

DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS DE CARVÃO COMO POTENCIAL FONTE PARA EXTRAÇÃO DE ELEMENTOS TERRAS RARAS

Vanessa Olivo Viola¹
Thiago Fernandes de Aquino¹
Beatriz Bonetti¹
Lucas Canarin Marcineiro¹
Agda Dutra Cardoso¹
Thalia Francesconi Macedo¹
Leonardo Dal Bó Tiscoski¹
Camila Generoso Amaral¹
William de Oliveira Sant Ana¹
Vanessa de Castro Barbosa¹
Leticia Possoli dos Santos¹
Marisa Nascimento²
Ysrael Marrero Vera²
Paulo Sergio Moreira Soares²

¹*Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina*

²*Centro de Tecnologia Mineral*

DOI: 10.47168/rbe.v30i3.945

RESUMO

A drenagem ácida de mina (DAM) é um passivo ambiental associado à extração e beneficiamento do carvão mineral. A lama proveniente do tratamento de DAM foi apontada como potencial fonte para extração de elementos terras raras (ETR) e pode significar uma nova receita a partir de um resíduo da mineração, ação alinhada aos objetivos de transição energética justa. Nesse contexto, 20 locais contaminados com DAM na região da Bacia Carbonífera de SC foram caracterizados quanto a presença desses elementos e em relação a suas características majoritárias. Vários destes apresentaram concentrações significativas de ETR, atingindo valores da ordem de 2,05 mg/L. De maneira geral, a concentração de ETR encontrada está diretamente ligada ao pH das amostras, sendo que quanto menor o pH, maior a concentração de ETR. Além disso, uma amostra foi processada em maior volume, a qual foi oxidada e precipitada (nas faixas de pH de 4,5-5,0 e 8,5-9,0). A precipitação em faixas concentrou o primeiro precipitado em ferro, e o segundo precipitado em manganês e elementos terras raras, confirmando sua faixa de precipitação para pHs mais elevados. Com concentração de 15267,1 mg/kg, a amostra foi levada para o processo de lixiviação e produção da solução enriquecida em ETR (denominada PLS). Essa solução apresentou concentração de cerca de 470 mg/L,

cerca de 400 vezes mais que a amostra de DAM inicial (1,14 mg/L), e é o produto final do beneficiamento da DAM, bem como material de entrada para a extração empregando a rota hidrometalúrgica convencional.

Palavras-chave: Carvão mineral; Drenagem Ácida de Mina; Elementos Terras Raras.

ABSTRACT

Acid mine drainage (AMD) is an environmental liability associated with the extraction and processing of mineral coal. Sludge from AMD treatment was identified as a potential source for the extraction of rare earth elements (REE) and could represent a new recipe from mining waste, an action aligned with the objectives of a fair energy transition. In this context, 20 sites contaminated with AMD in the Carboniferous Basin region of SC were characterized in terms of the presence of these elements and in relation to their main characteristics. Several of these presented significant concentrations of REE, reaching values of the order of 2.05 mg/L. In general, the REE concentration found is directly linked to the pH of the samples, with the lower the pH, the higher the ETR concentration. Additionally, a sample was processed in a larger volume, which was oxidized and precipitated (in the pH ranges of 4.5-5.0 and 8.5-9.0). The banded precipitation concentrated the first precipitate in iron, and the second precipitate in manganese and REE, confirming its precipitation band for higher pHs. With a concentration of 15267.1 mg/kg, the sample was taken to the leaching process and production of the solution enriched in ETR (called PLS). This solution had a concentration of around 470 mg/L, around 400 times more than the initial AMD sample (1.14 mg/L) and is the final product of AMD beneficiation and input material for extraction using the route conventional hydrometallurgy.

Keywords: Coal; Acid Mine Drainage; Rare Earth Elements.

1. INTRODUÇÃO

A mineração de carvão normalmente está associada com a formação da drenagem ácida de mina (DAM) decorrente da exposição e oxidação da pirita (FeS_2), causando significativo impacto ambiental pelo seu alto índice de contaminação (VASS et al. 2019). Durante a geração e migração da DAM, o ácido sulfúrico liberado, com seu baixo pH característico, mobiliza vários íons metálicos, o que faz com que a DAM seja rica em íons metálicos solúveis, com elevadas concentrações de sulfatos metálicos, como: FeSO_4 , CuSO_4 , ZnSO_4 e $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (SKOUSEN; SEXTONE; ZIEMKIEWICZ, 2015; ZHAO et al. 2007).

