

ATIVIDADE DA ENZIMA *B*-GLICOSIDASE DE UMA CRONOSSEQUÊNCIA DE TECNOSSOLOS DE MINA, COM ATÉ 30 ANOS DE REGENERAÇÃO.

GABRIEL HENRIQUE SILVA DAS DÔRES¹; LIZETE STUMPF²; EZEQUIEL CÉSAR MIOLA³; EMANUÉLLE SOARES CARDOZO⁴; THOMAZ BURGUEÑO DE ALPOIM⁵; JAKELINE ROSA DE OLIVEIRA⁶.

¹Universidade federal de Pelotas – gabrielhenriquedores@gmail.com

²Universidade federal de Pelotas – zete.stumpf@gmail.com

³Universidade federal de Pelotas – ezequielmiola@gmail.com

⁴Universidade federal de Pelotas – emanuellesoarescardozo@gmail.com

⁵Universidade federal de Pelotas – thomaz.burgueno@outlook.com

⁶Universidade federal de Pelotas – jakeliner.oliveira@hotmail.com

1. INTRODUÇÃO

As atividades industriais humanas, como a mineração, podem impactar de maneira severa o ambiente, tendo a capacidade de retirar totalmente o solo e a vegetação acima (MUKHOPADHYAY; MAITI; MASTO, 2013; RUIZ et al., 2023). Como consequência da forte influência humana sobre os solos, um novo táxon foi criado, com o intuito de contemplar as características distintas desses novos solos, classificados pela Word Reference Base for soil resources (WRB) em 2015 como *Technosol* (IUSS/WRB, 2015).

Esse termo foi adaptado pela comunidade científica brasileira como “tecnossolo”, já que o táxon não foi incluído no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS. Para a WRB, tecnossolos devem apresentar forte influência humana em sua construção, onde suas propriedades estão atreladas a sua origem técnica. Devendo conter em até 100 cm de profundidade 20% de artefatos (matéria tecnogênico). Esses artefatos possuem forte influência nas dinâmicas e pedogênese nesses solos (ALLORY; SÉRÉ; OUVRARD, 2022).

Os tecnossolos de mina de carvão podem apresentar algumas características que influenciam sua recuperação, como alta acidez proveniente da drenagem ácida de mina devido a oxidação de pirita, mineral rico em enxofre (BITENCOURT et al., 2015). Bem como alta compactação (STUMPF; PAULETTO; PINTO, 2016) e contaminação por metais pesados (DIAS, 2024). A recuperação desses solos a partir da revegetação leva tempo (FENG et al., 2019) e é estudada em todo o mundo, destacando a importância do aporte de matéria orgânica proveniente de diferentes tipos de vegetação como gramíneas (STUMPF; PAULETTO; PINTO, 2016) e arbóreas (DIAS, 2024).

Uma forma de avaliar o estágio de recuperação biológica desse solo é pela análise enzimática. As enzimas participam da ciclagem de nutrientes (decomposição da matéria orgânica) e sua presença e concentrações implicam maior ou menor presença de microrganismos no solo (MENDES et al., 2021). Como exemplo a enzima *β-glicosidase* - GLU que participa do ciclo do carbono, na quebra da celulose em glicose, que por sua vez é usada como energia pelos microorganismos (BALOTA et al., 2013).

A recuperação desses solos é de suma importância haja vista a situação atual no cenário mundial, devido as mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global. Neste contexto, os solos sugerem como importante ferramenta pois tem a capacidade de armazenar até três vezes mais carbono que a vegetação acima, podendo ser considerados sumidouros de carbono (RUIZ et al., 2023). Sendo

assim o objetivo desse trabalho foi avaliar a recuperação de tecnossolos de mina de carvão numa cronomsequência de 30 anos, analisando o conteúdo enzimático e sua relação com o pH do solo.

2. METODOLOGIA

Os tecnossolos analisados provém da mineradora de carvão da Companhia Rio Grandense de Mineração - CRM, localizada no município de Candiota, Rio Grande do Sul, Brasil. Foram analisadas uma cronomsequência de solos minerados com até 30 anos sob revegetação natural, com predomínio de gramíneas características do Bioma Pampa. O clima da região é subtropical úmido (Cfa), a temperatura média anual do ar é de 17°C e a precipitação média anual é de 1.400 mm, incluindo inverno frio e verão quente (ALVARES et al., 2013).

