

REMEDIÇÃO DA DRENAGEM ÁCIDA DA MINA DE URÂNIO OSAMU UTSUMI (MG) COM BIOCÁRVÕES EM BARREIRA REATIVA PERMEÁVEL EM LABORATÓRIO

Data de Submissão 12/03/2024

Data de aceite: 01/04/2024

Camila de Campos Souza

Instituto de Geociências / Unicamp
Campinas-SP
<http://lattes.cnpq.br/0243234320162336>

Aline Renee Coscione

Instituto Agrônômico - IAC/SP
Campinas-SP
<http://lattes.cnpq.br/1566386847094104>

Heber Luiz Caponi Alberti

LAPOC/CNEN
Poços de Caldas-MG
<http://lattes.cnpq.br/2365344976458204>

Rodrigo Leandro Bonifacio

LAPOC/CNEN
Poços de Caldas-MG
<http://lattes.cnpq.br/8182447113654932>

Ricardo Perobelli Borba

Instituto de Geociências / Unicamp
Campinas-SP
<http://lattes.cnpq.br/1543462300385756>

de materiais. Nesse contexto neste trabalho foram testados biocárvoes de casca de eucalipto (BCEuc) e de bagaço de cana (BCCana) no tratamento da DAM da mina de Urânio Osamu Utsumi (MOU). Os testes foram realizados em laboratório por meio da percolação da DAM em colunas contendo os biocárvoes. Os biocárvoes foram analisados por difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise imediata, espectroscopia no infravermelho (FTIR) e digestão parcial das cinzas pelo método USEPA 3051. As soluções dos experimentos foram analisadas por espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) e espectrometria de massa com fonte de plasma (ICP-MS). As massas de biocárvoes necessárias para a neutralização do pH da DAM de pH=3,77 a pH=5 pelos biocárvoes foi ~27.7 kg BCEuc/m³ DAM e de ~50kg BCCana/m³ DAM. Houve a retenção total de Th, e parcial de As, U da DAM. Foram identificados precipitados de terras raras nos biocárvoes após as percolações. Se a capacidade de neutralização é pequena, a retenção total do Th, e parcial do U e As indicam um potencial do uso dos biocárvoes para a remoção destes íons de soluções.

PALAVRAS-CHAVE: biocárvão; remediação; drenagem ácida de mina, urânio, terras raras

RESUMO: A pesquisa de materiais alternativos ao tratamento da drenagem ácida de mina (DAM), seja para a neutralização da acidez ou para a remoção de elementos potencialmente tóxicos tem sido realizada tanto na busca de redução de custos, aumento de eficiência ou reciclagem

REMEDIATION OF MINE ACID DRAINAGE FROM THE OSAMU UTSUMI URANIUM MINE (MG) WITH BIOCHARS IN A PERMEABLE REACTIVE BARRIER IN THE LABORATORY

ABSTRACT: The search for alternative materials to the treatment of acid mine drainage (AMD), either for the neutralization of acidity or for the removal of potentially toxic elements, has been carried out in the search for cost reduction, increased efficiency or material recycling. In this context, in this work, biochars from eucalyptus bark (BCEuc) and sugarcane bagasse (BCCana) were tested in the treatment of AMD at the Osamu Utsumi Uranium mine (MOU). The tests were carried out in the laboratory by percolating the AMD in columns containing the biochars. The biochars were analyzed by XRD, SEM, immediate analysis, infrared spectroscopy (FTIR) and partial ash digestion by the USEPA 3051 method. The experimental solutions were analyzed by inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES) and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The mass of biochars required for neutralizing the pH of the AMD from pH=3.77 to pH=5 by the biochars was ~41 kg BCEuc/m³ AMD and ~83kg BCCana/m³ AMD or BCCana. There was total retention of Th, and partial retention of As, U and rare earths from AMD. Rare earth precipitates have been identified in biochars after percolation. If the neutralizing capacity is small, the retention of total Th, and partial retention of U and As indicate a potential for using biochars to remove these ions from solutions.

