

Universidade Federal de Pelotas – UFPel
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água



DISSERTAÇÃO

**FAUNA EDÁFICA E SUA RELAÇÃO COM OS ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS
DE UM SOLO CONSTRUÍDO, APÓS 14,6 ANOS DE REVEGETAÇÃO**

Maurício Silva de Oliveira

Pelotas, 2023

Maurício Silva de Oliveira

**FAUNA EDÁFICA E SUA RELAÇÃO COM OS ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS
DE UM SOLO CONSTRUÍDO, APÓS 14,6 ANOS DE REVEGETAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Lizete Stumpf

Coorientador: Prof. Dr. Pablo Miguel

Pelotas, 2023

O48f Oliveira, Mauricio Silva de

Fauna edáfica e sua relação com os atributos químicos e físicos de um solo construído, após 14,6 anos de revegetação / Mauricio Silva de Oliveira ; Lizete Stumpf, orientadora. — Pelotas, 2023.

48 f.

Dissertação (Mestrado) — Agronomia, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2023.

1. *Hermartria altíssima*. 2. *Cynodon dactylon*. 3. *Panicum maximum*. 4. *Urochloa humidicola*. 5. *Urochloa brizantha*. I. Stumpf, Lizete, orient. II. Miguel, Pablo. Título.

Maurício Silva de Oliveira

FAUNA EDÁFICA E SUA RELAÇÃO COM OS ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DE
UM SOLO CONSTRUÍDO, APÓS 14,6 ANOS DE REVEGETAÇÃO

Dissertação aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data de defesa: 10 de março de 2023

Banca examinadora:

Profª Drª Lizete Stumpf (Orientadora)

Doutora em Ciências/Solos - Universidade Federal de Pelotas

Drª Marília Alves Britto Pinto

Doutora em Ciências /Solos - Universidade Federal de Pelotas

Dr Ryan Noremberg Schubert

Doutor em Agronomia - Universidade Federal de Pelotas

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por me proporcionar saúde e perseverança para alcançar meus objetivos.

Aos professores por serem mestres no ensino, fundamental em toda a vida acadêmica.

Aos colegas que tornarem-se grandes amigos.

À Professora Lizete Stumpf por todo o suporte dado para que possibilitasse a realização do trabalho.

Ao Grupo de Pedologia, meus parceiros nesse período de mestrado. Tanto remotamente quanto presencialmente fomos mais do que colegas, mas amigos que levarei comigo pro resto da vida.

A todos os integrantes do PPG MACSA. Colegas, estagiários, professores e funcionários. Obrigada por toda a ajuda e ensinamentos durante esses 2 anos.

À Universidade Federal de Pelotas e ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, pela oportunidade de realização do curso.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

À Companhia Riograndense de Mineração (CRM) por disponibilizar a área para desenvolvimento do experimento.

À minha mulher e filhos por todo apoio e companheirismo.

À minha mãe pelo apoio e incentivo de sempre seguir em frente.

E a toda família pelo apoio incondicional.

RESUMO

A mineração de carvão a céu aberto gera impactos de grandes proporções ao ambiente, com modificações do ponto de vista físico, químico e biológico do solo, dificultando o novo solo construído, em curto prazo, em retomar ao estado de organização anterior à mineração. Nesse sentido, a fauna do solo pode ser utilizada para avaliar o status de recuperação de uma área degradada, pois existe uma relação direta entre os organismos do solo e sua qualidade ambiental, especialmente a mobilização de nutrientes e o melhoramento da estrutura do solo. Portanto, o objetivo do trabalho foi avaliar os atributos biológicos, químicos e físicos de um solo construído após 14,6 anos de revegetação com gramíneas perenes. O estudo foi realizado na área experimental da UFPel no interior da mina de carvão, que está localizada no município de Candiota/RS. O solo foi construído em 2003 e em setembro/outubro de 2007 as seguintes gramíneas perenes foram implantadas: *Hermartria altíssima*, *Cynodon dactylon*, *Panicum maximum*, *Urochloa humidicola* e *Urochloa brizantha*. Em 2022 foram realizadas as coletas de amostras na camada de 0-10 cm do solo construído para determinação da abundância e diversidade da fauna do solo, do carbono da biomassa microbiana, da respiração basal, do teor de carbono orgânico do solo e suas frações químicas, da densidade e porosidade do solo. A influência das gramíneas perenes na recuperação dos atributos do solo construído foi comparada com um solo controle. Após 14,6 anos de revegetação com gramíneas perenes, os atributos físicos do solo construído estão bem consolidados. Por outro lado, a relação positiva entre fauna, biomassa microbiana e teor de carbono orgânico do solo ainda está em um processo inicial, possivelmente devido ao tempo relativamente curto de recuperação da área minerada.

Palavras-chave: *Hermartria altíssima*, *Cynodon dactylon*, *Panicum maximum*, *Urochloa humidicola*, *Urochloa brizantha*.

ABSTRACT

Opencast coal mining generates large-scale impacts on the environment, with soil physical, chemical and biological modifications, making it difficult for the newly soil to return to its pre-mining state of organization in the short term. In this sense, soil fauna can be used to assess the recovery status of a degraded area, as there is a direct relationship between soil organisms and its environmental quality, especially the mobilization of nutrients and the improvement of soil structure. Therefore, the objective of this work was to evaluate the biological, chemical and physical attributes of a minesoil after 14.6 years of revegetation with perennial grasses. The study was carried out in the experimental area of UFPel inside the Candiota coal mine. The minesoil was constructed in 2003 and in September/October 2007 the following perennial grasses were implanted: *Hermartria altissima*, *Cynodon dactylon*, *Panicum maximum*, *Urochloa humidicola* and *Urochloa brizantha*. In 2022, soil samples were collected in the 0-10 cm layer of the minesoil to determine the fauna abundance and diversity, microbial biomass carbon, basal respiration, soil organic carbon content and its chemical fractions, soil density and porosity. The effect of perennial grasses on the minesoil attributes recovery was compared with a control soil. After 14,6 years of revegetation with perennial grasses, the minesoil physical attributes are well established. On the other hand, the positive relationship between fauna, microbial biomass and soil organic carbon content is still in an initial process, possibly due to the relatively short recovery time of the mined area.

Keywords: *Hermartria altíssima*, *Cynodon dactylon*, *Panicum maximum*, *Urochloa humidicola* , *Urochloa brizantha*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Croqui da área experimental com as gramíneas perenes implantadas em 2007.....	20
Figura 2. Chuva e temperaturas médias durante o período de amostragem dos organismos da fauna do solo, entre março e agosto de 2022, na mina de Candiota no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Estação do ano durante o período de amostragem: Março (verão), Maio (outono), agosto (inverno).....	21
Figura 3. Serrapilheira/liteira do solo construído revegetado com gramíneas perenes e no tratamento controle	21
Figura 4. Ácaro e Colêmbolo no solo construído após 14,6 anos de revegetação com gramíneas perenes.....	27
Figura 5. Abundância de colêmbolos na interface serapilheira/liteira-solo e no interior do solo construído sob revegetação de gramíneas perenes em diferentes estações do ano.....	29
Figura 6. Abundância de ácaros na interface serapilheira/liteira-solo e no interior do solo construído sob revegetação de gramíneas perenes em diferentes estações do ano	30
Figura 7. Índice de Diversidade de Shannon-Wierner dos organismos que habitam a interface serapilheira/liteira-solo e o interior do solo nas diferentes estações do ano	32
Figura 8. Índice de Equidade de Pielou dos organismos que habitam a interface serapilheira/liteira-solo e o interior do solo nas diferentes estações do ano.....	33
Figura 9. Densidade do solo, macroporosidade e carbono orgânico total de um solo construído aos 2 e 14,6 anos de revegetação com gramíneas perenes aos.....	37
Figura 10. Análise de componentes principais dos atributos do solo construído aos 14,6 anos de revegetação e sua relação com as diferentes espécies de gramíneas.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Umidade gravimétrica e espessura da serapilheira/liteira de um solo construído sob revegetação de gramíneas perenes e no tratamento controle, em diferentes estações do ano.....	22
Tabela 2. Abundancia e frequência relativa da fauna que habita a interface serapilheira/liteira-solo e o interior do solo construído sob revegetação com gramíneas perenes e tratamento controle.....	26
Tabela 3. Relação C/N do resíduo vegetal em decomposição na serrapilheira/liteira de um solo construído sob revegetação com gramíneas perenes e tratamento controle.....	27
Tabela 4. Carbono da biomassa microbiana (CBM), Respiração basal (RB), Coeficiente metabólico (qCO_2) e o pH de um solo construído sob revegetação com gramíneas perenes e suas diferenças em relação ao tratamento controle.....	34
Tabela 5. Densidade do solo, Macroporosidade , Microporosidade , Porosidade total e Carbono orgânico total de um solo construído sob revegetação com gramíneas perenes e suas diferenças em relação ao tratamento controle.....	36
Tabela 6. Teores de Carbono orgânico total (COT), Ácido Fúlvico (C-Fúlvico), Ácido Húmico (C-Húmico) e Humina (C-Humina) de um solo construído sob revegetação com gramíneas perenes e suas diferenças em relação ao tratamento controle.....	38

SUMÁRIO

1.	Introdução.....	11
2.	Objetivos.....	12
2.1	Objetivo geral.....	12
2.2	Objetivo específicos.....	12
3.	Revisão de literatura.....	13
3.1	Impactos da mineração de carvão no solo.....	13
3.2	Atributos do solo utilizados para avaliação da recuperação de áreas mineradas.....	15
3.3	Fauna edáfica e microbiologia como indicador de qualidade do solo.....	17
4.	Material e métodos.....	19
4.1	Caracterização da área de estudo.....	19
4.2	Amostragem do solo e análises.....	20
4.3	Análise estatística.....	25
5.	Resultados e Discussão.....	25
6.	Conclusão.....	40
7.	Referências Bibliográficas.....	41

1 Introdução

O carvão mineral é uma fonte de energia amplamente utilizada em todos os continentes, desempenhando um papel crucial na economia de várias nações, atendendo cerca de 30% da demanda global das atividades humanas. Segundo a Agência Internacional de energia (AIE, 2022) na China cerca de 60% da produção de energia primária é proveniente do carvão mineral. Já a matriz energética do Brasil tem aproximadamente 56% de fontes renováveis (hidráulica), enquanto que a queima do carvão mineral abrange somente 1,59% (ANEEL, 2023). No Brasil, o uso do carvão na matriz energética somente ocorre quando há redução das fontes energéticas renováveis, atrelada aos períodos de baixa precipitação pluvial. Apesar disso, a mineração de superfície na maior mina do Brasil (Mina de Candiota) já degradou 765,78 hectares (CRM, 2021). A degradação promovida pela mineração abrange a supressão da vegetação, do solo, das rochas para a retirada do carvão. Contudo, estas áreas são recuperadas através da recomposição topográfica, no qual a cava aberta para a retirada do carvão é preenchida pelas rochas e uma mistura de horizontes do solo, ambas retiradas anteriormente à mineração (PINTO et al., 2020). Do total de hectares degradados na Mina de Candiota, aproximadamente 640 hectares já foram recompostos topograficamente, e estão sob revegetação (CRM, 2021).

A revegetação de áreas afetadas pela mineração é um desafio ambiental pois é a partir do estabelecimento destas que se busca restaurar os ecossistemas impactados através da recuperação das funções ecossistêmicas do novo solo. Nesse contexto, as gramíneas têm sido amplamente estudadas e utilizadas como componentes fundamentais em programas de revegetação, devido às suas características adaptativas e benéficas para a recuperação do solo e da biodiversidade (MIGUEL, 2023; RIOS et al., 2023; SIQUEIRA-SILVA et al., 2019).

Uma das principais vantagens das gramíneas perenes é a sua habilidade de formar densos sistemas de raízes, o que auxilia na estabilização do solo, prevenindo a erosão e favorecendo a reestruturação da camada superficial do solo, essencial para o desenvolvimento de outras espécies vegetais. Além disso, as gramíneas perenes possuem alta tolerância a condições adversas, como solos pobres e alterações nos regimes de umidade, o que é comum em áreas de mineração de carvão. Outro aspecto importante é a capacidade das gramíneas perenes de melhorar a qualidade do solo através da ciclagem de nutrientes (KUMARI e MAITI, 2022).

Na Mina de Candiota, o uso da revegetação com gramíneas perenes já promoveu avanços na estrutura, densidade e porosidade do solo (MIGUEL et al., 2023; STUMPF et al., 2016), que são essenciais para o crescimento das plantas, a movimentação de água e nutrientes, a circulação de gases e a estabilidade do solo. Além disso, as gramíneas perenes também têm a capacidade de extrair e acumular nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e potássio, e quando sua biomassa vegetal é decomposta, os nutrientes são liberados no solo, promovendo a ciclagem de nutrientes e melhorando sua fertilidade, bem como contribuindo para o aumento da matéria orgânica do solo, fornecendo uma fonte de carbono essencial para diversos processos do solo (LEAL et al., 2016).

O impacto da revegetação na restauração física e química dos solos minerados é conhecido no Brasil e em outras partes do mundo. Contudo, o período em que ocorre o retorno da biologia do solo nestas áreas fortemente antropizadas, bem como o retorno de suas funções vitais na decomposição da matéria orgânica em suas mais diferentes frações e seu impacto na formação de agregados do solo, ainda necessita ser respondido. Portanto, monitorar todos os atributos do solo construído em diferentes períodos da revegetação, bem como analisar os resultados de forma sistêmica, é uma estratégia que pode auxiliar na compreensão do período necessário para a restauração ecológica das áreas mineradas.

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

Avaliar os atributos biológicos, químicos e físicos de um solo construído após 14,6 anos de revegetação com gramíneas perenes.

2.2 Objetivos específicos

Avaliar a abundância e a diversidade da fauna na camada de 0-10 cm de um solo construído e revegetado com diferentes gramíneas perenes.

Analisar o carbono da biomassa microbiana e a sua atividade na camada de 0-10 cm de um solo construído e revegetado com diferentes gramíneas perenes.

Determinar o conteúdo total e o fracionamento do carbono orgânico na camada de 0-10 cm de um solo construído e revegetado com diferentes gramíneas perenes.