Em cada área da cronomsequência foi estabelecido um grid composto por 5 pontos georreferenciados, com distância média de 75,16 m entre eles. Foram coletadas amostras nas camadas de 0,00–0,05 m e 0,05–0,10 m. Para análise da atividade enzimática foi-se criado amostra composta com quantidades iguais das duas camadas, representando camada de 0,00–0,10 m.

A atividade da GLU foi determinada no Laboratório de Microbiologia do Solo da UFPel, seguindo Tabatabai (1994), com p-nitrofenol- β -D-glucopiranósideo (PNG) como substrato. Para o ensaio, foram usados 1 g de solo, 4 mL de solução tampão universal modificada (pH 6,0) e 1 mL de PNG em Erlenmeyers de 50 mL. Após fechamento, os frascos foram agitados manualmente e incubados por 1 hora a 37°C em estufa BOD.

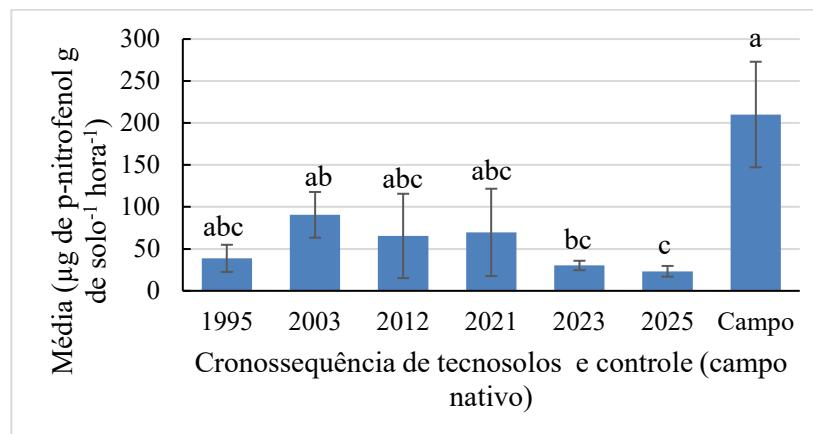
Após esse tempo, adiciona-se 1 mL de CaCl₂ a 0,5 M e 4,0 mL de tampão THAM pH 12, seguido de agitação. A suspensão é filtrada em papel filtro e analisada no espectrofotômetro a 410 nm, utilizando curva padrão de p-nitrofenol. O controle recebe PNG após incubação. A atividade enzimática é expressa em µg de p-nitrofenol por hora por grama de solo. A análise do pH foi realizado no Laboratório de química da UFPel, por meio de pHmetro.

Para cada conjunto de dados, realizou-se o teste de normalidade de Shapiro-Wilk e avaliou-se a homogeneidade das variâncias (Levene). Diante do não atendimento desses pressupostos, optou-se pela aplicação dos testes não paramétricos de Kruskal-Wallis e Dunn. Foi feito correlação de Spearman entre as variáveis.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dentre os tecnossolos analisados, os solos de 1995, 2003, 2012 e 2021 apresentaram maior concentração de GLU, não diferenciando estatisticamente entre si e entre o controle (Figura 1). Já os tecnossolos de 2023 e 2025 apresentaram menor atividade enzimática e foram os únicos estatisticamente diferentes do controle. O tecnossolo de 1995, apesar de ser o mais antigo da cronomsequência, não obteve a maior atividade enzimática, indicando que a idade não é o único fator determinante para recuperação desses solos.

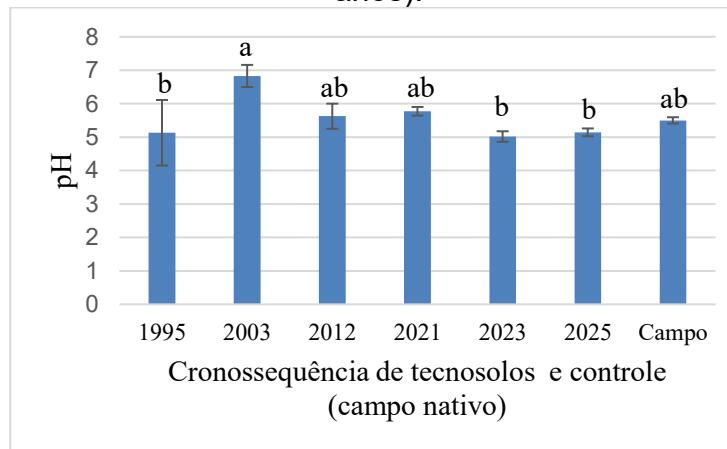
Figura 1: Resultado das análises da enzima β -glucosidase da cronomsequência de solos minerados (30 anos).