KEYWORDS: biochar, remediation, acid mine drainage, uranium, rare earth elements

INTRODUÇÃO

A mina de Osamu Utsumi (MOU) ocorre em rochas vulcânicas do Complexo Alcalino de Poços de Caldas na região de Caldas. Estas rochas estão mineralizadas em U, Mo, Yh, Th e terras raras (Holmes et al., 1992 e Fraenkel et al., 1985). O Complexo Alcalino de Poços de Caldas possui rochas intrusivas, nefelina-sienitos, e extrusivas, tinguaitos e fonólitos. Processos hidrotermais promoveram a formação dos depósitos minerais nestas rochas. No complexo são encontradas rochas com altos teores de Ti, minerais de Mo, zirconita, pirita e fluorita (Fraenkel et al., 1985).

Na jazida da MOU o U ocorre como uraninita [UO₂] e coffinita [U(SiO₄)^{1-x}(OH)_{4x}]. Além destes minerais ocorrem nas rochas mineralizadas galena (PbS), esfalerita (ZnS), pirita (FeS₂), fluorita (CaF₂), jordisita (MoS₂), baddeleíta (ZrO₂) e zirconita (ZrSiO₄) (Oliveira (1974) apud Tedeschi (2005)).

A exploração de U na MOU (Fig. 1) ocorreu entre os anos 1982 e 1995. A extração e beneficiamento do minério levou a geração de passivos ambientais, dentre os que persistem até os dias de hoje, destacando-se a geração da drenagem ácida a partir de pilhas de estéril (Fig. 2). A contaminação de drenagens e águas subterrâneas é o maior risco associado a esse passivo, que pode atingir a população do entorno (Alberti, 2017).



Figura 1. Vista Geral da Mina Osamu Utsumi e sua cava inundada. (Extraído de Alberti, 2017).

A drenagem ácida de mina (DAM) da MOU é proveniente da oxidação de sulfetos presentes nas seis pilhas de estéril, que totalizam cerca de 45 milhões de m³ de material de decapagem e triagem de corpos de minério. Foram dispostos 2.395.820 ton de rejeitos contendo pirita depositados em pilhas de estéreis denominados bota-foras (BF's). Mensalmente há a produção de cerca de 130000m³ de DAM associados a estes BF's. A maior dessas pilhas é o Bota Fora 4 (BF4), que ocupa 56,9 ha e contém 12,4 milhões m³ de estéril, com altura de talude de 90 metros (Fig. 2). O BF4 produz cerca de 80000m³/ mês de DAM (Cipriani, 2002).



Figura 2. Vista do BotaFora 4 (BF4) e da surgência da DAM na base da BF4. (Extraído de Alberti, 2017).

O tratamento da DAM da MOU é realizado por meio da adição de cal hidratada e floculante (Cipriani, 2002). Como forma de reutilização de materiais e minimização do custo do tratamento da DAM são pesquisados tanto o uso de resíduos de processos industriais como escória de fornos, lama vermelha de alumínio, cinzas de carvão (Kaksonen e Puhhaka, 2007; Fungaro e Izidoro, 2006); mineralização por injeção de CO_2 (Hassas et al., 2020) como o reuso de água e recuperação de recursos presentes na DAM (Naidu et al., 2019; Acharya e Kharel, et al., 2020). Nesse contexto o biocarvão, produto da queima de biomassa na presença de pouco ou nenhum oxigênio em um processo chamado pirólise, possui características interessantes como elevada área superficial e porosidade que permitem a esse material a capacidade de adsorção de elementos e seu possível uso como agente na remediação de drenagem ácida de mina (Lehmann e Joseph, 2009).

OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi avaliar a capacidade de remediação da DAM da mina Osamu Utsami, da INB no município de Caldas (MG) em experimentos de laboratório utilizando-se os biocarvões de bagaço de cana de açúcar (BCCana) e de casca de eucalipto (BCEuc).

