18 C-CO_2, a média mais baixa é encontrado no Fragmento de Floresta (FES) é a mais alta na Pastagem Uso Contínuo (PUC).

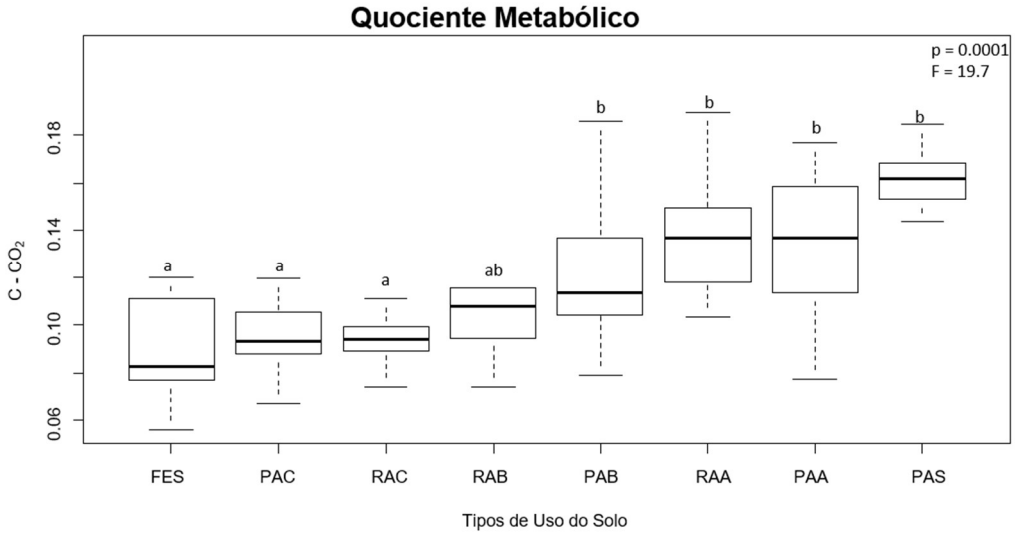


Figura 3: Quociente Metabólico do solo, na superfície do solo 0-5cm, nos tipos de uso do solo FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras iguais indicam que não há diferença significativa de acordo com teste Tukey.

O quociente microbiano (qMic) ou quociente de carbono considera o acúmulo de carbono na Biomassa Microbiana em relação ao Carbono Total do solo, sendo comum a sua variação de 1 a 4,4% (MOREIRA; SIQUEIRA,

2006). Em relação a este atributo há diferença significativa entre os tipos de uso do solo (p=0,0001, F= 7,6), com variação de 1,0 a 5,5%, (Figura 4), o qMic obteve baixa porcentagem no Fragmento de Floresta (FES) e na área de Restauração Ativa B (RAB), e mais alto valor nas três áreas de Pastagem Abandonada (PAA, PAB, PAC) na Pastagem Uso Contínuo (PUC) e na Restauração Ativa C (RAC) com médias entre 3 e 4%.

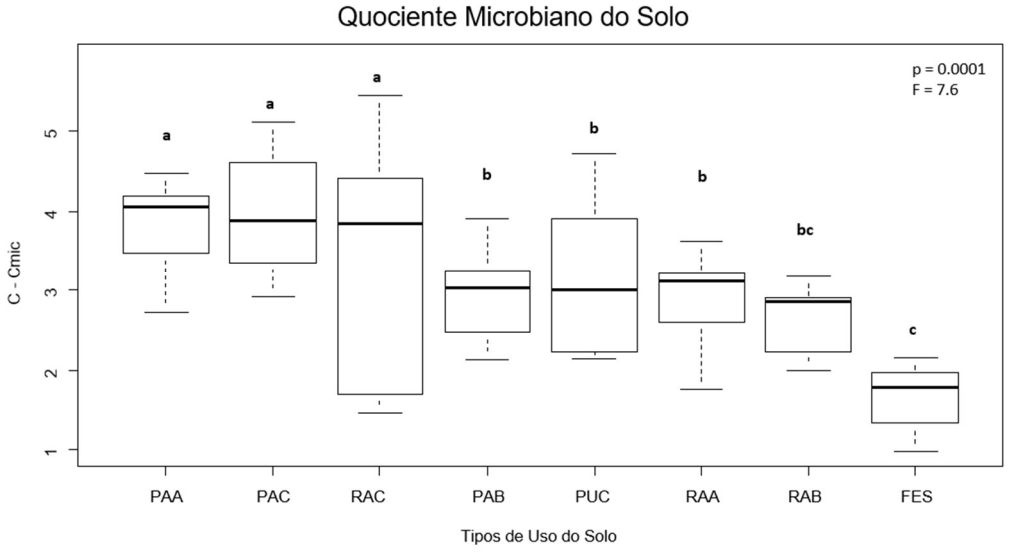


Figura 4: Quociente Microbiano, na superfície do solo 0-5cm, nos tipos de uso do solo FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras iguais indicam que não há diferença significativa de acordo com teste Tukey.