Legenda: Letras iguais significam que não há diferença estatística com $p>0,05$.

No que tange ao pH, o tecnossolo de 2003 apresentou o maior valor, diferenciando-se estatisticamente dos mais ácidos (1995, 2023 e 2025). Por fim, os tecnossolos de 2003, 2012 e 2021 foram menos ácidos, não diferenciando entre si e nem do controle (Figura 2).

Figura 2: Resultado das análises pH da cronossequência de solos minerados (30 anos).



Legenda: Letras iguais significam que não há diferença estatística com $p>0,05$.

Os tecnossolos que tiveram maior atividade enzimática também demonstraram pH mais alto, destacando especialmente o ano de 2003, quando a média foi próxima de 7 (pH ideal). Conforme apontam os estudos, esse pH ideal pode contribuir para a qualidade do solo, beneficiando a comunidade bacteriana (LI et al., 2016). Já que solos ácidos tendem a favorecer bactérias resistentes, como as extremófilas; além disso, há relatos de maior presença do gênero *Bacillus* em áreas de mineração de carvão (UZAROWICZ et al., 2020). Entretanto, a análise de Spearman indicou ausência de correlação estatística significativa ($p = 0,119$) entre atividade enzimática e pH, o que sugere que outros fatores podem estar envolvidos na regulação da atividade dessa enzima.

4. CONCLUSÕES

Os resultados apontam que não há uma correlação significativa entre pH e a atividade da enzima β -glucosidase nos tecnossolos dessa cronossequência em mina de carvão. Também se verificou que somente o tempo de

recuperação/revegetação, também não é o fator mais importante para o aumento dos níveis dessa enzima nesses solos. Podendo outra variável estar influenciando essa enzima.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLORY, V.; SÉRÉ, G.; OUVRARD, S. A Meta-analysis of Carbon Content and Stocks in Technosols and Identification of the Main Governing Factors. *European Journal of Soil Science*, v. 73, n. 1, p. e13141, jan. 2022.
- ALVARES, C. A. et al. **Köppen's Climate Classification Map for Brazil**. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.
- BALOTA, Elcio. L. et al. Enzimas e seu papel na qualidade do solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, v.8, p.221-278, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/288482294>
- BITENCOURT, D. G. B. et al. Geração de drenagem ácida e de contaminação por metais pesados em perfis de solos construídos em área de mineração de carvão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, n. 6, p. 1821–1834, dez. 2015.
- DIAS, Sérgio da Costa. **Estudo pioneiro da restauração de solos minerados em uma cronosequência de 10,6 anos na mina de carvão de Moatize – Moçambique**— Pelotas, 2024. 111 f. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2024.
- FENG, Y. et al. Effects of Surface Coal Mining and Land Reclamation on Soil Properties: A Review. *Earth-Science Reviews*, v. 191, p. 12–25, abr. 2019.
- IUSS Working Group WRB**. 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. Disponível em: <http://www.fao.org/3/i3794en/I3794en.pdf>.
- LI, Y. et al. Ecological Restoration Alters Microbial Communities in Mine Tailings Profiles. *Scientific Reports*, v. 6, n. 1, p. 25193, 29 abr. 2016.
- MENDES, I.D.C. et al. Tecnologia BioAS: uma maneira simples e eficiente de avaliar a saúde do solo. Planaltina, DF: **Embrapa Cerrados**, 2021.
- RUIZ, F. et al. Constructing Soils for Climate-Smart Mining. *Communications Earth & Environment*, v. 4, n. 1, p. 219, 19 jun. 2023.
- STUMPF, L.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S. Soil Aggregation and Root Growth of Perennial Grasses in a Constructed Clay Minesoil. *Soil and Tillage Research*, v. 161, p. 71–78, ago. 2016.
- TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: Weaver, R. W.; Angle, J. S.; Bottomley, P. J.; Bezdicek, D. F.; Smith, S.; Tabatabai, A. M.; Wollum, A. W. (Ed.). Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties. Madison: **Soil Science Society of America**, 1994.
- UZAROWICZ, Ł. et al. Technogenic Soils (Technosols) Developed from Fly Ash and Bottom Ash from Thermal Power Stations Combusting Bituminous Coal and Lignite. Part I. Properties, Classification, and Indicators of Early Pedogenesis. *CATENA*, v. 157, p. 75–89, out. 2017.