Os métodos de tratamentos de DAM convencionais produzem uma lama decorrente da precipitação desses contaminantes, que requer descarte em locais apropriados e gerenciamento a longo prazo. Esforços para reciclagem desse precipitado e para encontrar possíveis aplicações comerciais vêm sendo realizados, destacando-se como em pigmentos, dosagem de fósforo na agricultura e remediações de metais pesados. Mais recentemente, identificou-se que esses sólidos precipitados apresentam concentrações relevantes de elementos terras raras (ETR) e por isso tem sido propostos como potencial fonte para sua extração (WEI et al. 2019; STEWART et al. 2017).

Os ETR são um grupo de 17 elementos químicos considerados de importância estratégica para numerosas aplicações industriais, afetando diretamente diversos setores da economia global. Estão presentes em tecnologias de ponta, como: produção de energia limpa, refino de petróleo, armamentos militares avançados e dispositivos eletrônicos (CAO et al. 2018). Devido a necessidade desses elementos para a oferta de tecnologias verdes e dispositivos de eletrônicos, acredita-se que a demanda desses elementos também aumentará (HEDIN et al. 2019).

As preocupações acerca do fornecimento de ETR em relação às demandas levou ao aumento das pesquisas para recuperação desses elementos em produtos de finais de vida e a partir de fontes secundárias, como resíduos gerados na exploração do carvão, em rejeitos da combustão de carvão e na DAM (KING et al. 2018; PAN et al. 2019; TAGGART et al. 2016). Além dos motivos econômicos, a exploração de fontes alternativas é incentivada pois a mineração e o processamento dos depósitos de ETR acarretam frequentemente em consequências ambientais prejudiciais e custos operacionais elevados devido à eliminação e manuseamento de resíduos gerados (VASS et al. 2019).

Assim, avaliar a possibilidade de extração desses elementos críticos que apresentam elevado valor econômico pode ajudar a subsidiar o tratamento desse passivo ambiental, de forma a agregar valor econômico a esse resíduo, sendo uma maneira de estender o uso de recursos naturais e manter uma economia de desenvolvimento sustentável (WEI et al., 2019).

Diante disto, este trabalho têm como objetivo realizar a caracterização de DAM em diferentes pontos de mineração de carvão no estado de Santa Catarina, com foco na verificação da presença de ETR. Essa ação está alinhada aos esforços de transição energética justa, em que um passivo ambiental pode se tornar uma nova fonte de receita para a indústria do carvão.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Diversos estudos voltados à recuperação de ETR a partir de

fontes alternativas vêm sendo propostos, e a possibilidade de recuperação de ETR a partir de DAM pode contribuir para o tratamento de um importante problema ambiental (AYORA et al. 2015; HEDIN et al. 2019). Diversos autores relataram a presença de ETR em drenagem ácida de mina (DAM) e, dentre esses trabalhos, destaca-se um projeto desenvolvido pela West Virginia University (WVU), que faz parte do portfólio de projetos desenvolvidos pelo NETL (*National Energy Technology Laboratory, USA*), que visa a recuperação de ETR a partir de carvão e seus subprodutos. A planta, que já está em operação piloto, objetiva a recuperação de ETR e metais críticos a partir do lodo precipitado no tratamento de DAM, e é capaz de produzir uma mistura de óxidos de ETR com pureza de 90-99% (ZIEMKIEWICZ et al. 2022).

Relacionado ao cenário do estado de Santa Catarina (SC), sabe-se que a exploração do carvão ocorre na região Sul do estado e possui seis mineradoras atuando na extração e beneficiamento de carvão mineral, com produção anual de 6.152.365 toneladas de carvão ROM (*run of mine*), de acordo com dados de 2022 (SIECESC, 2024). Como consequência, a região possui depósitos de DAM com altas concentrações de metais pesados, com 194 bocas de minas e 1241 km de rios impactados pela ocorrência desta. Conforme dados do 11º Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais, no ano de 2017 foram tratados 6.248.267,41 m³ de DAM geradas nas unidades mineradoras de SC (ACP CARVÃO, 2018).

Dentro do contexto de extração de ETR a partir de DAM, uma avaliação com relação a presença de ETR em 20 pontos afetados e considerados críticos foi realizada, conforme apresentado na Figura 1.