Monitorar a evolução da densidade e a porosidade do solo na camada de 0-10 cm de um solo construído e revegetado com diferentes gramíneas perenes.

3 Revisão de literatura

3.1 Impactos da mineração de carvão no solo

Segundo Bitencourt (2015) a mineração de carvão a céu aberto gera impactos de grandes proporções ao ambiente, com modificações do ponto de vista físico, químico e biológico do solo, dificultando o novo solo, em curto prazo, em retomar ao estado de organização anterior à mineração. Os principais impactos ambientais são gerados a partir dos materiais estéreis depositados nas cavas durante a recomposição topográfica das áreas mineradas. Os estéreis geralmente são ricos em sulfetos de ferro, os quais, na presença do oxigênio da água e ação de bactérias, formam uma solução aquosa de ácido sulfúrico, em um processo chamado de drenagem ácida de mina (DAM), comprometendo a qualidade de águas superficiais e subterrâneas, solos e sedimentos, através da acidificação do ambiente e dissolução de metais pesados, o que pode dificultar o estabelecimento de plantas com potencial para a revegetação destas áreas degradadas. A Companhia Rio-grandense de Mineração (CRM), é a responsável pela extração de carvão na mina de Candiota, a céu aberto, pois o carvão se localiza em profundidades que variam de 10 a 25m da superfície do solo. O processo de extração ocorre na forma de lavra em faixas e a retirada das camadas sobrejacentes ao carvão é realizada por máquinas de grande porte (walking-dragline), o que provoca a mistura dos materiais nas pilhas de estéreis. Segundo Stumpf et al. (2016) para que se tenha um melhor entendimento de como a mineração a céu aberto é realizada e de como o solo é posteriormente construído, apresentam-se as principais etapas envolvidas neste processo: Remoção dos horizontes A, B, e/ou C do solo original, os quais são levados por caminhões para cobertura final de uma área topograficamente aplainada; Remoção das rochas (arenito, siltito e folhelhos) através de escavadeira de alta capacidade; Detonação e remoção dos bancos de carvão; Reposição dos estéreis ou spoils (mistura de rochas e carvão não aproveitados), os quais são aplainados por tratores de esteira na recomposição topográfica da área; Finalizando a recomposição topográfica, repõe-se uma camada de solo (horizonte A e/ou B) removida durante a etapa denominada de “terra vegetal” pelos técnicos da mineração, originando assim o “solo construído” ou antropogênico que é posteriormente vegetado.

Segundo Castro et al. (2015) a degradação é resultante principalmente da alteração da vegetação nativa e da fauna do solo, da remoção da camada fértil e da

qualidade e regime de vazão do sistema hídrico, os quais podem causar profundas mudanças no ecossistema, tornando-se praticamente inviável a exploração socioeconômica e ambiental da área. Um aspecto a ser destacado são os termos “recuperação”, “reabilitação” e “restauração”, comumente utilizados quando se discute a recuperação de áreas degradadas. A recuperação significa que o ambiente degradado retornará a uma forma e utilização de acordo com um plano pré-estabelecido para o uso do solo, implicando em uma condição em conformidade com os valores ambientais, estéticos e sociais da circunvizinhança, ou seja, o ambiente degradado terá condições mínimas de estabelecer um novo equilíbrio dinâmico, desenvolvendo um novo solo e uma nova paisagem.

Não somente ocorrem alterações químicas, mas também ocorrem alterações biológicas (MENDES FILHO, 2004), pois o solo ao ser removido do local de origem tem como consequência a redução dos teores de matéria orgânica, da biomassa microbiana e da biota edáfica. Por conseguinte, os solos que são construídos depois da mineração de carvão apresentam uma redução na decomposição e mineralização da matéria orgânica, na ciclagem de nutrientes, na produção de substâncias cimentantes (polissacarídeos) ou ligantes (hifas fúngicas) e na agregação do solo (RIGOTTI, 2002).

Outro fator de grande interesse no contexto ecofuncional de áreas degradadas pela mineração é o conhecimento das condições biológicas do solo (NÓBREGA *et al.*, 2004), uma vez que a diversidade e a atividade microbiana do solo constituem fatores importantes na sustentabilidade dos ecossistemas. A redução da comunidade biológica do solo pode acarretar não só a perda de importantes funções do solo e de espécies de microrganismos potenciais mitigadoras de efeitos degradativos do solo, mas também reduzir a capacidade dos sistemas naturais de superar as alterações neles impostas.

De acordo com Sheoran *et al.* (2010) além das alterações químicas e biológicas do solo em áreas impactadas pela mineração, ocorrem alterações físicas causadas pela retirada, movimentação, deposição e preparo do solo durante a recomposição topográfica da área minerada. A compactação é um dos principais problemas oriundos do processo de construção destes solos, devido ao tráfego intenso de máquinas (tratores, carregadores e transportadores) principalmente.

Para que se tenha um restabelecimento do equilíbrio ecológico do sistema pós mineração deve-se primeiramente passar pela revegetação destas áreas, a qual tem um papel importante na recuperação paisagística, no controle dos processos erosivos e na recuperação das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (SIQUEIRA *et*

al., 2008).

A presença da fauna edáfica nas áreas degradadas pode servir como um bioindicador da qualidade estrutural do solo, uma vez que o solo está sendo regenerado. Estes organismos são normalmente sensíveis à natureza da cobertura vegetal. Dessa forma, a biota edáfica é capaz de proporcionar melhorias na estruturação e estabilidade de agregados, na porosidade e conseqüentemente na aeração do solo, na retenção e disponibilidade de água e de nutrientes às plantas, auxiliando assim no estabelecimento e crescimento vegetal (MOREIRA; SIQUEIRA, HOLANDA NETO, 2015).

3.2 Atributos do solo utilizados para avaliação da recuperação de áreas mineradas

Segundo Freitas et al. (2017), o estudo das propriedades químicas do solo é capaz de possibilitar a compreensão de qual a fertilidade presente na área, permitindo observar possíveis modificações sofridas em função do manejo adotado na área. De acordo com Cardoso et al. (2013), o pH do solo, a capacidade de troca catiônica (CTC), a matéria orgânica e os níveis de nutrientes são os principais indicadores químicos utilizados na avaliação da qualidade do solo.

Segundo Bünemann et al. (2018), a matéria orgânica e o pH são dois indicadores químicos considerados de grande relevância para a qualidade do solo. A matéria orgânica auxilia na moldagem biológica, química e física do solo, por ser o reservatório de compostos orgânicos para os organismos edáficos, retém e disponibilizam nutrientes e água, e atua como agente cimentante na agregação do solo (VIDAL et al., 2021). Já a disponibilização de nutrientes está correlacionada com o pH, com destaque para o fósforo nas condições tropicais e subtropicais (CARDOSO et al., 2013).

Um único indicador não deve ser adotado nos estudos de qualidade do solo (MELLONI, 2007), sendo necessário considerar indicadores que incluam aspectos químicos, físicos e biológicos, pois, em conjunto, estes fatores são capazes de influenciar os processos bioquímicos no solo e suas variações no tempo e espaço. Como exemplo desta relação é possível mencionar o comportamento e composição da matéria orgânica do solo, a qual é capaz de explicar fatores de estabilização do solo (MACHADO et al., 2014).

Os atributos físicos mais utilizados para avaliar a qualidade dos solos são a densidade, taxa de infiltração de água, macro, micro e porosidade total, condutividade hidráulica e resistência à penetração (KAZMIERCZAK, 2018). Os indicadores físicos são utilizados na avaliação da qualidade do solo em função de estabelecerem relações fundamentais com os processos hidrológicos, tais como taxa de infiltração, escoamento superficial, drenagem e erosão. A análise dos atributos físicos em estudos de qualidade do solo é essencial, pois os mesmos estão intimamente relacionados com a dinâmica do solo. Como exemplo, os autores afirmam que a compactação do solo diminui a atividade biológica e a macroporosidade do solo, aumentando a sua densidade. Tais fatores em conjunto podem impedir o desenvolvimento radicular das plantas, sendo uma possível explicação da dificuldade de recuperação de áreas degradadas com solos compactados. Além disso, os atributos físicos são capazes de esclarecer os motivos pelos quais o solo possui problemas de permeabilidade e disponibilidade de nutrientes e água (FREITAS et al., 2017).

Como a matéria orgânica é a parte mais viva e mais ativa do solo e por atuar em importantes processos bioquímicos, estudos mostram que os indicadores biológicos são mais sensíveis que os indicadores químicos e físicos para detectar com mais antecedência alterações que ocorrem no solo em função do seu uso e manejo (STÖCKER et al., 2017).

Segundo Oliveira et al. (2016), a relação C/N, o tipo de cobertura vegetal, espécie, suas características fisiológicas e as condições de temperatura e umidade do meio, irão determinar não só a qualidade da matéria orgânica no solo existente, como também a qualidade e quantidade da população da microbiota.

Os organismos da fauna estão diretamente associados com a qualidade do solo. Juntamente com a microbiota, as populações da fauna são responsáveis pelos processos de decomposição, mineralização da matéria orgânica e pela regulação dos ciclos de nutrientes. Com a diminuição da abundância de organismos da fauna, há comprometimento, a médio e longo prazo, nos processos de decomposição e mineralização da matéria orgânica, afetando a qualidade e a saúde do solo (BOHN et al., 2010).

Segundo Mendes, Sousa e Reis Júnior (2015), os microrganismos são responsáveis diretos pelo funcionamento do solo, pois atuam nos processos de gênese, decomposição de resíduos orgânicos, ciclagem de nutrientes e biorremediação de áreas contaminadas por poluentes e agrotóxicos, o que justificam sua inclusão

como indicadores na avaliação da qualidade do solo. A utilização dos microorganismos como bioindicadores de qualidade do solo é importante para entender o estado do solo, como exemplos, citam-se biomassa microbiana, atividade microbiana, entre outros (YADA et al., 2015).

As transformações mediadas pela biomassa microbiana são catalisadas por enzimas, de modo que a quantificação de enzimas do solo indica alterações nos processos metabólicos e, aliada aos atributos biológicos, fornece indicativo do estágio de recuperação de áreas degradada (YADA et al., 2015). Além disso, a atividade enzimática do solo é responsável por auxiliar nos processos de ciclagem de nutrientes, e quando seu funcionamento está comprometido, os processos bioquímicos não ocorrem adequadamente, fazendo com que os ciclos biológicos fiquem comprometidos (NAVROSKI, 2016).

3.3 Fauna edáfica e microbiologia como indicador de qualidade do solo

Para ser bom indicador da qualidade do solo deve-se obedecer aos seguintes critérios: estar associado aos grandes processos do ecossistema; integrar propriedades físicas, químicas e biológicas; ser acessível a muitos usuários e aplicável a condições de campo; ser sensível a variações no manejo e no clima e quando possível, fazer parte dos bancos de dados. Deve ter, portanto, a capacidade de funcionar dentro do ecossistema visando sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde das plantas e animais (DORAN e PARKIN, 1994). Em solos com elevada biodiversidade e abundância habitados pela fauna, o húmus produzido é sempre de boa qualidade, melhorando a CTC do solo. Os animais ingerem a matéria orgânica, pré-digerindo, de modo que possa ser atacada diretamente por bactérias (PRIMAVESI, 2002). Portanto, a meso e macrofauna podem ser consideradas bons indicadores da qualidade e da sustentabilidade do uso do solo e devem ser consideradas como uma das ferramentas para orientar o planejamento e a avaliação das práticas de manejo a serem adotadas principalmente em áreas degradadas.

A influência do manejo do solo como indicador de qualidade e das alterações nos agroecossistemas sobre a atividade biológica apresenta, normalmente, uma resposta mais rápida do que em outros atributos pedológicos (BARETTA et al., 2003). Dessa maneira, o conhecimento das condições biológicas do solo em termos de recuperação é de grande interesse no contexto ecofuncional de áreas degradadas pela mineração (NOBREGA et al., 2004), uma vez que a diversidade e a atividade

microbiana do solo, junto a fauna edáfica, constituem fatores importantes na sustentabilidade dos ecossistemas.

Cada punhado de solo pode conter bilhões de organismos, representados por quase todas as espécies dos seres vivos (BRADY e WEIL, 2013). Esses organismos incorporam no solo os resíduos de plantas e animais e os digerem, fazendo com que o dióxido de carbono retorne para a atmosfera, onde pode ser reciclado através das plantas superiores. Simultaneamente, eles fornecem húmus, um constituinte orgânico de grande importância para conferir boas condições físicas e químicas ao solo. Quando estão digerindo os substratos orgânicos, os organismos liberam nutrientes essenciais às plantas em formas inorgânicas, que podem ser absorvidos pelas suas raízes ou, então, serem lixiviados do solo. Eles também medeiam as reações redox que influenciam as cores do solo, ciclagem de nutrientes e a produção de gases que contribuem para o aquecimento global. Segundo Sydow et al. (2007) as condições abióticas podem influenciar a composição e distribuição da fauna do solo tais como, temperatura, luminosidade, e umidade, que variam com as estações do ano (sazonalidade) e com diferentes tipos de habitats (campo e floresta). A sazonalidade pode influenciar os ciclos de vida dos organismos (latência de eventos como acasalamento, reprodução, postura dos ovos e dispersão de jovens) bem como a oferta de recursos que poderá influenciar temporariamente a estrutura da comunidade. A importância de grupos específicos de organismos do solo pode ser identificada pelo número de indivíduos no solo, pelo seu peso (biomassa) por unidade de volume ou área do solo e por sua atividade metabólica (geralmente medida como a quantidade de dióxido de carbono desprendido na respiração). As concentrações de atividade microbiana (focos) ocorrem nas imediações das raízes das plantas vivas, nos seus detritos em decomposição, no material orgânico que reveste os orifícios de minhocas, em pelotas fecais da fauna do solo e em outros ambientes mais favoráveis para os organismos do solo (BRADY e WEIL, 2013).

Segundo Urbanowski et al. (2021), que estudou diferentes espécies de ácaros em solos pós-mineração, há um aumento na riqueza das espécies no primeiro ano de decomposição da matéria orgânica destes solos, porém, ao longo dos anos, há uma tendência de diminuição desses valores. Além disso, percebeu que a riqueza das espécies é afetada pelo tipo de material orgânico (serapilheira), e não a sua quantidade depositada na superfície do solo.