MATERIAIS E MÉTODOS

Testes de Percolação

Os testes de remediação da DAM da MOU foram feitos lixiviando-se a mesma em colunas no laboratório. A DAM foi percolada em 2 colunas preenchidas com BCEuc e BCCana (Fig. 3).



Figura 3. Coluna preenchida com biocarvão (A). Em (B) aparato experimental com bomba peristáltica e coletor de frações.

Os biocarvões foram produzidos pelo método da pirolise rápida (2 a 4s) em ambiente controlado com temperatura de 470 a 500 °C, pela empresa Bioware. A DAM foi coletada no BF4 da MOU.

As lixiviações foram realizadas em colunas de acrílico com volume de 55 ml (Fig. 3), diâmetro de 2 centímetros e altura de 11 centímetros. Foram utilizados 5g de cada biocarvão em cada coluna, misturados a 20g de areia. O volume de poros (V_p) das colunas foi de 21,8 mL (BCEuc) e 22,7 mL (BCCana). A DAM foi bombeada nas colunas em fluxo ascendente por 24h com uma vazão de 1mL/min. As soluções percoladas foram coletadas continuamente em tubos de centrifuga com volumes de 12 mL. O volume total de DAM percolado pelas colunas foi de 1,7L na coluna BCEuc e de 1,5L pela coluna BCCana.

As soluções coletadas foram filtradas em membrana de 0.45 μ m e aciduladas com HNO_3 . Essas soluções foram analisadas por espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) e espectrometria de massa com fonte de plasma (ICP-MS) para o U e o Th, além de ter seus parâmetros físico-químicos determinados em alíquotas não aciduladas.

Caracterização Dos Biocarvões

Foi realizada a análise elementar CHN e análise imediata de amostras biocarvão pela Central Analítica da Unicamp.

A caracterização química dos biocarvões foi feita por meio do método 3051 da United States Environmental Protection Agency (USEPA, 1994). Neste ensaio a amostra tem uma digestão parcial, que mimetiza a extensão máxima de liberação de íons metálicos para o ambiente do material ensaiado.

Os sólidos cristalinos foram identificados por difração de raios X (DRX), antes e após os experimentos, no difratometro Bruker D2PHASER com tubo de cobre, com slit primário de 0,6mm, faca de 3mm, com corrente com 30 kV e 10 mA. O passo foi de 0,02°/s e a varredura 2θ variando de 5° até 72°.

Após os experimentos os biocarvões foram examinados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) no equipamento marca Leo, modelo 430. As configurações de funcionamento foram as seguintes: energia do feixe de elétrons entre 300 V e 20 kV e distância entre a amostra e o detector de 19 mm. Foram feitas análises usando um espectrômetro de energia dispersiva (EDS).

Os grupos funcionais presentes nos biocarvões foram determinados por meio de espectroscopia no infravermelho (FTIR).

RESULTADOS

Características dos biocarvãos e da DAM

O BCEuc e o BCCana possuem propriedades físicas e químicas contrastantes, a saber: CTC (mmol/kg) 445 e 313; pH 7,9 e 6,5; o teor de cinzas (% m/m) 12,4 e 26,3; respectivamente. Os compostos cristalinos com estruturas de minerais identificados por DRX no foram BCEuc o quartzo e o grafite e no BCCana o quartzo e a silvita. O exame dos biocarvãos no MEV identificou apenas compostos de SiO_2 e C. Nos interferogramas do BCEuc e do BCCana foram identificados os grupos funcionais: OH, C-H, C=C, C=O, C-O-C em ambos biocarvãos (Fig. 4).