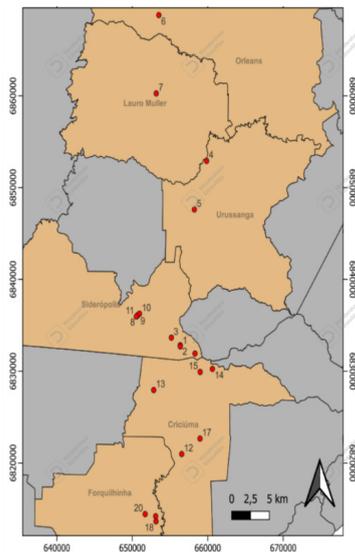


Figura 1 - Mapa com pontos de coleta de DAM

2.1 Materiais e métodos

2.1.1 Coleta e Caracterização das amostras DAM

Para cada ponto de análise foram coletadas as referências cartográficas para a elaboração do mapa, bem como realizadas as medições *in loco* dos parâmetros de condutividade, pH e vazão. Ademais, foram coletadas amostras para caracterização quanto a composição de metais majoritários (Al, Si, Mn, Mg, Fe, Ca) e quanto a presença do grupo de ETR, por emprego de análise em ICP-OES (Espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente) e ICP-MS (Espectrômetro de massa com plasma indutivamente acoplado), respectivamente.

Nesses mesmos locais, cerca de 2 L de amostra foram coletados para a simulação de um tratamento da DAM para a produção de lodo e análise quanto a presença de ETR. Para isso, a DAM foi oxidada com peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e o pH foi ajustado para 6,5-7,0 com o emprego de solução de hidróxido de sódio (NaOH) 1,0 M. Além disso, o sólido obtido também foi caracterizado por FRX (Florescência de Raios-X) para determinação da composição química majoritária do produto sólido obtido.

Por fim, todos os resultados foram compilados e as caracterizações podem servir para gerar possíveis correlações entre os resultados obtidos.

2.1.2 Ensaio de oxidação, precipitação e lixiviação

A metodologia empregada para extração de ETR a partir de DAM seguiu os mesmos passos adotados pela patente publicada pela WVU, em que o material é preparado até o ponto em que possa ser encaixado na rota hidrometalúrgica de extração, método este considerado o convencional. Para isso, a DAM bruta é oxidada e precipitada em diferentes faixas de pH, para separação dos principais metais que a compõem. Na sequência o sólido enriquecido em ETR é encaminhado para lixiviação, na qual espera-se que os ETR passem para o estado líquido (solução chamada de PLS - *Pregnant leach solution*) e que, por fim, possa ser encaminhado para a rota de extração (ZIEMKIEWICZ et al. 2022).

Assim, para continuidade dos ensaios, um local de coleta foi adotado como base, principalmente considerando a presença de ETR e as especificações de acordo com critérios que justifiquem a implementação de uma futura unidade e extração. Para avaliar o potencial desses pontos, critérios de exclusão foram adotados, sendo eles: vazão > 14 m³/h e concentração de ETR no lodo > 1000 mg/kg.

Referente às etapas de oxidação e precipitação, conforme

apresentado na Figura 2, inicialmente o material é oxidado para garantir que todo o ferro passe de Fe^{+2} para Fe^{+3} e precipite em faixas de pH diferente da faixa dos ETR. Assim, o pH é elevado para entre 4,5-5,0, para garantir que todo o ferro seja removido da solução e, uma vez precipitado, o material passa por filtragem para sua separação. A solução remanescente é tomada para que um novo ajuste de pH seja realizado, entre a faixa de 8,5-9,0, garantindo que todo o ETR e demais metais solúveis na solução precipitem em um segundo lodo. Ambos os materiais produzidos são caracterizados e quantificados em relação aos rendimentos, composição elementar majoritária (FRX) e presença de ETR (ICP-MS).

Na sequência, o segundo lodo precipitado é tomado para os ensaios de lixiviação. Como o rendimento dos testes de bancada são muito baixos, os testes para produção de maior massa de lodo são realizados em escala piloto, utilizando reator de 100 L.