A fauna edáfica é um excelente bioindicador da qualidade do solo, por serem organismos sensíveis às práticas de manejo, à natureza da cobertura vegetal e às variações sazonais (MELO et al., 2009). A fauna, em sua atividade trópica, inclui tanto o consumo de microrganismos da microfauna como também a fragmentação do material vegetal em decomposição (saprofagia), alterando a ciclagem de nutrientes, afetando a estrutura do solo, produzindo pelotas fecais, criando bioporos (MOREIRA et al., 2010).

Para avaliar impactos ocorridos, os atributos utilizados como indicadores de qualidade do solo devem ser comparados com os de solos sob condições naturais ou áreas pouco perturbadas limítrofes, ou outros solos denominados como controle. Esta comparação se justifica em função dos atributos biológicos não possuírem valores padronizados adotados para indicar a qualidade do solo, nem mesmo no que se refere a padrões específicos comumente utilizados para avaliar atributos químicos e físicos, os quais possuem valores que classificam a qualidade em função do tipo de solo e/ou cultura (ROCHA et al., 2015).

4 Material e métodos

4.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado na Mina de carvão de Candiota, sob concessão da Companhia Riograndense de Mineração (CRM), com as seguintes coordenadas geográficas: 31°33'56"S e 53°43'30"W. O solo foi construído no início de 2003, em delineamento de blocos ao acaso, com quatro repetições. A recomposição topográfica da área minerada foi feita com a reposição de ± 40 cm de topsoil sob o material estéril. Conforme Stumpf et al. (2016), o topsoil é procedente do horizonte B do solo natural da área pré-minerada, um Argissolo Vermelho Eutrófico típico, como indicado pela classe textural argilosa ($\pm 45\%$ argila), pela cor vermelho escura (2,5 YR 3,5/6) e pelo baixo teor de matéria orgânica (1,15%).

A recuperação vegetal da área foi feita com gramíneas perenes de verão, as quais foram implantadas em novembro/dezembro de 2007 em parcelas de 20 m² (5 x 4 m). As espécies vegetais usadas foram a *Hematria altissima*, o *Cynodon dactylon* cv. Tifton, o *Panicum maximum* cv. Tanzânia, a *Urochloa humidicola* e a *Urochloa brizantha* (Figura 1). Como tratamento controle utilizou-se uma área minerada recomposta topograficamente na mesma época da instalação do experimento, contudo, está sob revegetação de eucaliptos e gramíneas.

4.2 Amostragem do solo e análises

Em 3 de março (verão), 3 de junho (outono) e 24 de agosto (inverno) de 2022, organismos da fauna do solo e da interface serrapilheira/liteira-solo foram coletadas sob as diferentes gramíneas perenes e no tratamento controle.

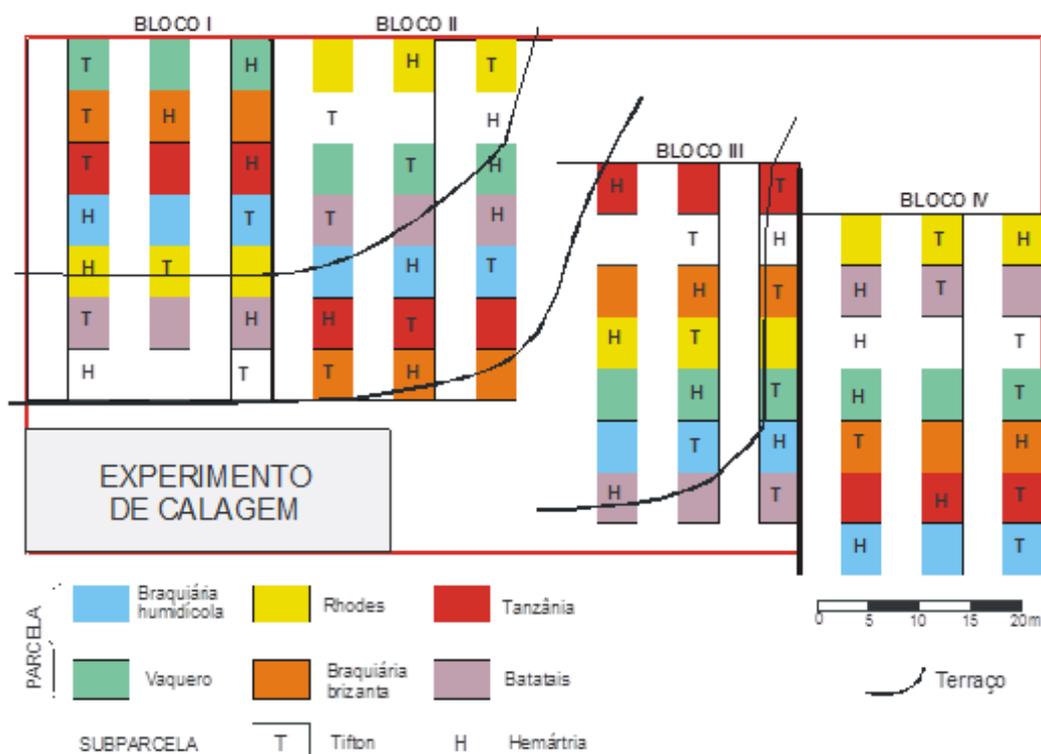


Figura 1. Croqui da área experimental com as gramíneas perenes implantadas em 2007.

As informações sobre a temperatura e a precipitação média nos meses que antecederam as coletas, foram retiradas de uma estação automática da Mina de Candiota. Destaca-se que no mês que antecedeu a coleta de março, a temperatura média ultrapassou 25°C, enquanto que no mês que antecedeu a coleta de junho, a temperatura média foi inferior a 15°C (com temperaturas mínimas negativas em alguns dias). No mês de agosto, a temperatura média também foi inferior a 15°C, contudo não houve mínima negativa nos dias que antecederam a coleta. A precipitação média que antecedeu a coleta de março foi aproximadamente de 80 mm, enquanto que no mês que antecedeu a coleta de junho foi aproximadamente de 100 mm. No mês de agosto o acumulado da precipitação que antecedeu a coleta (24 de agosto) foi de 122 mm (Figura 2).

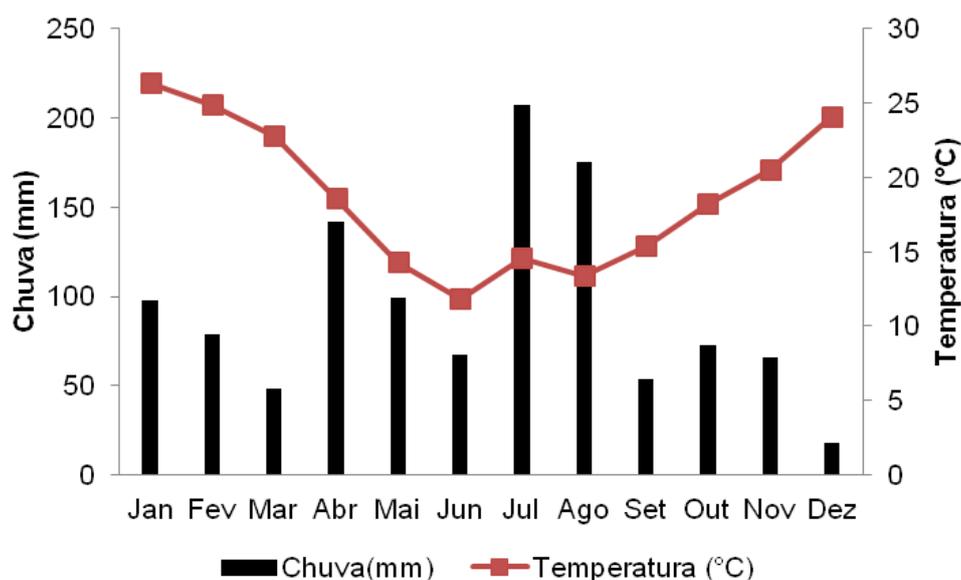


Figura 2. Chuva e temperaturas médias durante o período de amostragem dos organismos da fauna do solo, entre março e agosto de 2022, na mina de Candiota no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Estação do ano durante o período de amostragem: Março (verão), Maio (outono), agosto (inverno).

A umidade gravimétrica e a espessura da serrapilheira/liteira do solo sob revegetação das diferentes gramíneas e no tratamento controle (Figura 3), nas diferentes estações do ano, estão apresentadas na Tabela 1.

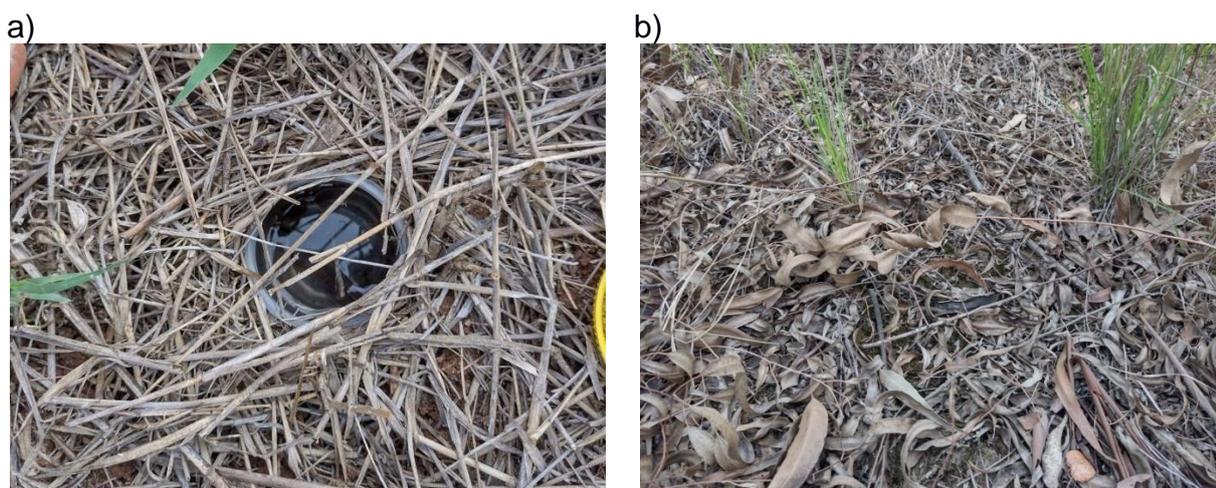


Figura 3. Serrapilheira/liteira do solo construído revegetado com gramíneas perenes (a) e no tratamento controle (b).

A relação C/N dos resíduos vegetais em decomposição na interface

serrapilheira/liteira-solo foi quantificada por oxidação via seca em um Analisador Elementar modelo Flash EA 1112 Thermo Finnigan.

Tabela 1. Umidade gravimétrica e espessura da serrapilheira/liteira de um solo construído sob revegetação de gramíneas perenes e no tratamento controle, em diferentes estações do ano.

Tratamentos	VERÃO	OUTONO	INVERNO
	----- Umidade gravimétrica (%) -----		
<i>Hematria altíssima</i>	23,8	24,5	22,4
<i>Cynodon dactylon</i>	23,1	26,9	23,7
<i>Panicum maximum</i>	19,8	27,5	26,1
<i>Urochloa humidicola</i>	22,4	28,2	24,0
<i>Urochloa brizantha</i>	25,6	25,4	25,6
Controle	16,5	23,8	20,1
	----- Espessura da serrapilheira/liteira (cm) -----		
<i>Hematria altíssima</i>	15,4	13,2	14,3
<i>Cynodon dactylon</i>	8,2	7,6	10,4
<i>Panicum maximum</i>	4,1	5,6	6,2
<i>Urochloa humidicola</i>	10,9	9,2	8,7
<i>Urochloa brizantha</i>	8,8	7,8	7,3
Controle	4,2	6,1	3,8

Para a captura da fauna que habita a interface serrapilheira/liteira-solo foram instaladas duas armadilhas de queda de trefzel na camada de 0-10 cm do solo construído, em cada uma das parcelas da área experimental, totalizando em 40 armadilhas (4 blocos x 5 gramíneas perenes x 2 armadilhas por parcela), as quais permaneceram no campo por um período de 7 dias.

Para a determinação da fauna que habita o interior do solo construído foram coletadas 40 amostras de solo (4 blocos x 5 gramíneas perenes x 2 amostras por parcela), utilizando cilindros de aço (169,4 cm³). No laboratório, utilizou-se o método do Funil Extrator de Tullgren (Bachelier, 1978), no qual cada uma das 40 amostras foram colocadas cuidadosamente em peneiras com malha de 2 mm na parte superior de cada funil. Em seguida, lâmpadas de 40 watts foram ligadas sob as amostras de solo por um período de 48 horas. A ação da luz e do calor, faz com que os organismos fujam, e assim sejam capturados pelo copo coletor com álcool 70%, instalado na base dos funis.

No tratamento controle foram instaladas armadilhas de queda e coletadas amostras de solo em 3 pontos equidistantes (em torno de 5 metros), totalizando 6 amostras.

Os organismos de ambos os métodos foram quantificados, classificados (Gallo et al., 1988) e fotografados com auxílio de um estereomicroscópio trinocular, modelo

STEMI 305 da marca CARL ZEISS.

Para o cálculo da abundância e frequência relativa da fauna que habita a interface serrapilheira/liteira-solo e o interior do solo construído foram somados os indivíduos observados em cada uma das estações. Para cada período de amostragem (verão-outono-inverno) e para cada método de coleta, calculou-se os índices de diversidade de Shannon-Wiener (H') e equidade de Pielou (J), pelo software DivEs – Diversidade de Espécies®, 2018 – 2021, versão 4.17.