As enzimas do solo são substâncias catalizadoras que participam dos processos biogeoquímicos dentro dos ciclos do carbono, nitrogênio, fósforo e enxofre, as enzimas relacionadas aos ciclos são respectivamente, β-glucosidase, nitrogenase, fosfatase e sulfatase. Nossos resultados mostram que as enzimas analisadas variam significativamente entre os tipos de usos do solo (Figura 5 e 6). A enzima βglycosidase variou de 14,4 a 511 mg PNF. kg^{-1}solo.hora entre os tipos de uso do solo a Pastagem Uso Contínuo (PUC) apresenta a maior presença desta enzima no solo na profundidade de 0-5 cm. Áreas de Restauração Ativa (RAC e RAC) juntamente com o Fragmento de Floresta (FES) possuem média de 100 mg PNF. kg^{-1}solo.hora, da enzima βglycosidase, atividade reduzida em relação às outras áreas.

Na área RAA (68 mgPNF.kg-1solo.hora), indicando pouca disponibilidade de matéria orgânica neste local, o nível considerado muito baixo é menor ou igual a 60 mgPNF. kg-1solo.hora, em solos arenosos do Cerrado (LOPES et al., 2013) sugerem que valores maiores que 140 mgPNF.kg-1solo.hora, são adequados para esta enzima. A βglycosidase é responsável por catalisar as reações de hidrólise da maltose e da celobiose, cujos produtos são importantes fontes de energia para os microrganismos do solo, é encontrada alta correlação desta enzima com a atividade e quantidade de microrganismos do solo.

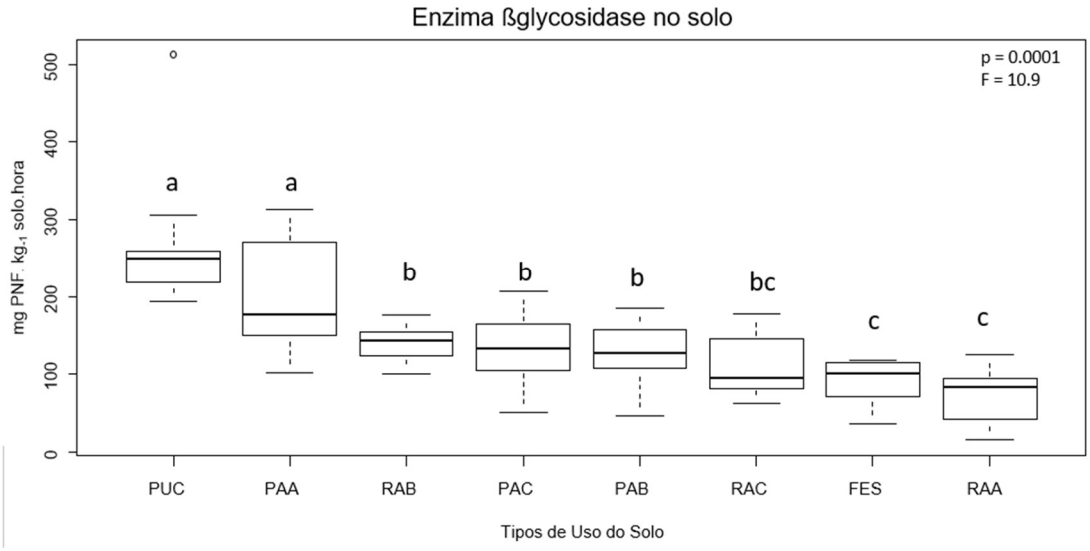


Figura 5: Enzima βglycosidase no solo, amostras 0-5cm, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras iguais indicam que não há diferença significativa de acordo com teste Tukey.

A enzima Fosfatase ácida no solo, na profundidade de 0-5 cm, variou de 382 a 1435mg PNF. kg^{-1}solo.hora entre todas as áreas, no Fragmento de Floresta (FES) e na Restauração Ativa (RAA) encontramos a menor presença desta enzima no solo (< 800 mg PNF.kg^{-1} solo.hora) o restante das áreas não difere significativamente entre si (> 800 mg PNF.kg^{-1} solo.hora).

A presença desta enzima é comum é solos ácidos enquanto a fosfatase alcalina em solos alcalinos (EIVAZI; TABATABAI, 1988b), devida a acidez do solo tropical analisamos apenas a fosfatase ácida. Na área RAC, ocorre o maior pico de fosfatase ácida em 1435 mgPNF.kg^{-1}solo.hora.

No Fragmento de Floresta encontramos o menor valor (620 mgPNF. kg^{-1}solo.hora) para atividade da enzima fosfatase ácida, apesar de considerado baixo, esta área não possui deficiência em fósforo que deve ser suprido pela atividade da enzima fosfatase que atua em meio básico, ou seja, alto pH como é encontrado na área de Floresta. A fosfatase acida é inibida em altos teores de P no solo.