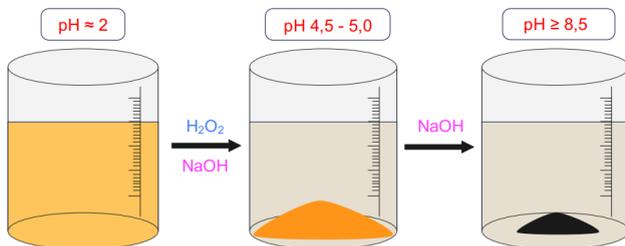


Figura 2 - Ensaios de precipitação da DAM em faixas de pH

A lixiviação ocorre com o emprego de ácido clorídrico (HCl) concentrado, e de acordo com os seguintes passos, conforme Figura 3: homogeneização do sólido em água e adição de HCl até $pH < 0,7$; dissolução por tempo controlado (avaliados em 1 e 24 h); ajuste de pH para faixa de 2,8-3,0 para precipitação e remoção de silício por filtração; obtenção da PLS.

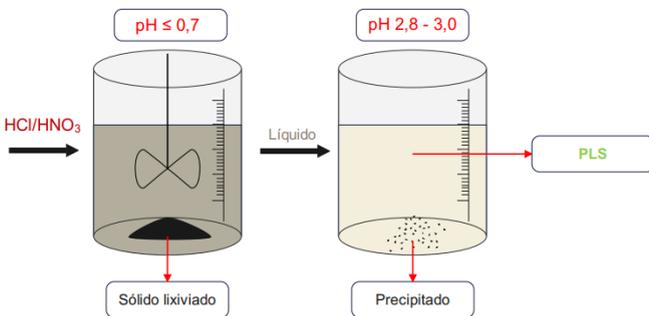


Figura 3 - Ensaio de lixiviação para obtenção da PLS

Uma vez que a lixiviação ocorre e a PLS é produzida, o material remanescente pode ser descartado, e a solução obtida é caracterizada quanto a concentração de ETR e dos principais metais lixiviados (Al, Fe, Si, Ca, Mn, Mg). A caracterização quanto a presença desses contaminantes é importante quando pensa-se na rota de extração empregando solventes orgânico, visto que irão interferir no seu desempenho.

2.2 Resultados

2.2.1 Coleta e Caracterização

A Tabela 1 apresenta um compilado dos principais resultados de caracterização obtidos para os 20 pontos coletados.

Tabela 1 – Caracterização das amostras de DAM

Ponto	pH	Condutividade (µS/cm)	Vazão (L/s)	Al (mg/L)	Ca (mg/L)	Fe (mg/L)	Mg (mg/L)	Mn (mg/L)	Si (mg/L)	ETR DAM bruta (mg/L)	Massa lodo precipitada (g)	ETR lodo (mg/kg)
1	2,71	2905	4,5	202,9	193,4	765,3	51,1	13,9	46,4	1,93	2,02	1272,8
2	2,81	826	21	20,9	43,8	22,7	14,6	3,7	16,6	0,12	0,13	1924,0
3	5,64	391	16	2,4	54,7	15,6	7,5	1,1	10,5	0,00	0,01	0,0
4	2,82	2578	56	192,5	168,4	241,8	75,0	29,3	43,9	1,49	1,15	2157,9
5	4,76	913	200	9,4	63,6	66,4	26,4	3,7	12,9	0,02	0,22	13,2
6	3,90	476	14	6,5	65,0	37,4	7,3	1,5	10,9	0,00	0,14	490,3
7	2,81	1299	1,0	40,0	25,1	329,0	5,4	2,2	17,4	0,71	0,78	1467,9
8	2,78	2401	-	68,8	272,8	405,2	67,7	16,5	18,1	0,80	0,95	1136,7
9	2,76	2588	-	76,4	271,4	457,8	67,4	17,7	19,0	1,06	1,17	1559,2
10	2,78	2864	-	88,5	287,5	539,7	72,2	20,1	22,3	1,04	1,40	1173,3
11	2,81	3064	341	100,1	354,2	674,7	86,9	21,8	19,7	1,14	1,59	1142,7
12	6,23	3228	5	<0,1	534,9	69,7	44,4	2,1	10,0	0,00	0,10	27,1
13	5,83	1144	-	0,1	145,4	63,5	12,0	2,6	13,7	0,00	0,04	0,0
14	2,91	1060	-	26,0	61,0	11,6	18,2	1,4	20,0	0,11	0,09	1756,1
15	2,83	1265	57	38,6	38,5	1265,0	10,5	3,7	17,1	0,30	0,25	1820,2
16	2,75	1724	4	43,5	61,7	116,6	19,6	4,6	18,5	0,31	0,35	1120,2
17	6,39	933	46	<0,1	110,7	37,2	25,9	1,8	11,7	0,00	0,02	0,0
18	2,92	11170	<1	305,8	543,9	4756,0	215,3	45,8	37,2	2,05	9,07	372,7
19	2,62	2871	9,0	104,2	158,9	266,6	20,0	3,4	30,6	0,41	0,78	766,7
20	2,30	4327	-	167,4	168,3	768,5	18,3	8,0	25,2	0,67	1,78	600,0