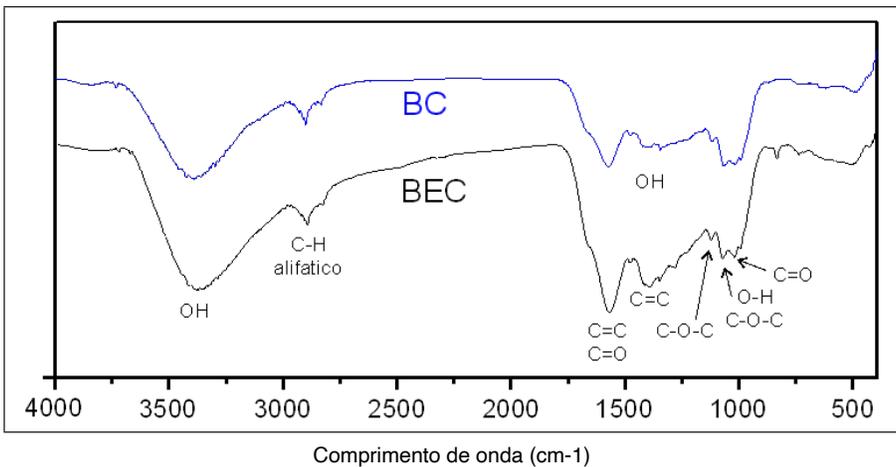


Figura 4 – Espectros de Infravermelho dos biocarvãos BCCana (BC) e BCEuc (BEC).

A DAM da BF4 apresentou pH 3,77, condutividade elétrica=1124 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ e Eh=457,9 mV. Os principais íons encontrados na DAM foram Al, Ca, Mn, Zn, K, Na, As e Se (Tabela 1).

ion	Al	As	Ca	K	Mg	Mn	Na	Se	SO ₄	Zn	U	Th	La	Ce	Nd
(mg.L ⁻¹)	124,4	0,9	110,1	9,4	6,6	92,3	3,2	0,1	116,5	12,9	4,5	0,09	32,1	23,5	8,1

Tabela 1: Características físico-químicas e Composição química das amostras de drenagem ácida de mina da Mina Osamu Utsami – INB Caldas (MG)

Os principais íons solubilizados nos biocarvãos após a aplicação do método EPA-3051a foram para o BCCana: K, Fe, Ca, Al, P e S e para o BCEuc: K, Fe, Ca, Al, Mg, P e S (Tabela 2). Com relação aos elementos traço os valores mais elevados encontrados no BCCana foram de Na, Mn, Ba, Zn, Pb, Cr e Cu já BCEuc o Na, Mn, Ba, Zn, Cr, Fe, B e Cu foram os principais traços encontrados.

Elemento	mg.kg ⁻¹		mg.kg ⁻¹	
	BCCana		BCEuc	
	Média	σ (n=3)	Média	σ (n=3)
Al	4301,7	721,5	367,5	8,9
As	1,3	1,8	4,3	1,1
Ba	128,4	5,0	64,6	3,7
Ca	4477,2	230,8	6446,2	284,5
Pb	28,3	1,3	7,4	0,1
Cu	11,1	0,2	10,3	0,1
Cr	17,3	4,1	27,4	0,1
S	915,8	66,1	814,3	0,8
Fe	4841,9	410,3	20,8	1,8
P	1524,8	50,9	2675,2	39,9
Mg	2033,5	150,7	2987,1	62,5
Mn	164,4	9,4	121,0	0,2
K	14433,9	14,0	41187,8	868,4
Na	239,0	0,0	288,3	0,1

Tabela 2 – Composição química dos biocarvões de bagaço de cana e casca de eucalipto utilizados no experimento

Experimentos de Percolação

A neutralização da acidez da DAM (pH=3,77) pelos biocarvões foi relativamente baixa, em termos de volume de solução neutralizada com pH igual a 5. O BCEuc conseguiu neutralizar cerca de 180 mL (~27,7 kg BCEuc/m³ DAM) e o BCCana neutralizou cerca de 100 mL apenas (~50kg BCCana/m³ DAM). Em ambos os experimentos o pH ficou estável um pouco acima do pH da DAM, em torno de 4,2 (Fig. 5A).

