

ÍNDICE DE POLUIÇÃO EM SOLO CONSTRUÍDO APÓS 20 ANOS DE RESTAURAÇÃO COM GRAMÍNEAS PERENES EM ÁREA DE MINERAÇÃO DE CARVÃO

BRUNA LEMONS BRISOLARA¹; LUIZ FERNANDO SPINELLI PINTO²;
JAKELINE ROSA DE OLIVEIRA³; LIZETE STUMPF⁴

¹Universidade Federal de Pelotas – brunalemons.b@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – lfspin@uol.com.br

³Universidade Federal de Pelotas – jakeliner.oliveira@hotmail.com

⁴Universidade Federal de Pelotas - zete.stumpf@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

A mineração de carvão é uma atividade industrial que frequentemente resulta na liberação de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) no ambiente. Quando a mineração é encerrada e o solo é reconstruído, inicia-se um processo de sucessão ecológica, no qual o ecossistema tenta se regenerar. Entretanto, a presença de EPTs pode comprometer gravemente esse processo, dificultando a restauração do equilíbrio ecológico e afetando a qualidade do solo (MISHRA e LAL, 2024).

Durante a mineração, grandes quantidades de EPTs, como metais pesados, são trazidas à superfície a partir de depósitos subterrâneos. Esses elementos se mobilizam quando expostos ao oxigênio e à água, promovendo sua dispersão pelo solo (ABLIZ et al., 2023). A mineração a céu aberto expõe vastas áreas de solo, acelerando a oxidação de minerais e a liberação de metais pesados no ambiente (ABLIZ et al., 2023).

Nos solos reconstruídos, a compactação intensa resultante do tráfego de máquinas pesadas compromete a infiltração de água, dificultando a regeneração natural da área (STUMPF, 2011). A ausência de vegetação e a interrupção dos processos biológicos naturais agravam a acumulação de EPTs, uma vez que a vegetação e a matéria orgânica, que normalmente ajudariam a imobilizar esses poluentes, são escassas ou inexistentes (THALASSINOS et al., 2023).

Como consequência, a compactação do solo e a baixa concentração de matéria orgânica reduzem a capacidade de retenção dos EPTs, aumentando sua mobilidade e tornando-os mais bioacessíveis (THALASSINOS et al., 2023).

De acordo Stumpf (2015), as gramíneas perenes são utilizadas em solos reconstruídos após a mineração devido à sua capacidade de melhorar a estrutura do solo, reduzindo a compactação, aumentando a retenção de água e matéria orgânica e estabilizando o solo.

Portanto, este estudo tem como objetivo avaliar o Fator de Contaminação (FC) e o Índice de Carga Poluente (ICP) dos elementos Zn, V, Cu e Cr no solo, após 20 anos de regeneração sob o cultivo das gramíneas perenes *Hemarthria altissima*, *Cynodon dactylon* e *Urochloa brizantha*.

2. METODOLOGIA

O presente estudo foi conduzido em uma área de mineração de carvão sob concessão da Companhia Riograndense de Mineração (CRM), em Candiota, RS. O solo foi construído no início do ano de 2003, e o experimento com gramíneas perenes foi instalado entre novembro e dezembro do mesmo ano. A camada de topsoil utilizada na área experimental foi retirada do horizonte B do solo natural da

área pré-minerada (Argissolo Vermelho Eutrófico típico), caracterizado por sua textura argilosa (46,5%) e pelo baixo teor de matéria orgânica (1,5%).

Antes da implantação das gramíneas perenes, a área foi escarificada com uma patrula até uma profundidade aproximada de 0,15 m. Em seguida, foi realizada a aplicação de calcário dolomítico na dose de 10,4 Mg ha⁻¹ com PRNT de 100% e a adubação inicial de 900 kg ha⁻¹ da fórmula NPK de 5-20-20, de acordo com o resultado da análise de fertilidade do topsoil. Entre 2003 e 2023, foram aplicadas anualmente 250 kg ha⁻¹ da fórmula NPK 5-30-15 e 250 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio em todas as parcelas da área experimental.

O solo construído apresenta uma camada superficial de 40 cm de topsoil, seguido por uma camada de estéril (overburden), composta por rejeitos de rochas e carvão. O delineamento experimental foi constituído de blocos ao acaso, utilizando parcelas de 20 m² (5 m x 4 m). Três gramíneas perenes foram avaliadas: *Hemarthria altissima*, *Cynodon dactylon*, e *Urochloa brizantha*.