De maneira geral, observa-se que a presença de ETR na DAM está diretamente ligada ao pH do meio, sendo que cinco pontos que apresentaram pH > 3 (pontos 3, 5, 6, 12, 17) obtiveram concentração de ETR nula ou próximas a isso. Esses resultados corroboram com os apresentados pelos autores Stewart et al. (2017), que avaliaram a

precipitação dos ETR a partir de DAM de carvão em 18 amostras e observaram que quanto mais baixo o pH das amostras, maior a concentração dos elementos terras raras.

Esse resultado sustenta também as faixas de oxidação e precipitação dos metais, visto que, conforme Verplank et al. (2004), a extensão do particionamento dos ETRs e outros metais para as fases sólidas é forte função do pH, sendo que quanto menor o pH, maior a quantidade de metais dissolvidos, incluindo ETRs. Assim, sabe-se que para sua precipitação a partir da DAM, é necessário que o meio esteja com pHs mais elevados.

Em relação a concentração de ETR presente na DAM bruta, os valores ficaram nas faixas de 0,0 – 2,05 mg/L, sendo esses consistentes com os apresentados por literaturas, como 0,054 mg/L a 0,069 µg/L (ZHAO et al. 2007); 3,5 e 7,9 µg/L (AYORA et al. 2016); 1,134 µg/L (SKOUSEN; SEXSTONE; ZIEMKIEWICZ, 2015). Destaca-se também o valor apresentado pela patente americana adotada como referência, que adota faixas de concentrações de 0,23 a 2,00 mg/L (ZIEMKIEWICZ et al. 2022).

Já para os metais presentes na DAM, alguns se apresentaram de forma padrão, como o Mn, Mg, Ca e Si, não apresentando nenhuma correlação com a presença dos ETRs. Já para o Fe e o Al, observa-se uma certa tendência a presença desses elementos, conforme a concentração de Fe e Al aumentam.

Com isso, considerando estas características e o potencial de cada ponto estudado, a Lagoa Língua do Dragão (ponto 11) foi considerada para desses ensaios, por atender os critérios citados e devido ao seu elevado impacto regional.

2.2.2 Ensaios de oxidação e precipitação

Na Tabela 2 são apresentadas as composições químicas majoritárias em base de óxidos dos dois precipitados produzidos após os ajustes de pH da DAM coletada no ponto 11. Os resultados corroboram com o esperado pela faixa de precipitação desses elementos. De acordo com Hedin et al. (2019), na presença de oxigênio oxida em Fe^{+3} , e o $Fe(OH)_3$ forma um sólido laranja-amarelado que precipita em $pH > 3,5$. Isso é observado para as amostras, em que todo o ferro se concentra no primeiro precipitado, de pH 4,5-5,0.

Para os 100 L de DAM processados, o rendimento foi de 173 g do primeiro precipitado e 23 g do segundo precipitado. Esses rendimentos são característicos para o material, principalmente devido a elevada concentração de ferro frente aos demais metais.

Além disso, os autores também trazem que a precipitação do hidróxido de alumínio ocorre em $pH > 5$ e a do manganês é variável devido aos seus muitos estados de oxidação, mas geralmente precipita a

um pH de 9,0 a 9,5 (AYORA et al. 2016; HEDIN et al. 2019; WEI et al. 2019). Isso justifica o fato de o alumínio estar distribuído entre as duas faixas de precipitação, e de que o segundo precipitado se concentrar em manganês.

Tabela 2 – Composição química dos precipitados após os ajustes de pH na DAM

Elemento (%)	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO	ZnO	Outros	PF
pH 4,5-5,0	53,75	7,49	1,16	0,15	0,10	0,09	0,04	0,03	0,01	37,18
pH 8,5-9,0	0,00	15,42	19,86	3,82	1,48	0,78	26,87	5,37	2,13	24,27

Na Tabela 3 a concentração de ETR nesses sólidos é apresentada. Novamente, o comportamento foi característico ao apresentado em literatura por outros autores, pois pode-se observar a elevada concentração de ETR no precipitado na maior faixa de pH. Esse aumento na concentração ocorre principalmente devido a remoção do ferro na primeira faixa de precipitação.