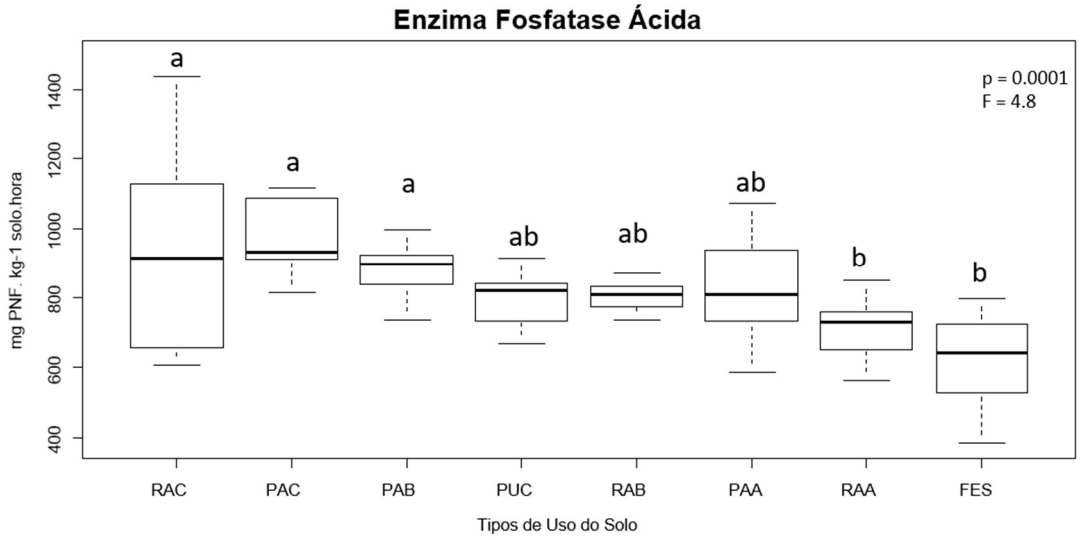


Figura 6: Enzima Fosfatase ácida, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras iguais indicam que não há diferença significativa de acordo com teste Tukey.

A enzima β-glucosidase tem alta correlação Pearson R=0,80 com a respiração basal e com a biomassa microbiana correlação de Pearson R = 0,65 (Figura 7 e 8). Enquanto a fosfatase ácida tem alta correlação de Pearson R =0,60 com o quociente microbiano (Figura 9).

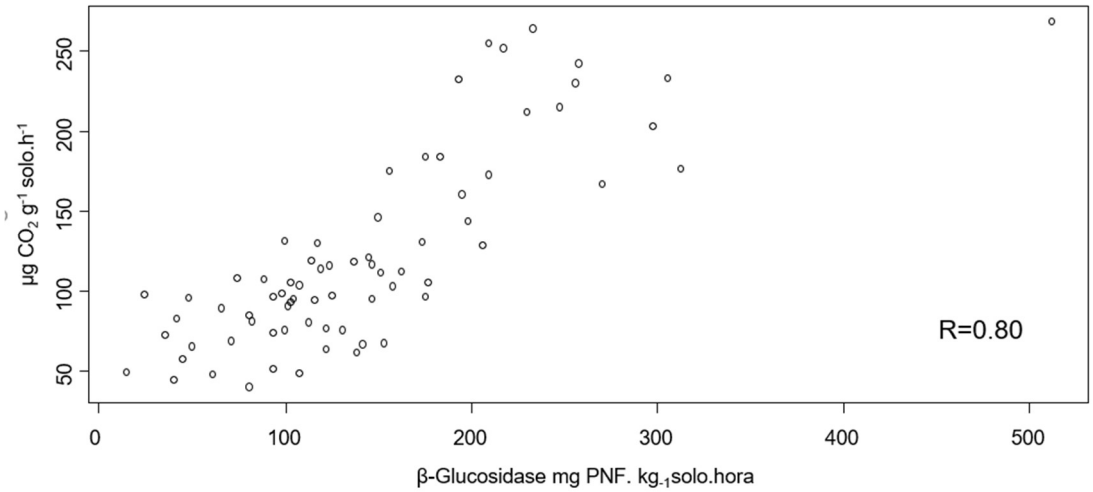


Figura 7: Correlação entre a enzima β-glucosidase e a a respiração microbiana no solo superficial (0-5cm).

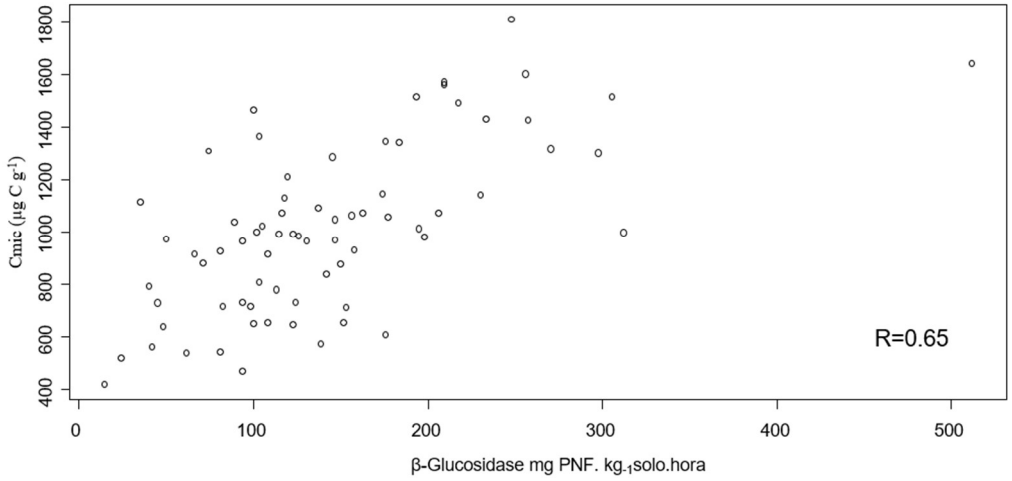


Figura 8: Correlação entre a enzima β-glucosidase e o carbono microbiano no solo superficial (0-5cm).