Em 2023, com 20 anos de restauração, amostras de solo foram coletadas para análise de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm, usando o método de extração USEPA 3050B, que solubiliza frações metálicas com ácidos (EPA, 1996). As análises de biodisponibilidade dos elementos foram realizadas por espectrometria MIP OES no Laboratório de Metrologia Química (LabMeQui) da UFPel.

A avaliação da contaminação do solo por EPTs foi feita utilizando o Fator de Contaminação e Índice de Carga Poluente. Estes índices foram calculados utilizando os valores de referência de qualidade (VRQ) da província geomorfológica de rochas sedimentares pelíticas da Depressão Periférica, Rio Grande do Sul (Portaria FEPAM n.º 85/2014).

O FC foi calculado com base na relação entre a concentração do elemento potencialmente tóxico presente no solo e o VRQ, obtido através da equação:

$$FC = \frac{\text{Concentração do EPT no solo}}{\text{Valor de Referência de Qualidade (VRQ)}}$$

O ICP de cada tratamento foi calculado pela raiz enésima do produto dos fatores de contaminação (FC) de todos os metais analisados, onde o FC é obtido pela relação entre a concentração de cada metal no solo e o valor de referência de qualidade (VRQ), conforme descrito na equação:

$$ICP = (FC_1 \times FC_2 \times FC_3 \times FC_4)^{1/n}$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O FC para o elemento Zn na camada de 0-0,10 m indicou contaminação moderada sob o cultivo de *Hemarthria altissima* (FC = 1,02). Em contrapartida, os tratamentos com *Cynodon dactylon* (FC = 0,56) e *Urochloa brizantha* (FC = 0,79) não apresentaram contaminação, evidenciando seu potencial para remediação de solos contaminados. Na camada de 0,10-0,20 m, todos os tratamentos mostraram níveis de FC abaixo do limite de contaminação, sugerindo uma eficácia geral das gramíneas em melhorar a qualidade do solo ao longo do tempo.

No que diz respeito ao vanádio, todos os tratamentos na camada de 0-0,10 m demonstraram contaminação moderada, com valores de FC de 1,98 para *Hemarthria altissima*, 1,66 para *Cynodon dactylon*, e 1,19 para *Urochloa brizantha*. Contudo, na camada de 0,10-0,20 m, apenas o tratamento com *Urochloa brizantha* (FC = 0,58) não apresentou contaminação, enquanto *Hemarthria altissima* (FC = 1,60) e *Cynodon dactylon* (FC = 1,63) mantiveram a contaminação em profundidade. Isso sugere que a *Urochloa brizantha* pode ser mais eficaz na mitigação da contaminação em camadas mais profundas do solo.

Para o cobre, todos os tratamentos na camada superficial de 0-0,10 m apresentaram contaminação moderada, com FC de 1,78 para *Hemarthria altissima*, 1,24 para *Cynodon dactylon*, e 1,38 para *Urochloa brizantha*. Na camada de 0,10-0,20 m, os tratamentos com *Hemarthria altissima* (FC = 1,65) e *Cynodon dactylon* (FC = 1,51) continuaram a indicar contaminação, enquanto *Urochloa brizantha* (FC = 0,25) demonstrou a capacidade de reduzir a contaminação.

Em relação ao cromo, todos os tratamentos mostraram contaminação moderada na camada de 0-0,10 m, com fatores de contaminação de 1,34 para *Hemarthria altissima*, 1,14 para *Cynodon dactylon*, e 1,06 para *Urochloa brizantha*. Na camada de 0,10-0,20 m, as gramíneas *Hemarthria altissima* e *Urochloa brizantha* apresentaram contaminação moderada (FC = 1,14), enquanto *Cynodon dactylon* (FC = 0,99) não indicou contaminação, sugerindo uma eficácia variável na remediação de Cr.

A evolução dos dados revela um aumento significativo do Carbono Orgânico Total (COT) e da Capacidade de Troca de Cátons (CTC) após 20 anos de regeneração sob o cultivo das gramíneas (Tabela 1). Apesar de pequenas variações, o pH se manteve em condições ácidas.