O índice H' foi obtido pela fórmula $H' = -\sum P_i \log P_i$, onde P_i é a proporção do grupo dentro da amostra, obtida pela fórmula $P_i = n_j/N$, onde n_j é a quantidade de organismos de cada espécie e N é a abundância das amostras. O índice de Shannon-Wiener varia de 0 a 5 e quanto maior o valor, maior será a riqueza de espécies. Por outro lado, a redução desse valor resulta da maior dominância de alguns grupos, em detrimento de outros. O índice J foi obtido pela fórmula $J = H'/\log S$, onde o H' é o índice de diversidade de Shannon-Wiener e o S é o total de grupos observados. Este índice varia de 0 a 1 e tem seus valores diretamente relacionados à dominância de grupos, ou seja, quanto menor o valor, maior será a dominância por poucos grupos (Góes et al. 2021). O número de indivíduos dos principais grupos da fauna do solo (ácaros e colêmbolos), em cada estação climática, também foi apresentado.

Em março de 2022 foram coletadas amostras, utilizando pá de corte, na camada de 0-10 cm do solo construído sob diferentes gramíneas e no tratamento controle, para a determinação do carbono da biomassa microbiana (CBM), da respiração basal (RB), do teor de carbono orgânico total (COT) e suas frações (ácidos Fúlvico e Húmico e Humina), e do pH do solo em água.

As amostras de solo para CBM e RB foram preservadas em temperatura de refrigeração (4°C). Para análise do CBM foram pesadas 32g de solo úmido, em duplicata, onde uma repetição foi submetida à irradiação em forno de microondas e a outra não, segundo metodologia proposta por Ferreira et al. (1999). A extração foi realizada com sulfato de potássio (K_2SO_4) e as amostras foram tituladas com solução $(NH_4)_2 Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ e seu valor foi estimado a partir da Equação 1:

$$CBM \text{ (mg C microbiano kg}^{-1} \text{ de solo)} = C_i - C_{ni} / kC$$

Equação 1

Onde: Ci = Carbono encontrado na amostra irradiada; Cni = Carbono encontrado na amostra não irradiada; kC = Constante de mineralização do carbono (0,33) proposto por Sparling e West (1988).

Seguindo a metodologia descrita por Anderson e Domsch (1978) foi avaliada a atividade microbiana através da medição da RB. Para isto utilizou-se 100g de solo fresco, com umidade conhecida, e adicionou-se 20 mL de NaOH em frascos hermeticamente fechados. Após 21 dias a solução foi retirada para titulação com HCl. Seu resultado foi obtido a partir da Equação 2:

$$RB \text{ (mg de C - CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ de solo h}^{-1}) = ((Vb-Va) \times M \times 6 \times 1000 \text{ Ps}) / T \quad \text{Equação 2}$$

Onde: VB = volume de HCl gasto com a prova em branco; VA = volume de HCl gasto nas amostras; M = concentração de HCl (1 molar); Ps = massa de solo seco; T = tempo de incubação em horas.

Com os valores de CMB e RB foi calculado o coeficiente metabólico (qCO_2) na Equação 3, seguindo Anderson e Domsch (1993):

$$qCO_2 \text{ (mg C - CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ CMB - C h}^{-1}) = RB / CMB \quad \text{Equação 3}$$

O pH do solo foi determinado em água na relação 1:1 (solo:água) e o teor de COT foi determinado pelo método de combustão Walkley-Black, seguindo a metodologia de Tedesco et al. (1995). Para o fracionamento químico da matéria orgânica do solo foi utilizada a metodologia de Benites et al. (2003), no qual utilizou-se 1 g de solo e adicionou-se 20mL de NaOH 0,1mol L⁻¹ para separar os extratos das frações. Essa separação ocorre pela diferença de solubilidade e alcalinidade dos componentes da matéria orgânica do solo. Após a separação das alíquotas, os extratos para determinação dos ácidos Fúlvicos e Húmicos foram titulados com sulfato ferroso amoniacal 0,0125 mol L⁻¹, enquanto que para determinação da Humina fez-se a titulação com sulfato ferroso amoniacal 0,0125 mol L⁻¹.

Em março de 2022 foram coletadas 40 amostras de solo (4 blocos x 5 gramíneas perenes x 2 amostras por parcela), utilizando cilindros de aço (86,70 cm³), na camada de 0-10 cm para a determinação da densidade e porosidade do solo. No laboratório, as amostras foram saturadas em água por capilaridade durante 24h, e em seguida, colocadas em uma mesa de tensão, onde foram equilibradas a uma tensão

de 6kPa, para determinação da macroporosidade (Ma). Após equilíbrio, as amostras foram secas em estufa a 105°C até o peso constante para determinação da microporosidade (Mi) e da densidade do solo (Ds). A porosidade total (Pt) foi calculada pela soma da macroporosidade e microporosidade (TEIXEIRA et al.,2017).

4.3 Análise estatística

Como o tratamento controle não faz parte do delineamento experimental, não se aplicou procedimentos estatísticos em relação aos tratamentos com gramíneas perenes. Contudo, diferenças percentuais entre as variáveis biológicas, químicas e físicas foram consideradas.

A evolução da densidade, da macroporosidade e do teor de carbono orgânico do solo construído obtidas em 2022, com 14,6 anos de revegetação, foi comparada aos resultados obtidos em 2009, quando o solo construído estava com 2 anos de revegetação (STUMPF et al., 2014), através do Teste t pareado ($p < 0,05$).

A análise de componentes principais foi aplicada para avaliar a relação entre os atributos biológicos, químicos e físicos do solo construído, amostrados em março de 2022, e as gramíneas perenes usando o software estatístico PAST4.03 (PALEONTOLOGICAL STATISTICS) (2001).

5 Resultados e Discussão

Ao longo das estações foram quantificados 13.226 organismos da fauna do solo distribuídos em 9 grupos taxonômicos. Deste total, foram observados sob a *Hematria altíssima*, *Cynodon dactylon*, *Panicum maximum*, *Urochloa humidicola* e *Urochloa brizantha*, respectivamente 832, 868, 596, 857 e 1166 organismos que habitavam a interface serapilheira/liteira-solo, enquanto que os organismos que habitavam o interior do solo totalizaram, respectivamente 1305, 1945, 1608, 1652 e 2397 organismos (Tabela 2).

Nos grupos Colembolla, Arachnida, Coleoptora e Hymenoptera, o número de indivíduos foi maior na interface serapilheira/liteira-solo, enquanto que nos grupos taxonômicos Acari, Diptera, Diplura e Enchytraeidae, o número de indivíduos foi maior no interior do solo, sob a revegetação da maioria das gramíneas. No tratamento controle, o número de indivíduos nos grupos Colembolla, Arachnida, Coleoptora, Diptera, Hymenoptera e Enchytraeidae foi maior na interface serapilheira-solo (Tabela 2).

Tabela 2. Abundância (n° de indivíduos) e frequência relativa (%) da fauna que habita a interface serrapilheira-solo e o interior do solo construído sob revegetação com gramíneas perenes e no tratamento controle.

	<i>Hematria altíssima</i>	<i>Cynodon dactylon</i>	<i>Panicum maximum</i>	<i>Urochloa humidicola</i>	<i>Urochloa brizantha</i>	Controle
N° de indivíduos que habitam a interface serrapilheira/liteira-solo						
Acari	285(34,2%)	349(40,2%)	239 (40,1%)	325(37,9%)	577 (50%)	81 (15%)
Colembolla	352(42,3%)	345(39,8%)	217 (36,4%)	375(43,8%)	446 (38,2%)	132 (24,5%)
Arachnida	25 (3%)	15 (1,8%)	20 (3,4%)	14 (1,7%)	3 (2%)	21 (3,9%)
Coleoptera	36 (4,3%)	14 (1,6%)	13 (2,2%)	14 (1,6%)	20 (1,7%)	188 (34,9%)
Diptera	4 (0,5%)	6 (0,7%)	4 (0,7%)	9 (1%)	12 (1%)	9 (1,7%)
Diplura	8 (1%)	4 (0,5%)	4 (0,7%)	4 (0,5%)	4 (0,3%)	1 (0,2%)
Hymenoptera	117(14,1%)	126(14,5%)	95 (16%)	108(12,5%)	80 (6,8%)	-
Enchytraeidae	-	-	-	1 (0,1%)	1 (0,9%)	95 (17,6%)
Outros	5 (0,6%)	9 (1%)	4 (0,7%)	7 (0,8%)	3 (0,3%)	12 (2,2%)
N° de indivíduos que habitam o interior do solo						
Acari	1018 (78%)	1471 (76%)	1322 (82%)	1305 (79%)	2030 (85%)	385 (80%)
Colembolla	169 (13%)	333 (17%)	176 (11%)	252 (15%)	210 (9%)	64 (13,3%)
Arachnida	1 (0,1%)	9 (0,5%)	2 (0,1%)	4 (0,3%)	6 (0,3%)	-
Coleoptera	1 (0,1%)	5 (0,3%)	-	1 (0,6%)	15 (0,6%)	3 (0,6%)
Diptera	5 (0,4%)	5 (0,3%)	13 (0,8%)	8 (0,5%)	37 (1,5%)	-
Diplura	7 (0,5%)	40 (2%)	8 (0,5%)	15 (0,9%)	21 (0,9%)	2 (0,4%)
Hymenoptera	79 (6,1%)	65 (3,3%)	53 (3,2%)	54 (3,2%)	49 (2%)	18 (3,7%)
Enchytraeidae	6 (0,5%)	2 (0,1%)	11 (0,7%)	2 (0,1%)	13 (0,5%)	2 (0,4%)
Outros	19 (1,5%)	15 (0,8%)	20 (1,2%)	11 (0,7%)	16 (0,7%)	9 (1,9%)

(%) Frequência relativa de cada grupo de organismos do solo construído com gramíneas perenes e o tratamento controle.

O superior número de indivíduos do Grupo Enchytraeidae no tratamento controle (97 = 95 na interface serapilheira/liteira-solo e 2 no interior do solo) em relação ao solo construído sob as diferentes gramíneas (36 = 2 na interface serapilheira/liteira-solo e 34 no interior do solo) pode ser devido a quantidade e qualidade dos resíduos vegetais sobre a superfície do solo. Nesse sentido, Frouz et al. (2013) avaliaram o efeito da revegetação sob os organismos da fauna do solo em diferentes áreas mineradas na República Checa, e observaram que as espécies vegetais (arbóreas) que produziram serapilheira com uma relação C/N mais baixa sustentaram populações maiores de organismos da fauna, os quais removeram mais serrapilheira e incorporaram ao solo. No presente estudo, apesar do solo construído revegetado por gramíneas perenes

apresentar, em média, quase o dobro de serrapilheira/liteira em relação ao controle (Tabela 1), a relação C/N dos resíduos foi, para a maioria das espécies, muito superior. Isto é, enquanto no solo sob revegetação com gramíneas a relação C/N variou de 40 a 66:1, no tratamento controle esta relação foi de 34,7:1 (Tabela 3).

Importante destacar a menor relação C/N dos resíduos da *Urochloa brizantha* (32,5:1 - Tabela 3), o que pode ter favorecido a maior presença da população de ácaros e colêmbolos no solo construído em relação às demais espécies de gramíneas perenes (Tabela 2).

Tabela 3. Relação C/N do resíduo vegetal em decomposição na serrapilheira/liteira de um solo construído sob revegetação com gramíneas perenes e tratamento controle.

Tratamentos	%N	%C	Relação C/N
<i>Hematria altissima</i>	0,65	42,9	66,0
<i>Cynodon dactylon</i>	0,72	41,05	57,0
<i>Panicum maximum</i>	0,93	37,43	40,2
<i>Urochloa humidicola</i>	0,98	43,6	44,5
<i>Urochloa brizantha</i>	1,21	39,36	32,5
Controle	1,13	39,18	34,7

Os grupos taxonômicos Acari e Collembola se destacaram como os principais organismos da fauna edáfica do solo construído (Figura 4a-b), independente da revegetação adotada (Tabela 2). Este resultado corrobora com o estudo de Fernandez et al. (2023), que observaram em um solo construído com aproximadamente 2 décadas de revegetação, que os ácaros abrangiam até 79% e os colêmbolos até 34% da frequência relativa da fauna que habitava o interior do solo.

a)



b)



Figura 4. Ácaro (a) e Colêmbolo (b) no solo construído após 14,6 anos de revegetação com gramíneas perenes.

No estudo atual, da abundância total de ácaros, 76 a 85% habitavam o interior do solo, enquanto que 15 a 50% habitavam a interface serrapilheira/liteira-solo. Por outro lado, 24,5 a 43,8% da população de colêmbolos foi observada na interface serrapilheira/liteira-solo, enquanto que no interior do solo esta população variou de 9 a 17% (Tabela 2).

Utilizar a população de colêmbolos como um bioindicador da qualidade de solos, degradados ou não, é um desafio, conforme aponta Potapov et al. (2023), pois estes organismos são altamente abundantes desde as regiões polares (não habitadas) até paisagens modificadas pelo homem, como solos agrícolas e áreas urbanas de zonas tropicais ou temperadas. Além disso, a presença destes organismos no solo se deve a vários fatores, como o seu envolvimento na ciclagem de nutrientes, na predação de fungos patogênicos e/ou no apoio a predadores artrópodes. Zagatto et al. (2019) atribui a maior abundância de colêmbolos devido a dependência destes organismos à umidade do solo. De qualquer forma, os colêmbolos apresentam, em geral, baixa abundância em ecossistemas tropicais (o que não implica em baixa diversidade) quando a camada de serrapilheira é rasa (POTAPOV et al., 2023). Nesse sentido, um dos fatores que pode ter favorecido a maior população de colêmbolos no solo construído sob a revegetação com gramíneas foi a maior espessura de serrapilheira/liteira observada (em média, aproximadamente 9 cm) em relação ao controle (em média, aproximadamente 5 cm) (Tabela 1).

Além de todas as considerações acima, os colêmbolos são sensíveis às estações do ano (ZAGATTO et al., 2019). Nesse sentido, a maior abundância de colêmbolos na interface serrapilheira/liteira-solo foi observada no inverno, com destaque para a revegetação com *Urochloa brizantha* e com *Urochloa humidicola*, ambas com mais de 300 indivíduos. No verão, a população de colêmbolos foi similar entre as gramíneas, variando entre 40 e 110 indivíduos (Figura 5 a). A população de colêmbolos que habitam o interior do solo construído foi similar no inverno e verão, independente da revegetação, oscilando entre 57 e 200 indivíduos (Figura 5 b). O outono foi a estação do ano em que foi observado o menor número de colêmbolos, independente da revegetação, com número de indivíduos <10, tanto na interface serrapilheira-solo como no interior do solo (Figura 5 a-b).