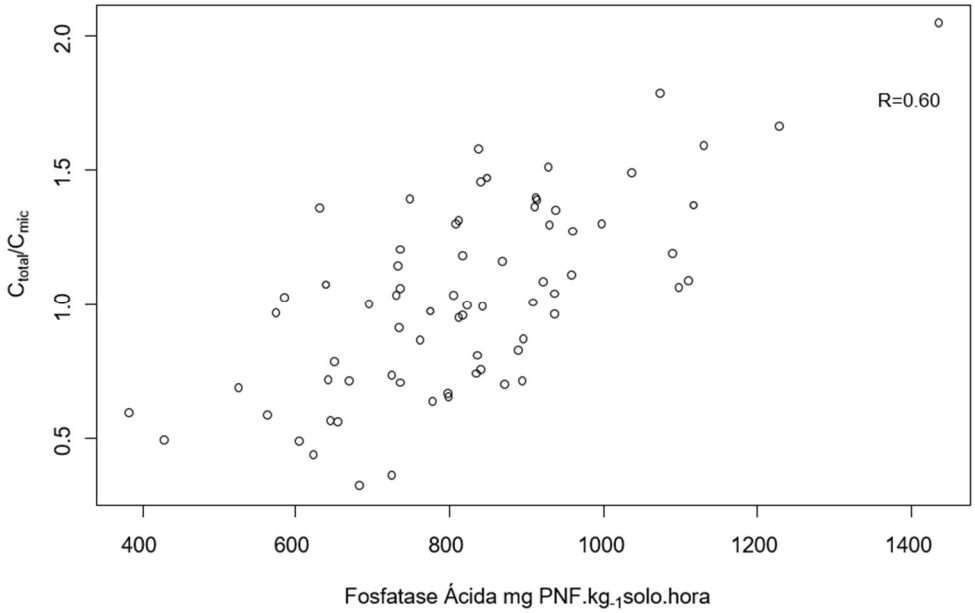


Figura 9: Correlação entre a enzima Fosfatase ácida e o quociente microbiano no solo superficial (0-5cm).

ATRIBUTOS DA MESOFAUNA DA SERAPILHEIRA

Os ácaros têm uma diversidade de níveis funcionais, apresentando-se como predadores e detritívoros. Os predadores são importantes, controlando as populações de outros organismos no solo, especialmente a microbiota. Os colêmbolas são menos diversos que os ácaros (aprox. 270 espécies no Brasil) (ABRANTES et al., 2010) e exercem a função detritívora, contribuindo para a decomposição da matéria orgânica e o controle das populações, especialmente de fungos (MORAES; FRANKLIN, 2008). Dados densidade (ind/m²) de ácaros na serrapilheira (Figura 10) diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo ($p<0,001$, $F=3,65$). Nas áreas do Fragmento de Floresta (FES) e nas áreas de Pastagem Abandonada (PAB e PAC) a densidade de ácaros é mais acentuada e diferem significativamente das áreas RAC e PAA onde a densidade de ácaros é reduzida.

Tabela 2: Média e desvio padrão da densidade (ind/m² da serrapilheira) de GT (Grupos Taxonômicos) e GF (Grupos Funcionais) da mesofauna do solo, sendo: *Engenheiros da Serrapilheira*: Ácaro,Thysanoptera, Colêmbola, Psocoptera, Isopoda, Diplopoda, Blattaria, Larvas, Gastropoda; *Engenheiros do Solo*: Oligochaeta, Formiga, Coleoptera; *Predadores*: Pseudoescorpione, Aranae, Dermaptera, Chilopoda; *Outros:* Hemiptera, Diptera, nos 08 tipos de uso do solo, n=9: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), RAA (Restauração Ativa A), RAB (Restauração Ativa B), RAC (Restauração Ativa C), PAA (Pastagem Abandonada A), PAB (Pastagem Abandonada B), PAC (Pastagem Abandonada C), PUC (Pastagem de Uso Contínuo).

Tipo de Uso	**Riqueza**	**GF: ENGENHEIROS DA SERRAPILHEIRA**								
n=9	**GT**	**ÁCARO**	**THYSANOPTERA**	**COLEMBOLA**	**PSOCOPTERA**	**ISOPODA**	**DIPLOPODA**	**BLATTODEA**	**LARVAS**	**GASTROPODA**
FES	**17**	1596 (1243)	32 (42)	75 (66)	9 (16)	52 (132)	9 (12)	2 (5)	162 (130)	4 (7)
RAA	**15**	663 (496)	162 (130)	36 (101)	89 (94)	41 (51)	5 (8)	16 (18)	68 (44)	2(5)
RAB	**13**	1189 (1281)	240 (165)	48 (58)	34 (36)	0	2 (5)	2 (5)	66 (42)	5 (8)
RAC	**14**	366 (386)	153 (160)	9 (21)	34 (29)	2 (5)	5 (11)	4 (7)	52 (27)	0
PAA	**14**	658 (698)	21 (23)	12 (17)	5 (8)	28 (47)	0	0	20 (16)	2 (5)
PAB	**11**	1730 (1571)	165 (232)	130 (138)	14 (10)	108 (105)	0	0	50 (44)	0
PAC	**14**	1450 (835)	196 (134)	4 (7)	20 (26)	84 (118)	2 (5)	0	172 (256)	4 (7)
PUC	**08**	590 (525)	7 (8)	5 (11)	2 (5)	0	0	0	12 (21)	2 (5)