Com relação aos íons presentes na DAM, houve a retenção total de Th por ambos os biocarvões (0,16mg pelo BCEuc e 0,15mg pelo BCCana). Para o As, U e o Zn a capacidade de retenção do BCEuc foi superior à do BCCana (Tabela 3 e Figs. 5b, 5c e 5D). Os demais elementos (Al, Ca, K, Mg, Mn e Na) apresentaram um valor liberado superior ao que foi percolado pela DAM. Isso se deve ao fato destes elementos estarem presentes nas cinzas dos biocarvões, identificados por meio do ensaio de solubilidade das cinzas EPA3051 (Tabela 1).

BCEuc	Massas	Al	As	Ca	K	Mg	Mn	Na	Zn	U
	Adicionada DAM (mg)	208,0	1,5	151,9	17,3	11,3	114,5	6,4	22,6	7,9
	Percolada (mg)	219,2	1,3	217,1	41,2	11,3	148,7	7,8	18,4	2,9
	retida	-11,2	0,2	-65,2	-23,9	0,0	-34,2	-1,4	4,1	5,0
	% retida	-5,4	14,5	-43	-139	-0,4	-29,9	-22	18,4	63,1
BCCana	Cinzas (mg/kg)	367	4.3	6446	41187	2987	121	288	56	0
	Adicionada DAM (mg)	183,3	1,4	133,9	15,2	9,9	100,9	5,7	19,9	6,8
	Percolada (mg)	202,3	1,2	169,0	37,0	11,0	131,2	6,2	16,8	5,4
	retida	-19,0	0,1	-35,1	-21,8	-1,0	-30,3	-0,5	3,1	1,3
	% retida	-10,4	10,8	-26,2	-143	-11	-30,1	-9,5	15,5	20,3
	Cinzas (mg/Kg)	4301	1.3	4477	14433	2033	164	239	104	0

[1] Os valores negativos na tabela representam elementos que saíram em concentrações maiores do que a solução de entrada, provavelmente por estarem tanto na DAM como nos materiais reativos. [2] massa percolada = massa total contida na solução coletada da coluna. [3] massa retida = massa adicionada pela DAM - massa percolada. [4] Th = todas as medidas após o tratamento se mostraram abaixo dos limites de detecção do equipamento.

Tabela 3: Balanço de massa do tratamento da DAM pelos materiais reativos.