Tabela 3 – Concentração de ETR por faixa de pH precipitado

Elemento (mg/kg)	pH 4,5-5,0	pH 8,5-9,0	Elemento (mg/kg)	pH 4,5-5,0	pH 8,5-9,0	Elemento (mg/kg)	pH 4,5-5,0	pH 8,5-9,0
Ce	78,5	4110,4	La	16,2	1305,6	Tb	2,7	121,9
Dy	14,9	673,4	Lu	0,6	23,0	Tm	0,9	32,8
Er	5,9	288,4	Nd	68,9	2615,2	Y	47,3	3396,0
Eu	4,4	160,1	Pr	14,1	567,4	Yb	5,5	180,0
Gd	19,7	940,6	Sc	6,0	13,1	ETR	309,3	15267,1
Ho	2,6	118,5	Sm	21,2	720,8			

Os resultados são consistentes com o que apresentam Ayora et al. (2016), que passaram DAM em uma coluna e avaliaram a concentração de ETR cair de 7,9 mg/L para 0,01 mg/L, estando principalmente associada ao pH próximo de 6. Como também por Verplanck et al. (2004) que determinaram a faixa de pH de 5,1 e 6,6 para remoção da solução. O mesmo foi confirmado por Hedin et al. (2019), que avaliaram que com a elevação do pH > 6, mais de 90% dos ETR dissolvidos foram removidos na precipitação, de modo a produzir um concentrado com concentração acima de 1950 ppm. Para a patente, a concentração no sólido precipitado foi de 1163,8 mg/kg.

Ainda, apesar de ter a presença de ETR correlacionada com o ferro, Verplanck et al. (2004) documentam através de experimentos que, abaixo de um pH de 5, os ETRs se comportam de maneira conservadora mesmo com a precipitação do ferro.

2.2.3 Lixiviação

Na Tabela 4 são apresentados os resultados de ETR na solução de PLS obtidas pela lixiviação do segundo precipitado (15267,1 mg/kg).

Tabela 4 – Concentração de ETR na solução final de PLS

Elemento (mg/L)	1 h	24 h	Elemento (mg/L)	1 h	24 h	Elemento (mg/L)	1 h	24 h
Ce	82,00	88,00	La	50,68	51,83	Tm	1,25	1,32
Dy	24,08	25,00	Lu	1,01	1,07	Y	124,83	126,00
Er	10,41	10,99	Nd	79,00	88,00	Yb	6,80	7,20
Eu	5,53	5,78	Pr	19,70	20,57	ETR	470,70	494,80
Gd	31,00	34,00	Sm	24,90	25,00			
Ho	4,53	4,76	Tb	4,98	5,27			

Observa-se que o aumento no tempo de lixiviação de 1 h para 24 h não trouxe benefícios que justifiquem o emprego de mais tempo. Já em relação a patente, a concentração da PLS obtida foi de 49,49 mg/L, estando a obtida neste trabalho cerca de 10 vezes maior, devido também a maior concentração do precipitado de partida.

Em relação a concentração de ETR inicialmente presente na DAM, de cerca de 1,14 mg/L, houve um aumento para 470 mg/L, concentrando os ETR em cerca de 400 vezes na solução que será encaminhada para a extração por solvente.

3. CONCLUSÃO

Das 20 amostras avaliadas de DAM da região carbonífera de Santa Caarina, 13 apresentaram concentrações de ETR expressivas, estando normalmente associadas às amostras de menor pH e também com as concentrações de ferro e alumínio. Os ensaios de oxidação e precipitação, em diferentes faixas, concentraram o primeiro precipitado em ferro e o segundo precipitado em manganês e elementos terras raras, confirmando sua faixa de precipitação para pHs mais elevados. Apesar do menor rendimento mássico, o segundo precipitado apresentou concentração na ordem de 15267,1 mg/kg. A lixiviação desse sólido produziu a PLS, que ficou com concentração final de 470 mg/L, mais de 400 vezes maior que a amostra de DAM inicial (1,14 mg/L). Esses resultados são promissores do ponto de vista tecnológico. Ressalta-se que essa possível aplicação está vinculada diretamente aos princípios de transição energética justa, uma vez que o uso da DAM pode, além de contribuir com causas ambientais, gerar um novo mercado para o setor carbonífero brasileiro, influenciando positivamente também no meio social.