Tipo de Uso	**GF: ENGENHEIROS SOLO**			**GF: PREDADORES**				**GF: OUTROS**	
	FORMIGA	**COLEOPTERA**	**OLIGOCHAETA**	**ARANHA**	**PSEUDOESCORP**	**CHILOPODA**	**DERMAPTERA**	**DIPTERA**	**HEMIPTERA**
FES	133 (244)	155 (162)	4 (11)	20 (27)	25 (31)	7 (12)	0	50 (30)	7 (16)
RAA	350 (784)	32 (27)	0	12 (16)	0	0	2 (5)	135 (87)	25 (27)
RAB	67 (89)	14 (17)	0	9 (16)	0	0	0	50 (74)	32 (33)
RAC	121 (182)	5 (8)	0	11 (14)	0	0	2 (5)	100 (95)	14 (17)
PAA	12 (25)	14 (22)	4 (7)	2 (5)	0	2 (5)	0	39 (52)	5 (11)
PAB	151 (303)	43 (38)	2 (5)	0	0	0	0	103 (119)	5 (11)
PAC	30 (176)	48 (52)	0	4 (11)	0	0	4 (11)	66 (50)	11 (14)
PUC	0	4 (7)	0	0	0	0	0	73 (43)	0

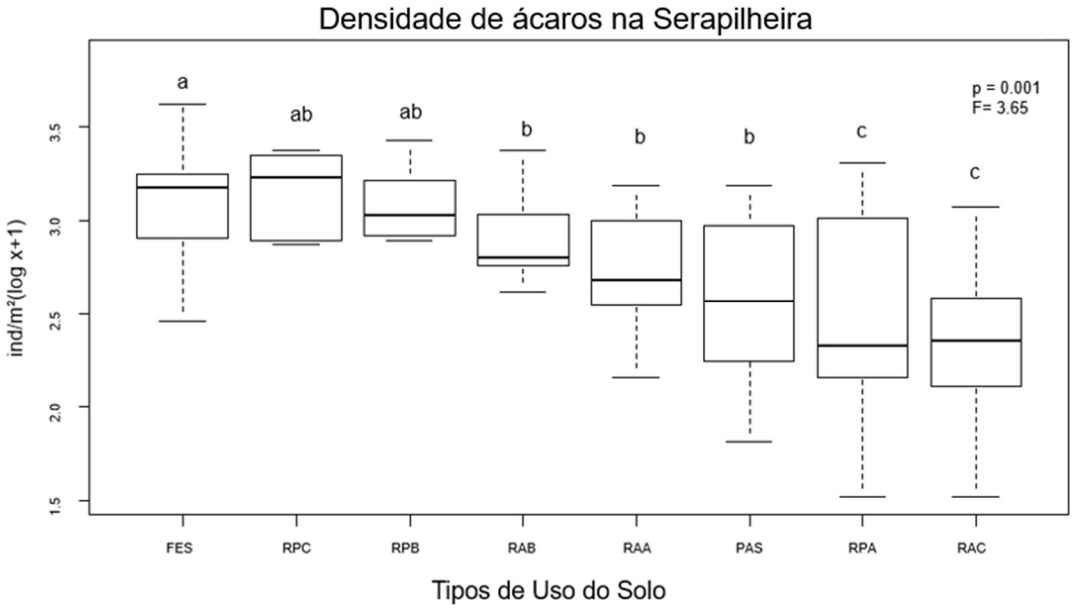


Figura 10: Densidade de ácaros na serrapilheira, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C).

Os ácaros e colêmbolas geralmente dominam em abundância e diversidade, sendo os ácaros mais diversos, com mais de 1.500 espécies conhecidas no Brasil (FLETSCHTMANN; MORAES, 1999). Os colêmbola são menos diversos que os ácaros (aprox. 270 espécies no Brasil; ABRANTES et al., 2010), e exercem importante função detritívora, contribuindo para a decomposição da matéria orgânica e o controle das populações, especialmente de fungos (MORAES; FRANKLIN, 2008).