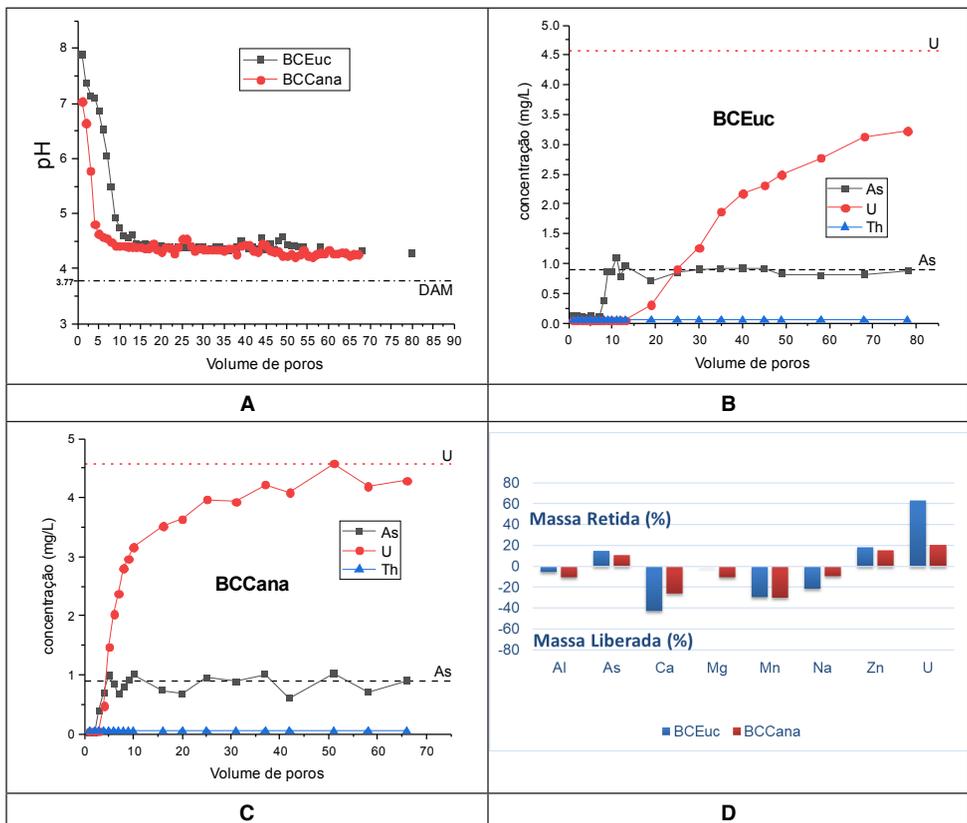


Figura 5 – Capacidades de neutralização da DAM pelos biocarvões (A) e de retenção de As, U e Th (B, C) ao longo da lixiviação. A capacidade total de retenção ou liberação é apresentada em (D).

As assinaturas dos grupos funcionais nos interferogramas de ambos biocarvões permaneceram inalteradas após a percolação, indicando não ter havido uma obliteração total destes sítios devidos à adsorção.

O exame por MEV dos biocarvões (Fig. 6) após os experimentos de percolação identificou diversos compostos precipitados. No BCEuc foram identificados precipitados de CaSO_4 com Al, K, Sr, La, e Ce; e possivelmente BaSO_4 . No BCCana foram identificados CaSO_4 e um composto com C, O, P, Ce, La e Nd. Aliado à adsorção, a precipitação foi um mecanismo importante na retenção dos íons.

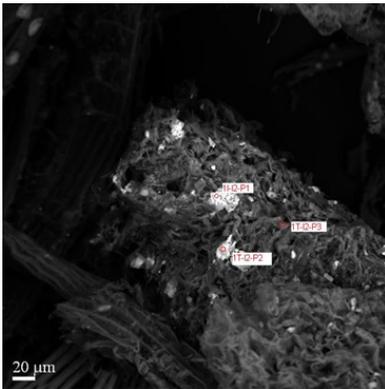
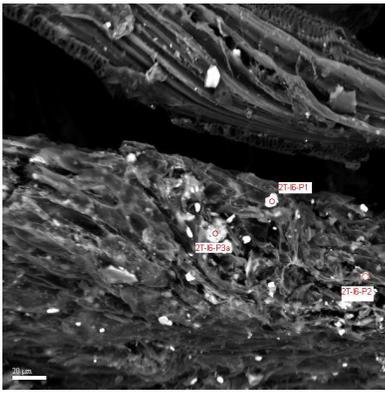
 <p style="text-align: center;">A</p>	<p style="text-align: center;">Ponto 1</p> <p style="text-align: center;">Elmt Spect. Element Atomic Type % %</p> <p>O K ED 30.58 50.50</p> <p>Si K ED 20.96 19.72</p> <p>S K ED 19.13 15.76</p> <p>K K ED 4.32 2.92</p> <p>Ca K ED 13.56 8.94</p> <p>La L ED 6.51 1.24</p> <p>Ce L ED 4.95 0.93</p> <p>Total 100.00 100.00</p>	<p style="text-align: center;">Ponto 2</p> <p style="text-align: center;">Elmt Spect. Element Atomic Type % %</p> <p>O K ED 23.38 46.03</p> <p>Na K ED 0.35 0.47</p> <p>Al K ED 0.93 1.09</p> <p>Si K ED 0.44 0.49</p> <p>S K ED 25.02 24.58</p> <p>K K ED 6.98 5.62</p> <p>Ca K ED 21.02 16.52</p> <p>Sr L ED 1.88 0.68</p> <p>La L ED 11.03 2.50</p> <p>Ce L ED 8.97 2.02</p> <p>Total 100.00 100.00</p>
 <p style="text-align: center;">C</p>	<p style="text-align: center;">Ponto 1</p> <p style="text-align: center;">Elmt Spect. Element Atomic Type % %</p> <p>C K ED 27.60 48.02</p> <p>O K ED 30.92 40.38</p> <p>P K ED 10.01 6.75</p> <p>Ca K ED 0.44 0.23</p> <p>La L ED 8.28 1.24</p> <p>Ce L ED 16.95 2.53</p> <p>Nd L ED 5.81 0.84</p> <p>Total 100.00 100.00</p>	<p style="text-align: center;">Ponto 2</p> <p style="text-align: center;">Elmt Spect. Element Atomic Type % %</p> <p>C K ED 35.85 47.83</p> <p>O K ED 42.23 42.31</p> <p>Na K ED 0.31 0.21</p> <p>Si K ED 0.53 0.30</p> <p>S K ED 9.28 4.64</p> <p>K K ED 2.36 0.97</p> <p>Ca K ED 9.07 3.63</p> <p>Fe K ED 0.37 0.11</p> <p>Total 100.00 100.00</p>