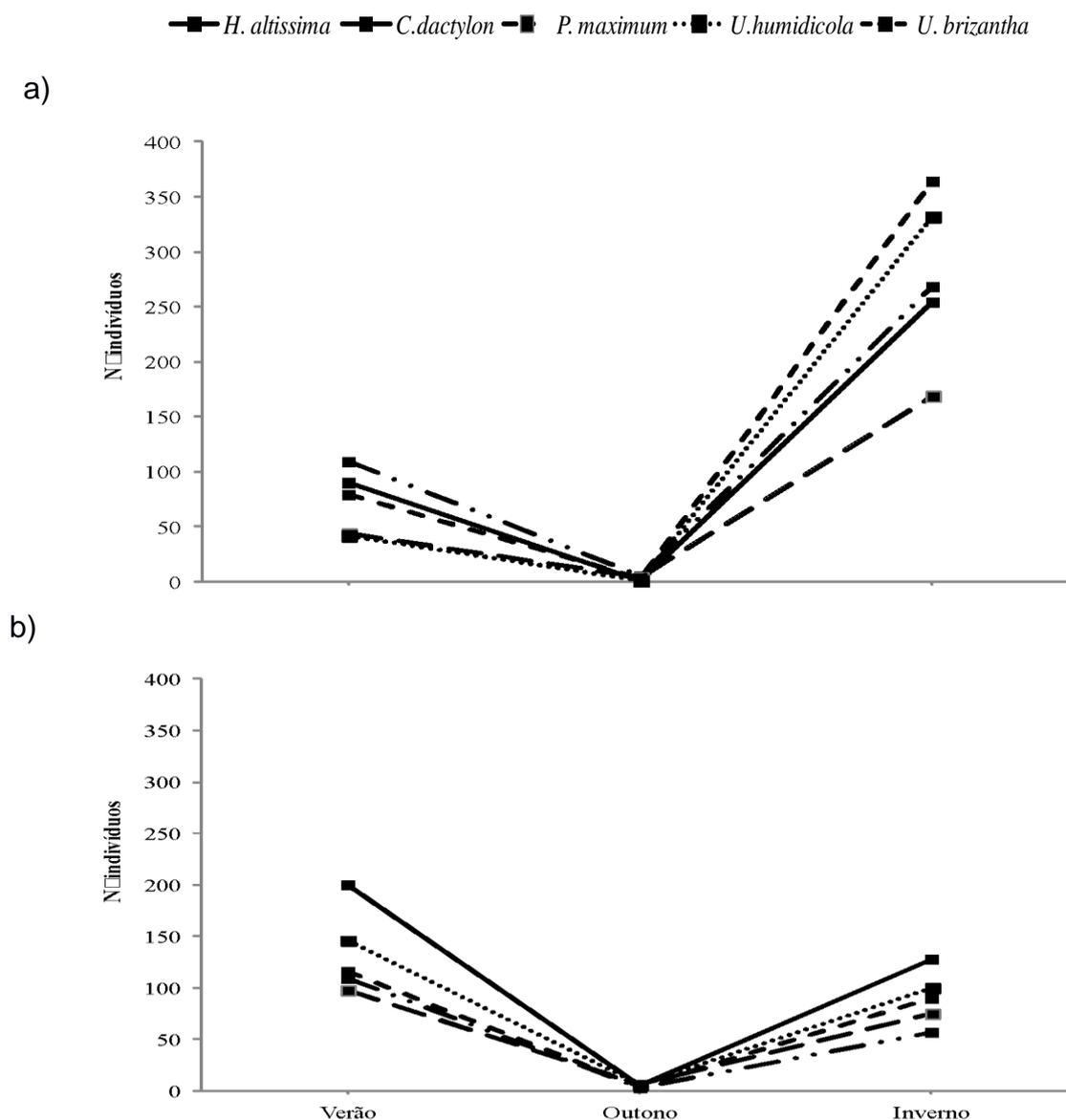


Figura 5. Abundância de colêmbolos na interface serapilheira/liteira-solo (a) e no interior do solo construído (b) sob revegetação de gramíneas perenes em diferentes estações do ano.

A maior abundância de ácaros foi observada no verão, independente da metodologia de captura. Contudo, vale destacar que estes são organismos que habitam preferencialmente o interior do solo (ZAGATTO et al., 2019), influenciados principalmente pela cobertura vegetal, pH e umidade do solo, e teor de metais pesados (MANU et al., 2019; FROUZ et al., 2018). Nesse sentido, no verão, a abundância de ácaros na interface serrapilheira/liteira-solo não ultrapassou 450 indivíduos (Figura 6 a), enquanto que no interior do solo foram observados entre 600 e 1400 indivíduos (Figura 6 b). Nessa estação, destaca-se a revegetação com *Urochloa brizantha*, onde foram

encontrados na interface serrapilheira/liteira-solo mais de 400 indivíduos, enquanto que no interior do solo o número de indivíduos ultrapassou 1300 indivíduos (Figura 6 a-b).

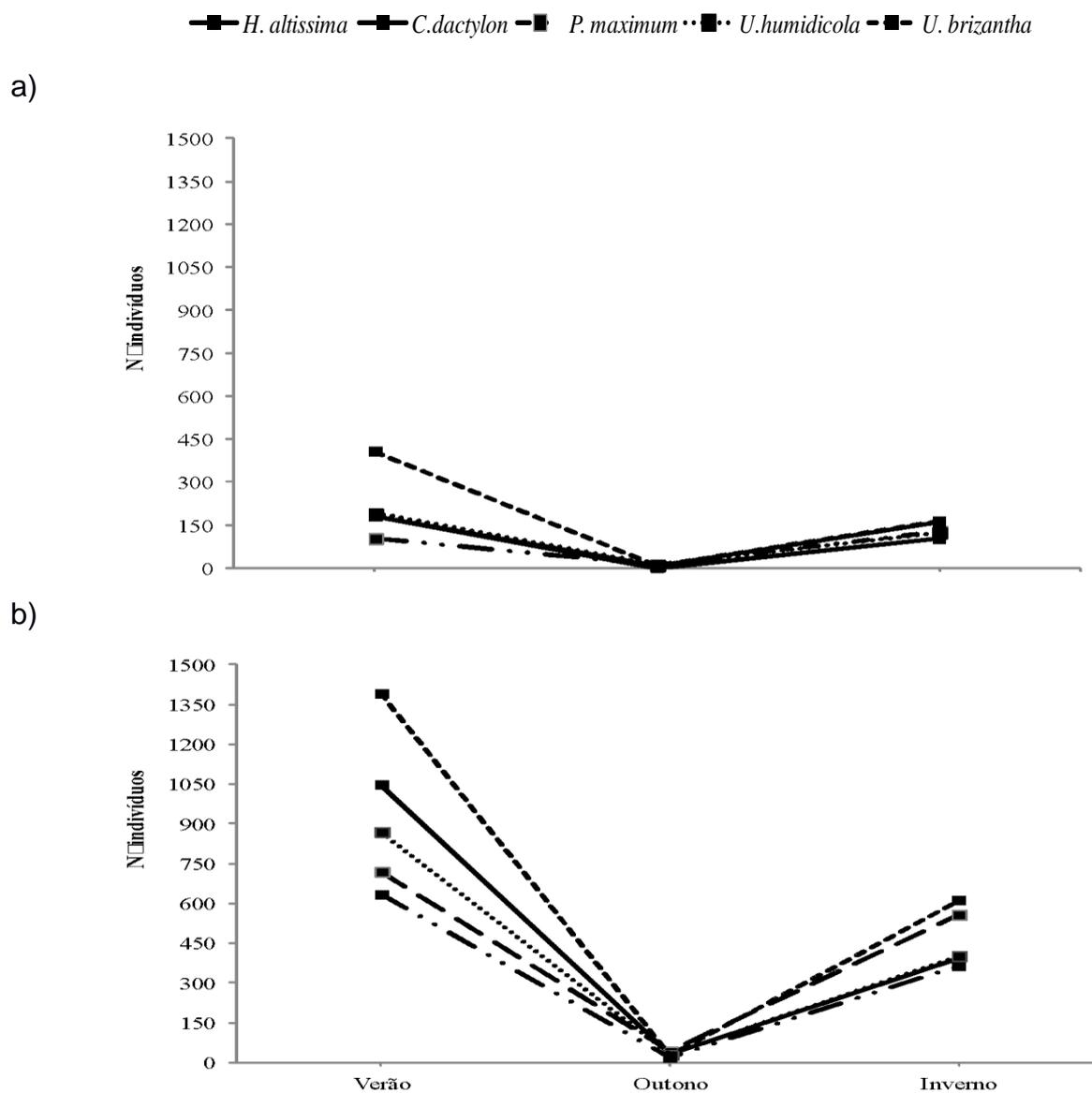


Figura 6. Abundância de ácaros na interface serrapilheira/liteira-solo (a) e no interior do solo construído (b) sob revegetação de gramíneas perenes em diferentes estações do ano.

O outono foi a estação do ano em que foi observado o menor número de ácaros, independente da revegetação, com número de indivíduos <15 na interface serrapilheira/liteira-solo e <45 no interior do solo. No inverno foram capturados na interface serrapilheira/liteira-solo entre 100 e 170 ácaros, independente da revegetação. Entretanto, um maior número de ácaros capturados no interior do solo

ocorreu sob a revegetação com a *Urochloa brizantha* e o *Panicum maximum* (em torno de 600 indivíduos), enquanto que nos demais tratamentos o número de ácaros ficou em torno de 400 indivíduos (Figura 6 a-b).

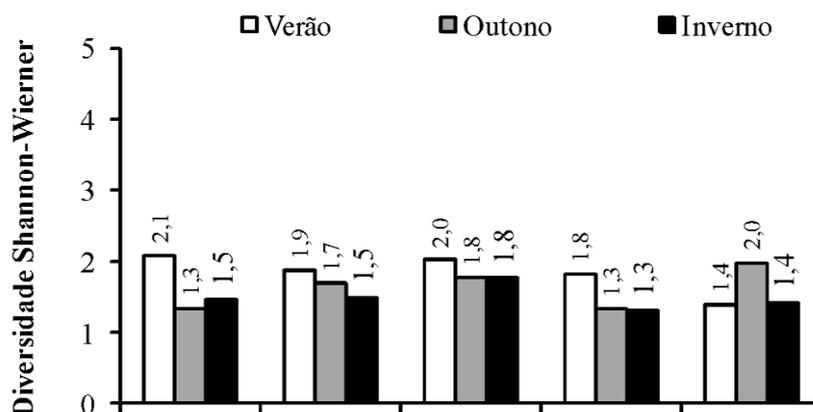
A menor população de colêmbolos (Figura 5) e ácaros (Figura 6) no outono deve-se possivelmente às temperaturas mínimas negativas que antecederam o período da coleta, conforme relatado no item Material e métodos. Por fim, ressalta-se que o somatório da população de ácaros e colêmbolos no solo construído sob a revegetação com as gramíneas perenes, ao longo das 3 estações avaliadas foi superior em relação ao tratamento controle, tanto na interface serrapilheira/liteira-solo (respectivamente, 195 a 612% e 64 a 238%) quanto no interior do solo (respectivamente, 164 a 427% e 164 a 420%, Tabela 2).

Em relação aos demais grupos taxonômicos, a maior frequência relativa foi observada para a Hymenoptera em ambos os habitats, com destaque para a população de formigas. Contudo, a frequência relativa deste grupo foi inferior a 17% na interface serrapilheira/liteira-solo e inferior a 7% no interior do solo, independente da revegetação utilizada (Tabela 2).

O índice de H' observado para os organismos que habitam a interface serrapilheira/liteira-solo foi maior no verão e diminuiu no outono/inverno sob as diferentes gramíneas, exceto para *Urochloa brizantha* (Figura 7 a). Em relação aos organismos que habitam o interior do solo, o maior índice H' foi observado no outono sob todas as gramíneas perenes (Figura 7 b).

Independente da estação do ano e do habitat dos organismos, o índice H' foi menor e/ou próximo de 2, considerado uma baixa diversidade de organismos (FERNANDEZ et al., 2023; GÓES et al. 2021). Muitos fatores relacionados ao manejo são considerados como incrementadores do índice H' na comunidade da fauna do solo, como a maior diversidade de serrapilheira na superfície do solo (ZAGATO et al., 2019; URBANOWSKI et al., 2021); permanência de cobertura do solo (palhada) associada ao uso de fertilizantes NPK (nutrientes para os organismos) ou associada ao incremento da umidade e redução da densidade do solo (XIE et al., 2022); bem como, no caso de áreas degradadas, o tempo de recuperação do solo associada ao tempo de implantação da revegetação (MENTA et al., 2018; CORREIA et al., 2020).

a)



b)

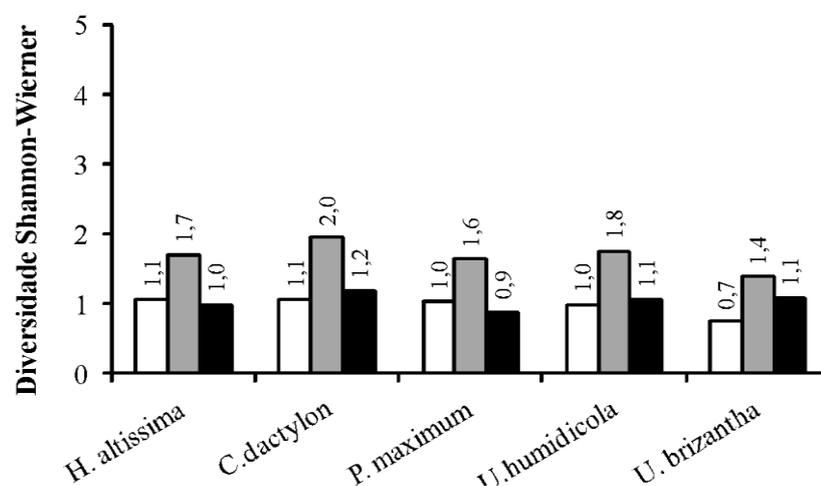


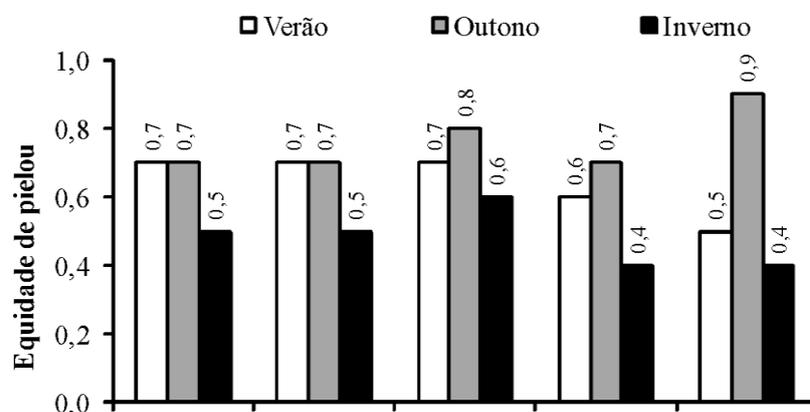
Figura 7. Índice de Diversidade de Shannon-Wierner dos organismos que habitam a interface serrapilheira/liteira-solo (a) e o interior do solo (b) nas diferentes estações do ano.