Tabela 1. Legenda - pH em água, COT e CTC na camada de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m de um minesoil sob revegetação com gramíneas perenes aos 8,6 anos (2012) e aos 20 anos (2023)

Gramíneas perenes de verão	pH em água		COT (g kg ⁻¹)		CTC pH7 (cmol _c kg ⁻¹)	
	2012	2023	2012	2023	2012	2023
Camada						
<i>Hemarthria altissima</i>	6,2	5,9	8,4	21,1	10,7	16,9
<i>Cynodon dactylon</i>	5,7	5,9	8,4	20,1	10,7	18,3
<i>Urochloa brizantha</i>	6,1	5,5	10,4	24,3	11,6	25,4
Camada						
	0,10 – 0,20m					
<i>Hemarthria altissima</i>	5,3	6,1	5,9	14,0	10,3	15,0
<i>Cynodon dactylon</i>	5	5,6	4,81	9,6	11,0	16,9
<i>Urochloa brizantha</i>	5,5	5,7	8,34	13,9	11,4	20,1

Fonte: Adaptação de Stumpf, 2015

O aumento da matéria orgânica contribui para a formação de complexos com elementos potencialmente tóxicos (EPTs), reduzindo sua mobilidade no solo (THALASSINOS et al., 2023). Além disso, a elevação da CTC do solo favorece uma maior retenção de EPTs, o que é benéfico para a qualidade do solo e para a saúde das plantas (THALASSINOS et al., 2023).

Embora o pH ainda seja considerado ácido aos 20 anos de restauração, os valores estão próximos ou superam o limite de referência para gramíneas perenes de verão (pH > 5,5), conforme estabelecido pelo CQFS (2004). Isso indica que, apesar da acidez, o solo minerado mostra sinais de recuperação e potencial para suportar o crescimento de vegetação saudável.

O solo cultivado com *Hemarthria altissima*, *Cynodon dactylon* e *Urochloa brizantha* apresentou ICP superiores a 1, indicando poluição do solo, com valores

de 1,48, 1,07 e 1,08, respectivamente, na camada de 0-0,10 m. Exceto pelo tratamento com *Urochloa brizantha*, que apresentou um ICP de 0,54, os tratamentos com *Hemarthria altissima* (ICP = 1,22) e *Cynodon dactylon* (ICP = 1,11) indicaram níveis de poluição na camada de 0,10-0,20 m, refletindo a presença de contaminantes no solo.

4. CONCLUSÕES

Apesar da persistência da contaminação no solo, as gramíneas perenes, especialmente *Urochloa brizantha* e *Cynodon dactylon*, contribuíram de forma significativa para a melhoria da qualidade do solo, impactando positivamente a dinâmica de elementos potencialmente poluidores no solo a longo prazo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABLIZ, A.; IMIN, B.; ASAIDULI, H. Spatial patterns, possible sources, and risk assessment of soil potentially toxic elements in an open pit coal mining area in a typical arid region. **Sustainability**, [s.l.], v. 15, n. 12432, p. 1-15, 2023.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO (CQFS). **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: SBCSNRS, 2004. 400 p.
- EPA. **Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils**. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1996. Disponível em: <https://www.epa.gov/hw-sw846/sw-846-test-method-3050b-acid-digestion-sediments-sludges-and-soils>. Acesso em: 23 de setembro de 2024.
- MISHRA, A.; LAL, B. Fate of potentially toxic elements derived from coal mining in soil. **Water, Air, & Soil Pollution**, [s.l.], v. 235, n. 298, p. 1-32, 2024.
- RIO GRANDE DO SUL. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler – FEPAM. **Portaria nº 085/2014, de 29 de dezembro de 2014**. Estabelece diretrizes para o licenciamento ambiental no estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://www.fepam.rs.gov.br/upload/arquivos/202301/27114351-portaria085-2014.pdf>. Acesso em: 20 de setembro de 2024.
- STUMPF, L. **Atributos físicos e mecânicos de um solo construído em área de mineração de carvão em Candiota-RS, cultivado com diferentes espécies vegetais**. 2011. 124 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2011.
- STUMPF, L. **Desenvolvimento radicular de gramíneas perenes e sua eficiência na recuperação de atributos físicos de um solo construído compactado em área de mineração de carvão**. 2015. 122 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.
- THALASSINOS, G.; PETROPOULOS, S. A.; GRAMMENOU, A.; ANTONIADIS, V. Potentially toxic elements: a review of soil behavior and plant mitigation mechanisms against their toxicity. **Agricultura**, [s.l.], v. 13, n. 1684, p. 1-21, 2023.