4. AGRADECIMENTOS

A FAPESC pelo aporte financeiro para desenvolvimento deste projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACP Carvão. 12º Relatório de Monitoramento do Indicadores Ambientais, 2018. Disponível em: <https://acpcarvao.com.br/forum/showthread.php?tid=25>. Acesso em: 10 jun. 2024.

AYORA, C. et al. Rare Earth Elements in Acid Mine Drainage. XXXV Reunión de la Sociedad Española de Mineralogía, v. 2016, n. S3, p. 1–22, 2015.

AYORA, C. et al. Recovery of Rare Earth Elements and Yttrium from Passive-Remediation Systems of Acid Mine Drainage. *Environmental Science and Technology*, v. 50, n. 15, p. 8255–8262, 2016.

CAO, S. et al. Study on Influence Factors of Leaching of Rare Earth Elements from Coal Fly Ash. *Energy and Fuels*, v. 32, n. 7, p. 8000–8005, 2018.

HEDIN, B. C. et al. The evaluation of critical rare earth element (REE) enriched treatment solids from coal mine drainage passive treatment systems. *International Journal of Coal Geology*, v. 208, n. January, p. 54–64, 2019.

KING, J. F. et al. Aqueous acid and alkaline extraction of rare earth elements from coal combustion ash. *International Journal of Coal Geology*, v. 195, n. March, p. 75–83, 2018.

PAN, J. et al. Study on the modes of occurrence of rare earth elements in coal fly ash by statistics and a sequential chemical extraction procedure. *Fuel*, v. 237, n. October 2018, p. 555–565, 2019.

SIECESC. Carvão Mineral – Dados Estatísticos, 2022. Disponível em: https://www.siecesc.com.br/dados_estatisticos. Acesso em: 10 jun. 2024.

SKOUSEN, J. G.; SEXSTONE, A.; ZIEMKIEWICZ, P. F. Acid Mine Drainage Control and Treatment. n. 41, p. 131–168, 2015.

STEWART, B. W. et al. Rare earth element resources in coal mine drainage and treatment precipitates in the Appalachian Basin, USA. *International Journal of Coal Geology*, v. 169, p. 28–39, 2017.

TAGGART, R. K. et al. Trends in the Rare Earth Element Content of U.S.-Based Coal Combustion Fly Ashes. *Environmental Science and Technology*, v. 50, n. 11, p. 5919–5916, 2016.

VASS, C. R.; NOBLE, A.; ZIEMKIEWICZ, P. F. The Occurrence and Concentration of Rare Earth Elements in Acid Mine Drainage and Treatment Byproducts. Part 2: Regional Survey of Northern and Central Appalachian Coal Basins. *Mining, Metallurgy & Exploration*, v. 36, p. 917–929, 2019.

VERPLANK, P. L.; NORDSTROMA, D. K.; TAYLORA, H. E.; KIMBALLB, B. A. Rare earth element partitioning between hydrous ferric oxides and acid mine water during iron oxidation. *Applied Geochemistry*, v.19, p. 1339–1354, 2004.

WEI, X. et al. Mine drainage: Treatment technologies and rare earth elements. *Water Environment Research*, v. 91, n. 10, p. 1061–1068, 2019

ZHANG, W.; YANG, X.; HONAKER, R. Q. Association characteristic study and preliminary recovery investigation of rare earth elements from Fire Clay seam coal middlings. *Fuel*, v. 215, p. 551–560, 2018.

ZHAO, F. et al. The geochemistry of rare earth elements (REE) in acid mine drainage from the Sitai coal mine, Shanxi Province, North China. *International Journal of Coal Geology*, v. 70, n. 1- 3 SPEC. ISS., p. 184–192, 2007.

ZIEMKIEWICZ, Paul F. CONSTANT, James F. HOFFMAN, D. K. QUARANTA, J.D. Systems and Process for Recovery of High-grade Rare Earth Concentrate from Acid Mine Drainage. Depositante: West Virginia University. US2022/0340997. Depósito: 28 mar. 2022. Concessão: 27 out. 2022.