O índice J, que indica a uniformidade dos indivíduos da fauna, variou de 0,5 a 0,7; de 0,7 a 0,9; e de 0,4 a 0,5 no verão, outono e inverno, respectivamente, na comunidade que habita a interface serrapilheira/liteira-solo (Figura 8 a), enquanto que na comunidade que habita o interior do solo variou de 0,2 a 0,3; de 0,6 a 0,8; e de 0,4 a 0,5 no verão, outono e inverno, respectivamente (Figura 8 b).

Estes resultados são muito similares aos observados por Fernandez et al. (2023) em um solo minerado em recuperação por aproximadamente 18 anos ($J = 0,4$ a $0,6$), atribuindo o baixo índice ao predomínio de ácaros sobre as demais comunidades da fauna. No presente estudo, também observamos o predomínio deste grupo em relação aos demais grupos, possivelmente pela sua capacidade de adaptação a diferentes

habitats. Manu et al. (2019) observaram em diferentes áreas degradadas ao redor do mundo, uma grande e diversa população de ácaros evidenciando que estes organismos se adequam em muitas condições restritivas.

a)



b)

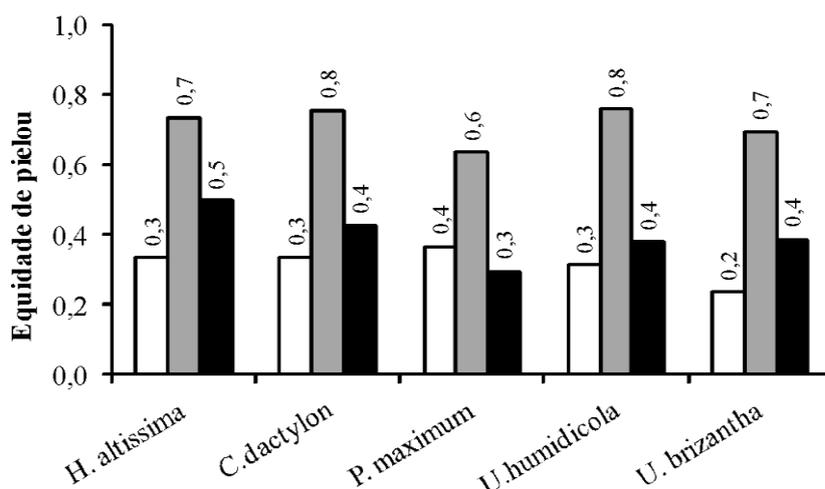


Figura 8. Índices de Equidade de Pielou (b) dos organismos que habitam a interface serrapilheira/liteira-solo (a) e o interior do solo (b) nas diferentes estações do ano.

Em relação aos atributos microbiológicos, o solo construído sob a revegetação de gramíneas perenes apresentou valores de CBM entre 541,56 e 903,84 mg kg⁻¹, e valores de RB entre 0,50 a 0,73 mg kg⁻¹ h⁻¹, os quais foram respectivamente, 67 a 178% superiores e 28 a 50% inferiores em relação ao tratamento controle (respectivamente 315,16 mg kg⁻¹ e 1,01 mg kg⁻¹ h⁻¹) (Tabela 4). A maior atividade microbiológica no solo construído sob a revegetação com gramíneas perenes pode ser consequência da maior abundância de organismos da fauna do solo (Tabela 2), as

quais podem impactar positivamente na fragmentação da serrapilheira/liteira e sua incorporação no solo e, conseqüentemente, aumentar a decomposição microbiana. De acordo com Frouz (2018), o principal fator que determina se a fauna do solo aumenta ou diminui a decomposição microbiana é o tempo decorrido desde que a serrapilheira foi consumida, destacando que a atividade microbiana aumenta durante e logo após a alimentação da fauna.

Tabela 4. Carbono da biomassa microbiana (CBM), Respiração basal (RB), Coeficiente metabólico (qCO_2) e o pH de um solo construído sob revegetação com gramíneas perenes e suas diferenças em relação ao tratamento controle.

Tratamentos	CBM mg kg ⁻¹	RB mg kg ⁻¹ h ⁻¹	qCO_2	pH do solo
<i>Hemarrhia altíssima</i>	680,96 (+109%)	0,73 (-28%)	$1,3 \times 10^{-3}$ (-65%)	5,3 (-1%)
<i>Cynodon dactylon</i>	541,56 (+67%)	0,55 (-46%)	$1,3 \times 10^{-3}$ (-64%)	5,9 (+8%)
<i>Panicum maximum</i>	770,29 (+137%)	0,64 (-37%)	$0,8 \times 10^{-3}$ (77%)	5,2 (-4%)
<i>Urochloa humidicola</i>	642,63 (+98%)	0,55 (-46%)	$3,6 \times 10^{-3}$ (-2%)	5,6 (+4%)
<i>Urochloa brizantha</i>	903,84 (+178%)	0,50 (-50%)	$1,1 \times 10^{-3}$ (-79%)	5,2 (-4%)
Controle	325,16	1,01	$3,7 \times 10^{-3}$	5,4

(±) diferenças percentuais entre o solo construído com gramíneas perenes e o tratamento controle.

Os valores de RB do solo construído após 14,6 anos de revegetação com gramíneas foram um pouco menores (Tabela 4) aos de Fernandez et al. (2023), que observaram valores entre 0,56 a 0,82 em um solo construído após 18 anos de revegetação com gramíneas submetida a diferentes manejos da biomassa vegetal. Xian et al. (2015) também observaram em áreas de mineração de carvão na China que os valores de RB aumentam com o tempo de recuperação das áreas.

A RB é um indicador bastante sensível às alterações na disponibilidade de substrato, da umidade, da temperatura, do tipo de manejo de solo, da adição de adubos e/ou resíduos, etc. (BENIZRI e AMIAUD, 2005; BAARU et al., 2007). Por isso, ao mesmo tempo em que a RB reflete a atividade respiratória de um ambiente com alta produtividade, pode refletir o estresse provocado no meio por um passivo ambiental (DA SILVA; AZEVEDO; DE-POLLI, 2007). Nesse sentido, utiliza-se o qCO_2 para avaliar a condição de estresse das áreas, considerada como a razão entre a RB e a CBM. Isto é, uma alta atividade biológica do solo está associada a maior liberação de CO_2 , que por sua vez está diretamente relacionada com a quantidade de carbono lábil (residual)

que existe no solo. Contudo, a alta atividade microbiana nem sempre indica condições desejáveis, ou seja, a curto prazo pode significar liberação de nutrientes para as plantas, mas, a longo prazo, pode significar perda de carbono orgânico do solo para a atmosfera (MONTALDO et al., 2018).

Os valores de qCO_2 do solo construído sob a revegetação com gramíneas após 14,6 anos de revegetação foram até 79% inferiores ao controle ($3,7 \times 10^{-3}$), exceto sob a *Urochloa humidicola* (Tabela 4). Este resultado indica uma maior eficiência microbiana sob a revegetação das gramíneas, e conseqüentemente, menos CO_2 perdido para a atmosfera e maior taxa de carbono incorporada à própria biomassa (FERNANDEZ et al., 2023).

Por fim, os valores de pH do solo não foram menores que 5, independente da revegetação do solo construído (Tabela 4). O baixo pH do solo era esperado considerando que a calagem na área foi realizada em 2003. O incremento da acidificação ocorreu pela infiltração da água da chuva, pela adição de nitrogênio às plantas e pela própria exsudação das raízes das gramíneas durante 14,6 anos de estabelecimento. As alterações de pH do solo de áreas mineradas também são muito dependentes do material utilizado na recomposição topográfica (overburden e/ou topsoil mais ácido ou básico) bem como pelo processo de acumulação de matéria orgânica durante o processo de recuperação vegetal da área (LI et al., 2020).

Em relação à sua condição física, uma D_s entre 1,19 e 1,45 $Mg\ m^{-3}$ e uma M_a entre 0,06 a 0,19 $m^3\ m^{-3}$ foi observada na camada de 0-10 cm do solo construído após 14,6 anos de revegetação, com destaque para a *Urochloa brizantha* que apresentou os melhores valores absolutos entre as gramíneas e em relação ao controle (Tabela 5), possivelmente devido ao desenvolvimento de sua biomassa radicular. Pauletto et al. (2016) mediram os atributos radiculares das mesmas gramíneas e no mesmo solo construído objeto do presente estudo, aos 4,8 anos de revegetação, e observaram que a *Urochloa brizantha* apresentava uma densidade radicular muito superior ($10,4\ kg\ m^{-3}$) em relação às demais espécies (média de $4,9\ kg\ m^{-3}$). Li et al. (2020) também observaram em 3 diferentes áreas de mineração na China, que a D_s diminuiu com os anos de restauração, independente da revegetação utilizada.

O potencial restaurador do espaço poroso do solo construído, através da expansão das raízes das gramíneas perenes, associado ao incremento do teor de carbono orgânico do solo, pode ser observado na Figura 9, com destaque para a *Urochloa brizantha*, para a *Urochloa humidicola* e para o *Panicum maximum*, que

promoveram a diminuição dos valores de Ds entre os 2 aos 14, 6 anos de revegetação (Figura 9 a).

Tabela 5. Densidade do solo (Ds), Macroporosidade (Ma), Microporosidade (Mi) e Porosidade total (Pt) de um solo construído sob revegetação com gramíneas perenes e suas diferenças em relação ao tratamento controle.

Tratamentos	Ds	Ma	Mi	Pt
	Mg m ⁻³		----- m ³ m ⁻³ -----	
<i>Hematria altíssima</i>	1,45 (+7%)	0,06 (-58%)	0,35 (+26%)	0,41 (-2%)
<i>Cynodon dactylon</i>	1,37 (+0,4%)	0,07 (-51%)	0,33 (+18%)	0,40 (-5%)
<i>Panicum maximum</i>	1,32 (-3%)	0,11 (-23%)	0,33 (+16%)	0,43 (+3%)
<i>Urochloa humidicola</i>	1,32 (-3%)	0,11 (-19%)	0,34 (+20%)	0,45 (+7%)
<i>Urochloa brizantha</i>	1,19 (-13%)	0,19 (+13%)	0,32 (+14%)	0,51 (+14%)
Controle	1,36	0,14	0,28	0,42

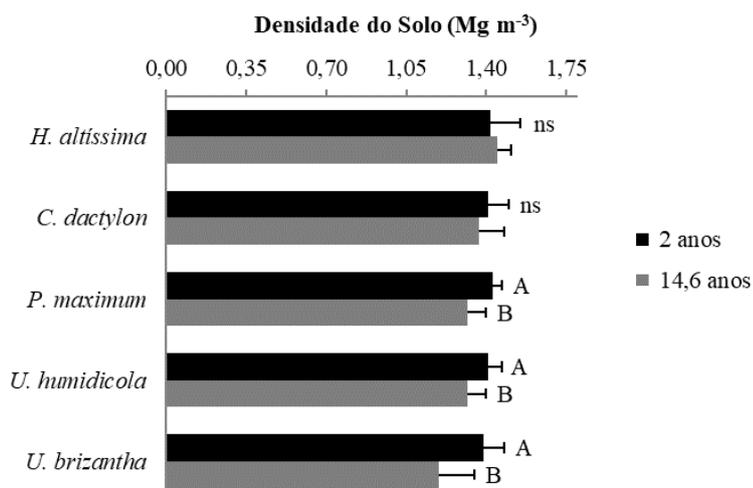
(±) diferenças percentuais entre o solo construído com gramíneas perenes e o tratamento controle.

Embora o incremento da Ma tenha sido significativo somente no solo sob a *Urochloa brizantha*, sob a *Urochloa humidicola* e o *Panicum maximum* esta tendência também foi positiva (Figura 9 b). Em outro estudo, na mesma área e com as mesmas plantas, Miguel et al. (2023) comprovaram que a macroporosidade até a profundidade de 0,20 m evoluiu positivamente entre 4,8 e 10,6 anos de revegetação.