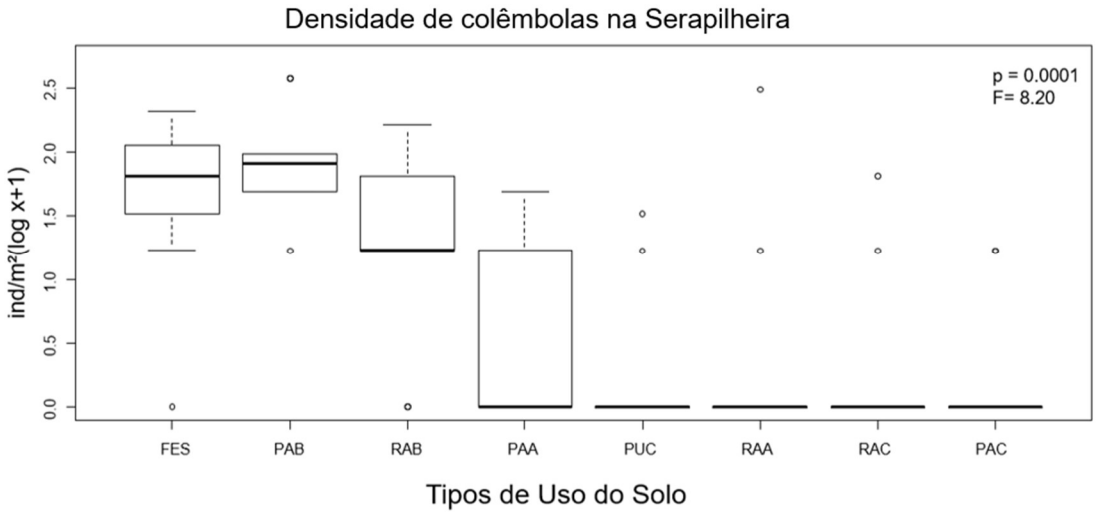


Figura 11: Densidade de colêmbolas na serrapilheira, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C). Letras iguais indicam que não há diferença significativa de acordo com teste Tukey.

Dados densidade (ind/m²) de colêmbolas na serrapilheira diferem estatisticamente entre os tipos de uso do solo (p=0.0001, F=8.20), na Figura 11. Nas áreas do Fragmento de Floresta (FES), Restauração Ativa B (RAB) e

Pastagem Abandonada B (PAB) encontramos densidade acentuada de colêmbolas diferindo significativamente do restante das áreas.

Os Psocopteras podem ser alados ou não, vivem sob folhas e material em decomposição, alimentam-se da microflora, são comuns na vegetação das áreas de Restauração Florestal (RAA, RAB e RAC) apresenta densidade de 83, 34 e 34 indivíduos por m² de serapilheira, juntamente com as áreas de Pastagem Abandonada (PAB e PAC) são significativamente diferentes da áreas de Floresta (FES), Pastagem Uso Contínuo (PUC) e da Pastagem Abandonada A (PAA).

Os Isopodas são tipos de crustáceos terrestres que gostam de condições úmidas, possuem apenas um par de antenas e o corpo convexo capaz de enrola-se formando uma bola, conhecidos também como tatuzinho. São organismos capazes de formar pequenos agregados do solo devido a sua atividade detritívora. Há baixa densidade de isopodas na FES, PUC, RAB, RAC enquanto que nas áreas de Pastagem Abandonada PAB e PAC sua presença é marcante com cerca de 124 e 84 ind/m².

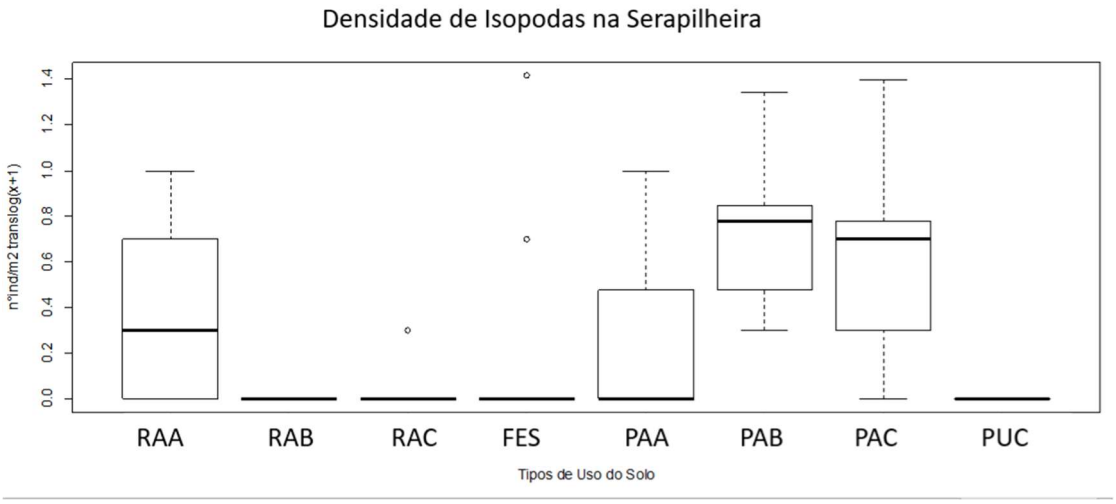


Figura 12: Densidade de colêmbolas na serrapilheira, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C).