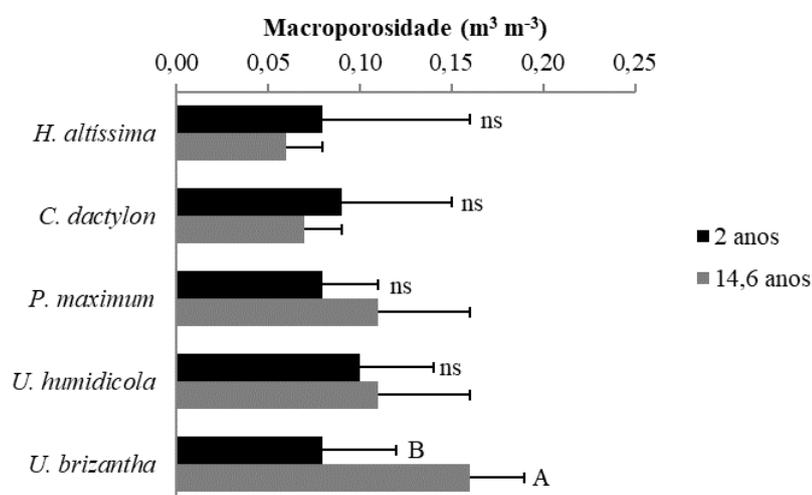
O incremento no teor de COT também ocorreu ao longo do tempo, e esta evolução ocorreu para todos os tratamentos (Figura 9 c). De maneira geral, era esperado esta evolução nos teores de COT considerando que há uma deposição da biomassa aérea das gramíneas sob a superfície do solo minerado há mais de 1 década. De acordo com Xie et al. (2022), a deposição da biomassa seca das plantas impacta positivamente no incremento da matéria orgânica do solo, principalmente quando atrelada à diversidade da fauna do solo. Nesse sentido, a baixa diversidade da fauna do solo observada no presente estudo, aos 14,6 anos de revegetação (Figura 7) ainda pode ser uma condição que acarreta um acúmulo de COT mais lento nesta área.

Em relação aos teores de COT e suas diferentes frações químicas, se observa que aos 14,6 anos de revegetação, todas as gramíneas perenes promoveram melhores resultados em relação ao controle, exceto para o C-Húmico. Isto é, o COT no solo construído sob as diferentes gramíneas foi 30 a 54% superior (13,80 a 16,37 g kg⁻¹), enquanto que as frações do C-Fúlvico e C-Humina foram, respectivamente, 35 a 76% (1,55 a 2,02 g kg⁻¹) e 1 a 63% superiores (2,11 a 3,41 g kg⁻¹) (Tabela 6).

a)



b)



c)

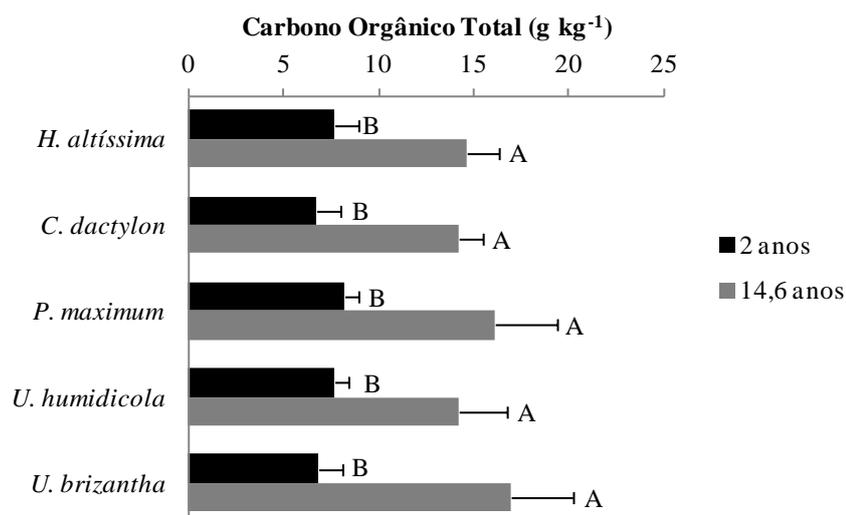


Figura 9. Densidade do solo (a), Macroporosidade (b) e Teor de carbono orgânico total (c) de um solo construído aos 2 e 14,6 anos de revegetação com gramíneas perenes.

Tabela 6. Teores de Carbono orgânico total (COT), Ácido Fúlvico (C-Fúlvico), Ácido Húmico (C-Húmico) e Humina (C-Humina) de um solo construído sob revegetação com gramíneas perenes e suas diferenças em relação ao tratamento controle.

Tratamentos	COT	C-Fúlvico	C-Húmico	C-Humina
		-----g kg ⁻¹ -----		
<i>Hematria altissima</i>	14,66 (+38%)	1,69 (+47%)	0,2 (-64%)	3,26 (+56%)
<i>Cynodon dactylon</i>	15,92 (+50%)	1,55 (+35%)	0,4 (-34%)	2,11 (+1%)
<i>Panicum maximum</i>	16,37 (+54%)	1,67(+45%)	0,8 (+23%)	3,41 (+63%)
<i>Urochloa humidicola</i>	13,80 (+30%)	1,77(+54%)	0,7 (+21%)	3,02 (+44%)
<i>Urochloa brizantha</i>	14,75 (+39%)	2,02(+76%)	0,6 (+3%)	3,17 (+53%)
Controle	10,58	1,15	0,61	2,09

Apesar dos resultados positivos dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo construído sob as diferentes gramíneas, aos 14,6 anos de revegetação, em relação ao controle, a análise de componentes principais revela uma inter-relação inicial entre a fauna, CBM e os teores de COT nos tratamentos com as gramíneas perenes. Ressalta-se que a análise de componentes principais considerou os dois primeiros componentes, que responderam por 54,31% da variação. O primeiro componente resultou de uma combinação linear de 10 variáveis e explicou 33,69% do total da variância, enquanto que o segundo componente explicou 20,62%.

Na Figura 10 a se observa que, após 14,6 anos de revegetação, o primeiro componente destaca a correlação negativa da Ds (0,41) em relação à Ma (-0,44) e ao COT (-0,38). Esse resultado evidencia o contínuo impacto positivo da revegetação na melhoria da condição porosa do solo construído ao longo do tempo, atrelada possivelmente à expansão do seu desenvolvimento radicular, conforme aborda Miguel et al. (2023).

O segundo componente (Figura 10 a) destaca a correlação positiva da população de ácaros (0,54), colêmbolos (0,38) e outros organismos (0,50) em relação à CBM (0,37). Este resultado deve-se possivelmente ao papel da fauna do solo na redistribuição do material orgânico ao longo do perfil do solo (FROUZ, 2018), impactando positivamente na população de microrganismos no solo, bem como à forte relação de predação entre colêmbolos e fungos (POTAPOV et al., 2023). Foi no segundo componente, que se evidenciou o início da correlação positiva dos organismos da fauna do solo com o C-Humina (0,22), enquanto que a CBM se correlacionou com o C-Húmico (0,24) e COT (0,17). Este resultado corrobora o estudo de Fernandez et al. (2023), que também observaram, no mesmo solo construído objeto

do presente estudo, contudo, revegetado por 18 anos com gramíneas perenes, correlações positivas iniciais entre fauna, CBM em relação ao COT e suas frações.

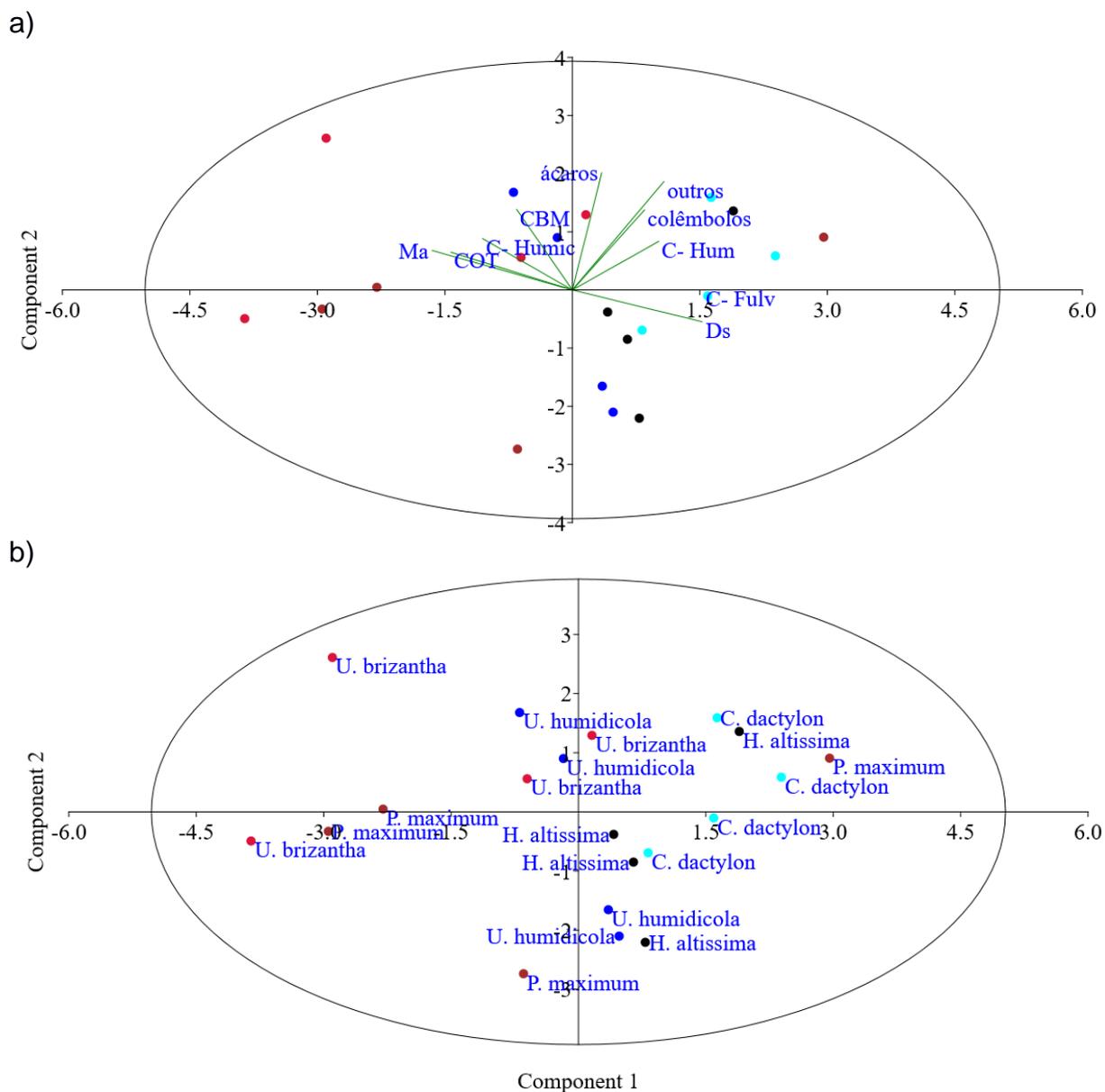


Figura 10. Análise de componentes principais dos atributos do solo construído aos 14,6 anos de revegetação (a) e sua relação com as diferentes espécies de gramíneas (b).

Por fim, entre as espécies de gramíneas perenes, foi sob a *Urochloa brizantha* e a *Urochloa humidicola* que as melhores relações entre CBM e COT foram observadas neste estágio da recuperação. Em relação a fauna edáfica, todas as gramíneas

promoveram correlações positivas iniciais entre ácaros, colêmbolos e outros organismos com a C-Humina (Figura 10).

6. Conclusão

A dissertação teve como objetivo avaliar os atributos biológicos, químicos e físicos de um solo construído após 14,6 anos de revegetação com gramíneas perenes. Os resultados obtidos fornecem uma visão abrangente da recuperação do solo ao longo do período de revegetação e destacam a importância das gramíneas perenes na melhoria dos atributos do solo.

Em relação aos atributos biológicos, foi observado uma inter-relação inicial entre a fauna, CBM e os teores de COT nos tratamentos com as gramíneas perenes no solo revegetado. Esse processo indica uma recuperação inicial da atividade biológica, o que é essencial para o funcionamento saudável do ecossistema. A presença de gramíneas perenes proporcionou uma maior disponibilidade de matéria orgânica, criando um ambiente favorável para o desenvolvimento de uma fauna do solo mais diversificada e funcional. No que diz respeito aos atributos químicos do solo, os resultados mostraram um aumento gradual no teor de COT e um maior teor de C-Humina em relação às demais frações químicas da matéria orgânica do solo.

Em relação aos atributos físicos, observou-se uma melhoria significativa na estrutura do solo após 14,6 anos de revegetação. As gramíneas perenes desenvolveram um sistema radicular denso e fibroso, contribuindo para a formação de agregados estáveis e porosidade adequada.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a revegetação com gramíneas perenes teve um impacto positivo na recuperação dos atributos biológicos, químicos e físicos do solo ao longo dos 14,6 anos estudados. A presença dessas gramíneas promoveu a restauração da biodiversidade microbiana, melhorou atributos químicos, além de aprimorar a estrutura física do solo. Essas descobertas destacam a importância da revegetação com gramíneas perenes como uma estratégia eficaz na recuperação de solos degradados, contribuindo para a restauração de ecossistemas saudáveis e sustentáveis.

7. Referências Bibliográficas

ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica. Matriz por origem de combustível. 2023. Disponível em: <http://www.Microsoft Power BI>

BACHELIER, G. 'La faune des sols, son écologie et son action', Initiations at Documents Techniques, no 38, ORSTON, Paris, 1978, 391p. BALOTA, E.L. **Manejo e qualidade biológica do solo**. Londrina: Mecenas, 2017. 288p.

BARETTA, D.; SANTOS, J. C. P.; SEGAT, J. C.; GEREMIA, E. V.; OLIVEIRA FILHO, L. D.; ALVES, M. V. Fauna edáfica e qualidade do solo. **Revista Tópicos Ciência Solo**, v.7, p. 119-159, 2011.

BARROS, J.Y.; MELO, V. F.; SAUTTER, K.D.; BUSCHLE, E.; OLIVEIRA, E.B.; AZEVEDO, C.R.; SOUZA, L.C. P.; KUMMER, L. Indicadores da qualidade de solos de área de mineração e metalurgia de chumbo. II - Mesofauna e plantas. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.34, p. 1413-1426, 2010.

BENIZRI, E.; AMIAUD, B. Relationship between plants and soil microbial communities in fertilized grasslands. **Soil Biology and Biochemistry**, v.37, p. 2055-2064, 2005.

BITENCOURT, D. G. B., PINTO, L. F. S., PAULETTO, E. A., SILVA, M. T., GARCIA, G. F Process of generating acid mine drainage and heavy metal contamination in profiles of rebuilt soil in a coal mining area. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.39, p. 1821-1834, 2015.

BARETTA, D.; SANTOS, J.C.P.; MAFRA, A.L.; WILDNER, L.P.; MIQUELUTI, D.J. Fauna edáfica avaliada por armadilhas de catação manual afetada pelo manejo do solo na região oeste catarinense. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v.2, p.97-106, 2003.