Os Diplopodas são milipedes de grande ação detritívora vive especificamente nas áreas de floresta, associado a matéria orgânica em avançado estágio de decomposição, nas áreas estudadas a densidade média de diplopodas foi de 9 ind/m² na FES, na Restauração Ativa possui densidades de 5, 2 e 5 ind/m² respectivamente RAA, RAB e RAC. Ausente na Pastagem Abandonada e Pastagem Uso Contínuo (PUC). A ordem Blattodea corresponde as baratas do solo que são detritívoras e praticamente onívoras alimentam-se de qualquer matéria vegetal ou animal. Tem a parte anterior do tórax como um escudo que cobre sua cabeça, podem ser ápteras ou não, suas patas são longas e espinhosas se movimenta com facilidade sobre a serapilheira do solo. Sua presença foi registrada apenas nas áreas de restauração ativa: RAA (16 ind/m²), RAB (2 ind/m²), RAC (2 ind/m²) e FES (4 ind/m²). Ausente nas áreas de Pastagem Abandonada e Pastagem Uso Contínuo.

No grupo funcional dos Engenheiros do Solo ou engenheiros do ecossistema, destacam-se as formigas devido ao seu hábito de forrageamento sua presença é marcante neste compartimento. A maior densidade de formigas foi encontrada na área de Restauração Ativa A (RAA) com densidade média de 350 ind/m², seguida das áreas PAB, FES e RAC com densidade média de (151, 133 e 121 ind/m² respectivamente). A diferença entre os tipos de usos do solo

em relação a abundância de formigas é significativa, pois na serapilheira da Pastagem Uso Contínuo (PUC) e da PAA estes organismos estão praticamente ausentes.

Na serapilheira são comuns coleópteras de tamanho reduzido e corpo alongado como os Staphylinidae (predadores), no Fragmento de Floresta (FES) a densidade de coleópteras (155 ind/m²) é maior em relação a todos os outros tipos de usos do solo, na área de Pastagem Uso Contínuo (PUC) a presença de coleópteras na serapilheira é extremamente baixo (4 ind/m²).

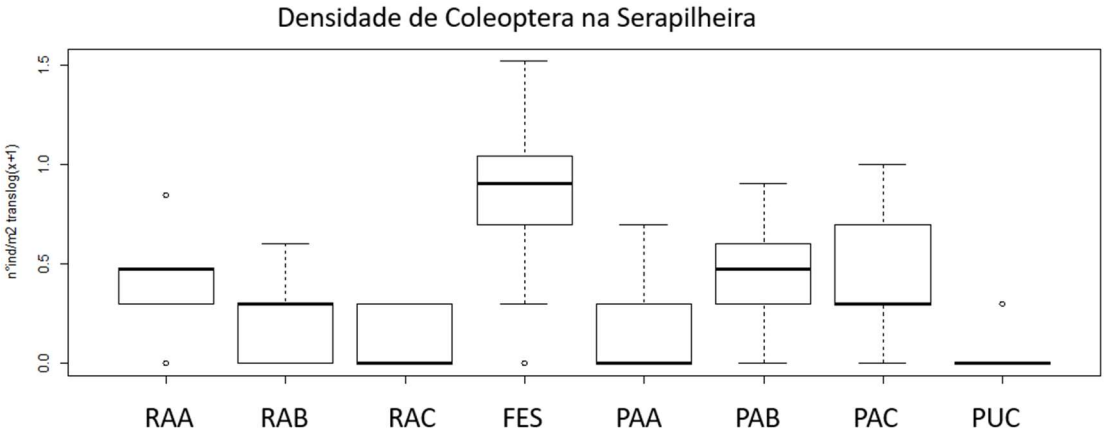


Figura 13: Densidade de colêmbolas na serapilheira, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C).

As aranhas são invertebrados predadores que estão presentes na serapilheira apenas com cobertura vegetal de espécies arbóreas (FES, RAA, RAB e RAA) e praticamente ausente nas áreas com de gramíneas tais como PUC, PAA, PAB e PAC, na Figura 14.

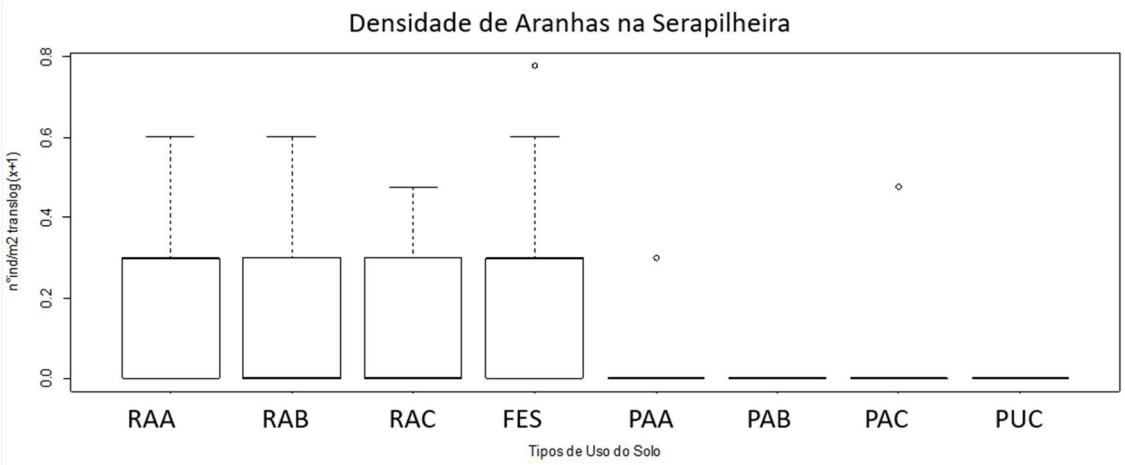


Figura 14: Densidade de aranhas na serapilheira, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C).

Os pseudoescorpiões, outro tipo de aracnídeo com hábito predador, cuja presença é indicativa de ambientes mais conservados, foram encontrados somente nas amostras de serapilheira do Fragmento Florestal (FES), alcançando a densidade média de 25 ind/m². Dermapteras e Chilopodas, também predadores apresentaram densidades muito baixas, na serapilheira de todos os tipos de uso do solo analisados.

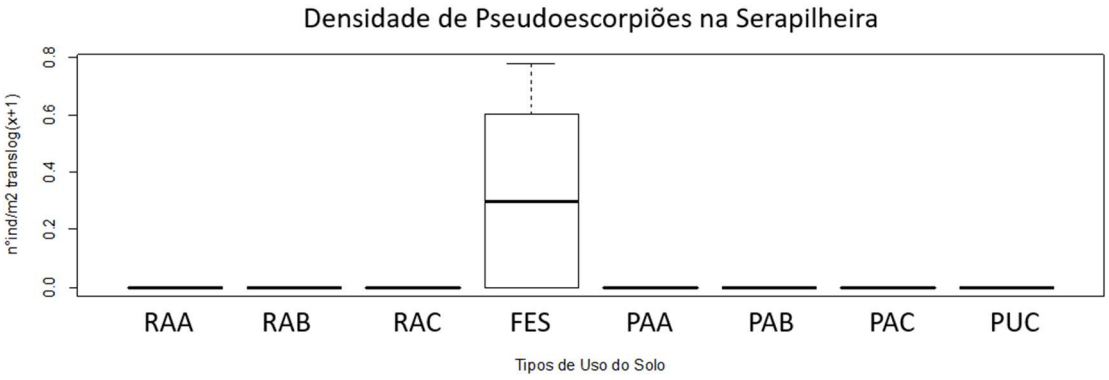


Figura 15: Densidade de pseudoescorpiões na serapilheira, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual), PUC (Pastagem Uso Contínuo); PAA (Pastagem Abandonada A); PAB (Pastagem Abandonada B); PAC (Pastagem Abandonada C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C).

A maior riqueza de Grupos Taxonômicos (GT) da mesofauna da serapilheira foi encontrada na área FES e a menor na área PUC, enquanto que nas áreas em processo de Restauração Ativa e Pastagem Abandonada a diversidade da mesofauna foi intermediária, visto que estes sistemas estão em desenvolvimento há 5 anos, em relação as áreas já consolidadas de floresta e de pastagem tomadas como referência da qualidade do solo local.

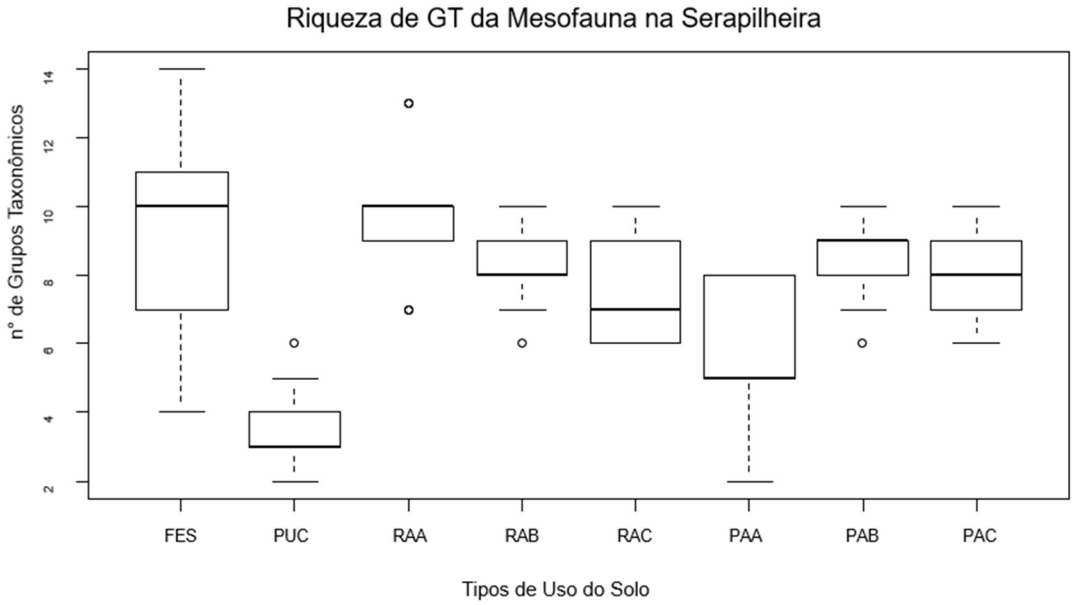


Figura 16: Riqueza de Grupos Taxonômicos da Mesofauna na Serapilheira, nos tipos de uso do solo: FES (Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual); PAS (Pastagem de uso contínuo); RPA (Restauração Passiva A); RPB (Restauração Passiva B); RPC (Restauração Passiva C); RAA (Restauração Ativa A); RAB (Restauração Ativa B); RAC (Restauração Ativa C).