BENITES, V. D. M., MADARI, B., MACHADO, P. D. A. Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo. Comunicado Técnico (INFOTECA-E). **Embrapa**. 2003

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. Bookmann Editora LTDA, Porto Alegre, 2013. 685p.

CARDOSO, E. J. B. N., VASCONCELLOS, R. L. F., BINI, D., MIYAUCHI, M. Y. H., SANTOS, C. A. D., ALVES, P. R. L., NOGUEIRA, M. A. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health?. **Scientia Agricola**, v.70, p.274-289, 2013.

CASTRO, R.C. **Avaliação temporal de atributos físicos de um solo construído em área de mineração de carvão recuperado com gramíneas perenes**. 2012. 99f. Dissertação (Mestrado em Solos). Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.

CORREIA, M. E. F., MOREIRA, J. F., REIS, L. L., CAMILO, F. D. L., RODRIGUES, K. D. M., CAMPELLO, E. F. C., RESENDE, A. S. D. Fauna edáfica no processo de revegetação de áreas de mineração de bauxita em Porto Trombetas, Pará. **Ciência Florestal**, v.30, p.1048-1060, 2020.

CRM-COMPANHIA RIOGRANDENSE DE MINERAÇÃO- Mina de carvão de Candiota/RS. Disponível em: <https://www.crm.rs.gov.br/balancos-anuais>

DA SILVA, E.E.; AZEVEDO, P.H.S.; DE-POLLI, H Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂). Comunicado Técnico (INFOTECA-E). Brasil: **Embrapa**. 2007

DORAN, J.W.; ZEISS, M.R. Soil health and sustainability: Managing the component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, v.1, p.3-11, 2000.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining soil quality. In. DORAN, J. W; COLEMAN, D. C; BEZDIECK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds). **Defining soli quality for sustainable environment**. Madison (SSSA Special Publication, 35), p. 3-21, 1994.

FERNANDEZ, M. B. D. G., STUMPF, L., MIGUEL, P., PINTO, L. F. S., CARLOS, F. S., SCHUBERT, R. N., BICCA, J. M. Biological quality and organic matter dynamics in minesoil at 18 years reclamation with perennial grasses. **Ecological Engineering**, v.187, p.106866., 2023

FREITAS, L.; OLIVEIRA, I. A.; SILVA, L. S.; FRARE, J. C. V., FILLA, V. A.; GOMES, R. P. Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Unimar Ciências**, v. 26, p. 8-25, 2017.

FROUZ, J. Efeitos da macro e mesofauna do solo na decomposição da serapilheira e na estabilização da matéria orgânica do solo. **Geoderma** 332, 161–172, 2018

FROUZ, J., LIVEČKOVÁ, M., ALBRECHTOVÁ, J., CHROŇÁKOVÁ, A., CAJTHAML, T., PIŽL, V., CEPÁKOVÁ, Š. O efeito das árvores nas propriedades do solo é mediado pela fauna do solo? Um estudo de caso de locais de pós-mineração. **Ecologia e Manejo Florestal**, v.309, p.87-95, 2013.

GALLO, D.NAKANO, O.; SILVEIRA NETO, S.; CARVALHO, R.P.L.; BATISTA, G.C.de; BERTI FILHO, E.; PARRA, J.R.P.; ZUCCHI, R.A.; ALVES, S.B., VENDRAMIM, J. **Manual de Entomologia Agrícola**, São Paulo. Ed. Agronômica Ceres, 1988, 649p.

GÓES, Q. R. D., FREITAS, L. D. R., LORENTZ, L. H., VIEIRA, F. C. B., WEBER, M. A. Análise da fauna edáfica em diferentes usos do solo no Bioma Pampa. **Ciência Florestal**, v.31, p.123-144, 2021

KAZMIERCZAK, R. **Indicadores físicos e químicos de qualidade do solo em sistemas de preparo**. 2018. 102f. –Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual de Ponta Grossa.

KROLOW, I.R.C. **Efeito de fertilizantes mineral, organo-mineral e orgânico sobre a macrofauna e mesofauna do solo**. 2011. 162f.Tese (Doutorado em Agronomia), Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2011.

KUMARI, S., MAITI, S. K. Nitrogen recovery in reclaimed mine soil under different amendment practices in tandem with legume and non-legume revegetation: A review. **Soil Use and Management**, 38(2), 1113-1145, 2022

LEAL, O. D. A., CASTILHOS, R. M. V., PINTO, L. F. S., PAULETTO, E. A., LEMES, E. S., KUNDE, R. J. Initial recovery of organic matter of a grass-covered constructed soil after coal mining. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.40, p. e0150384,. 2016

LI, J., XIN, Z., YAN, J., LI, H., CHEN, J., DING, G. Físico-químico e avaliação microbiológica da qualidade do solo em uma cronossequência de um local de recuperação de mina. EUR. **Journal Soil Science**. v.69, p.1056–1067, 2018.

MANU, M., HONCIUC, V., NEAGOE, A., BĂNCILĂ, R. I., IORDACHE, V., ONETE, M. Soil mite communities (Acari: Mesostigmata, Oribatida) as bioindicators for environmental conditions from polluted soils. **Scientific Reports**, v.9, p.1-13, 2019.

MANU, M., BĂNCILĂ, R. I., BÎRSAN, C. C., MOUNTFORD, O., ONETE, M. Soil mite communities (Acari: Mesostigmata) as indicators of urban ecosystems in Bucharest, Romania. **Scientific reports**, v.11, p. 3794, 2021

MARTINS, W.B.R.; LIMA, M. D. R; BARROS JUNIOR, U.O; AMORIM, L.S.V; OLIVEIRA, F.A; SCHWARTZ, G. Ecological methods and indicators for recovering and monitoring ecosystems after mining: A global literature review. **Ecological Engineering**, v. 145, p. 105707, 2020.

MELLONI, R. **Quantificação Microbiana da Qualidade do Solo**. In: SILVEIRA, Adriana Parada Dias da; FREITAS, Sueli dos Santos. Microbiota do solo. Campinas: Instituto Agrônômico, 2007. Cap. 11. p. 193-218.

MENDES FILHO, P. F. **Potencial de reabilitação do solo de uma área degradada, através da revegetação e do manejo microbiano**. 2004. 89f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

MENDES, I.C.; SOUSA, D.M.G.; REIS JÚNIOR, F.B. Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 32 p. 185-203, 2015.

MENTA, C.; CONTI, F. D.; PINTO, S.; BODINI, A.. Soil Biological Quality index (QBS-ar): 15 years of application at global scale. **Ecological Indicators**, v. 85, p. 773–780, 2018.

MIGUEL, P., STUMPF, L., PINTO, L. F. S., PAULETTO, E. A., RODRIGUES, M. F., BARBOZA, L. S., ROCHA, J. V. P. Physical restoration of a minesoil after 10.6 years of revegetation. **Soil and Tillage Research**, v.227, p.105599, 2023.

MONTALDO, J.C.; SANTOS, G.B.L.; MONTALDO, Y.C.; SANTOS, T.M.C.; BARROSO, G.S.P.; OLIVEIRA, J.U.L.; SILVA, J.M. Basal respiration and microbial population of a red-yellow Latosol under different harvesting systems of sugarcane. **Global Science and Technology**, v. 11, p. 9-16, 2018.

MOREIRA, F. M. S.; HUISING, E.J.; BIGNEL, D.E.(Ed). **Manual de biologia dos solos tropicais: amostragem e caracterização da biodiversidade**. Lavras, Editora UFLA, 2010, 367p.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. Lavras. Editora UFLA. 2006. 626p.

NAVROSKI, DEISI; COLOZZI FILHO, A.; MOREIRA, A. Atividade da enzima fosfatase ácida em diferentes manejos de solo na região oeste do Paraná. In: **XX Rbmcsa Reunião Brasileira De Manejo e Conservação do Solo E da Água**. Foz do Iguaçu, 2016.

NÓBREGA, R. S. A.; MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O.; LIMA, A. S. Caracterização fenotípica e diversidade de bactérias diazotróficas associativas isoladas de solos em reabilitação após a mineração de bauxita. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 28, p. 269-279, 2004.

OLIVEIRA FILHO, L. C. I.; BARETTA, D.. Why should we care about edaphic springtails? **Scientia Agraria**, v. 17, p. 21-40, 2016.

PAULETTO, E. A., STUMPF, L., PINTO, L. F. S., SILVA, T. S. D., AMBUS, J. V., GARCIA, G. F., ALBERT, R. P. Reclamation of a degraded coal-mining area with perennial cover crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.40, p. e0150482, 2016

SILVA, P. M.; CARVALHO, F.; DIRILGEN, T.; STONE, D.; CREAMER, R.; BOLGER, T.; SOUZA, J. P. Traits of collembolan life-form indicate land use types and soil properties across an European transect. **Applied Soil Ecology**, v. 97, p. 69-77, 2015.

SIQUEIRA-SILVA, A. I., RIOS, C. O., PEREIRA, E. G. Estratégias de resistência à toxidez de ferro em gramíneas tropicais: o papel das barreiras radiculares apoplásticas. **Revista de Ciências Ambientais**, v.78, p.257-266, 2019.

PILLON, C. N., SANTOS, D. C. D., LIMA, C. L. R. D., ANTUNES, L. O. Carbono e nitrogênio de um Argissolo Vermelho sob floresta, pastagem e mata nativa. **Ciência Rural**, v. 41, p.447-453, 2011.

PINTO, L. F. S., STUMPF, L., MIGUEL, P., JUNIOR, L. A. D., LEIDEMER, J. D., DA SILVA BARBOSA, L., OLIVEIRA, M. S. Reclamation of soils degraded by surface coal mining. In *Mining Techniques-Past, Present and Future*. **IntechOpen**. 2020

POTAPOV, A. M., GUERRA, C. A., VAN DEN HOOGEN, J., BABENKO, A., BELLINI, B. C., BERG, M. P., SCHEU, S. Globally invariant metabolism but density-diversity mismatch in springtails. **Nature communications**, v.14, p.674, 2023.

PRIMAVESI, A. **Manejo Ecológico do Solo**. São Paulo: Nobel, 2002, p139 -163.

RIGOTTI, N. **Recuperação de áreas degradadas: estudo de caso. Porto Alegre, FINEP/CAPES/PADCT/GTM/PUCRS/FEPAM**, p. 99-113, 2002.

RIOS, C. O., SIQUEIRA-SILVA, A. I., PEREIRA, E. G. Revegetation of mining-impacted

sites with a tropical native grass: Constraints of climate seasonality and trace-element accumulation. **Journal of Environmental Management**, v.326, p.116655, 2023.

SHEORAN, V.; SHEORAN, A.S.; POONIA, P. Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: a review. **International Journal of Soil, Sediment and Water**, v.3, p.2-13, 2010.

SYDOW, V. G.; PODGAISKI, L. R.; BARBOSA, A. F.; PINTO, J. A.M.; RODRIGUES, G. G. Aspectos estruturais da fauna de solo em áreas sob influência do processamento do carvão mineral no sul do Brasil. **Anais do VIII Congresso de Ecologia do Brasil**, Caxambu – MG. 2007.

SIQUEIRA, J. O.; SOARES, C. R. F. S.; SILVA, C. A. Matéria orgânica em solos de áreas degradadas. *In*: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Org.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo – Ecossistemas tropicais e sub-tropicais**. Porto Alegre: Metrópole Editora Ltda, v. 1, p. 495-524, 2008.

STÖCKER, C.M; MONTEIRO, A.B; BAMBERG, A.L; CARDOSO, J.H; MORSELLI, T.B.G.A; LIMA, A.C.R. **Bioindicadores da qualidade do solo em sistemas agroflorestais**.14ª Jornada de Pós-Graduação e Pesquisa, 2017.

STUMPF, L.; PAULETTO, E.A.; PINTO, L.F.S. Soil aggregation and rootgrowth of perennial grasses in a constructed clay minesoil. **Soil and Tillage Research**, v.161, p.71-78, 2016

STUMPF, L., PAULETTO, E. A., FERNANDES, F. F., SUZUKI, L. E. A. S., SILVA, T. S. D., PINTO, L. F. S., LIMA, C. L. R. D. Perennial grasses for recovery of the aggregation capacity of a reconstructed soil in a coal mining area in southern Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.38, p.327-335, 2014.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. Manual de Métodos de Análise de Solos. 3ª edição Revista e Ampliada, Brasília: **Embrapa**, 2017. 573p

URBANOWSKI, C. K.; KAMCZYC, J.; SKORUPSKI, M. Does litter decomposition affect mite communities (Acari , Mesostigmata)? A five-year litterbag experiment with 14 tree species in mixed forest stands growing on a post-industrial area, **Geoderma**, v. 391, p.114963, 2021.

VIDAL, A., KLÖFFEL, T., GUIGUE, J., ANGST, G., STEFFENS, M., HOESCHEN, C., MUELLER, C. W. Visualizing the transfer of organic matter from decaying plant residues to soil mineral surfaces controlled by microorganisms. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 160, p.108347, 2021

XIAN Y, WANG M, CHEN W. Avaliação quantitativa sobre as atividades enzimáticas do solo de solos contaminados por metais pesados com várias propriedades do solo. **Quimiosfera** v.139, p.604–608, 2015

XIE, X., WANG, X., DONG, Z., ZHU, B Diversity of soil faunal community as influenced by crop straw combined with different synthetic fertilizers in upland purple soil. **Scientific Reports**, v.12, p.19306, 2022

YADA, M. M.; MINGOTTE, F.L.C.; MELO, W.J.; MELO, G.P.; MELO, V.P.; LONGO, R.M; RIBEIRO, A.I. Atributos químicos e bioquímicos em solos degradados por mineração de estanho e em fase de recuperação em ecossistema amazônico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p.714-724, 2015.

ZAGATTO, M. R. G., ZANÃO, L. A., PEREIRA, A. P. D. A., ESTRADA-BONILLA, G., CARDOSO, E. J. B. N. Soil mesofauna in consolidated land use systems: how management affects soil and litter invertebrates. **Scientia Agricola**, v.76, p.165-171, 2019.