Figura 6 - Imagens de elétrons retroespalhados do BCEuc (A) e do BCCana (C) onde se observam estruturas vegetais preservadas, e os pontos da análise quantitativa de sólidos precipitados após o tratamento da DAM (B e D).

DISCUSSÕES

Segundo Fidel et al. (2017) a capacidade de neutralização de acidez dos biocarvões depende das cinzas (compostos inorgânicos nelas presentes, constituídos por sais de carbonatos e bicarbonatos, óxidos, hidróxidos, sulfatos e ortofosfatos sais alcalinos inorgânicos) e dos grupos funcionais de superfície. Os processos responsáveis pela neutralização da DAM envolvem tanto a protonação dos grupos funcionais de superfície como a solubilização das cinzas e liberação de bases inorgânicas. Apesar do BCCana possuir o dobro do teor de cinzas em relação ao BCEuc, o BCEuc neutralizou a acidez (pH superior a 5,5) com maior eficiência que BCCana. Nos experimentos o BCEuc neutralizou 6vp (31kg BCEuc/m³ DAM), enquanto o BCCana foi capaz de neutralizar apenas 3vp (83kg BCCana/m³ DAM). Esta diferença na capacidade de neutralização pode ser explicada pela CTC e o pH em água, que no BCEuc são superiores ao do BCCana. Além disto, a disponibilidade dos grupos funcionais no BCEuc é maior que no BCCana, conforme pode ser observado nos interferogramas (Figura 4), em virtude da maior absorvância dos grupos funcionais semelhantes em ambos biocarvões (Schrader, 2008).

Numa comparação direta com métodos de tratamento da acidez das DAM's, os biocarvões apresentaram baixa eficiência. Os tratamentos usuais (Li et al., 2018) são feitos com adições na DAM de compostos alcalinizantes, como a calcita ou Ca(OH)₂ (cal hidratada). Para a neutralização de água ácida de um rio, inicialmente com pH 3.7, para pH 5.0 Kapil e Bhattacharyya (2017) utilizaram individualmente diferentes reagentes: (i) 10g CaO/ m³, (ii) 13g CaCO₃/m³, (iii) 20g de NaCO₃/m³ e (iv) 14g de NaOH/m³. Esses valores são entre 150 a 300 vezes inferiores ao da quantidade necessária do BCEuc, o que evidencia que a neutralização da DAM não é a principal vocação do BCCana e BCEuc na remediação.

Dentre os íons de maior interesse, As, Mn, Zn e U, foram observados diferentes níveis de remoção em função do elemento: U>Zn>As; com o BCEuc apresentando uma retenção superior ao BCCana (Fig. 5D). A retenção de íons nos biocarvões pode se dar por (i) troca iônica, atração eletrostática, (ii) complexação de superfície e (iii) formação de complexos de esfera interna nos grupos funcionais de superfície (Tan et al., 2015). Além disto existe a possibilidade de ocorrer na superfície dos biocarvões a adsorção física, a co-precipitação e precipitação de superfície (Figura 7).

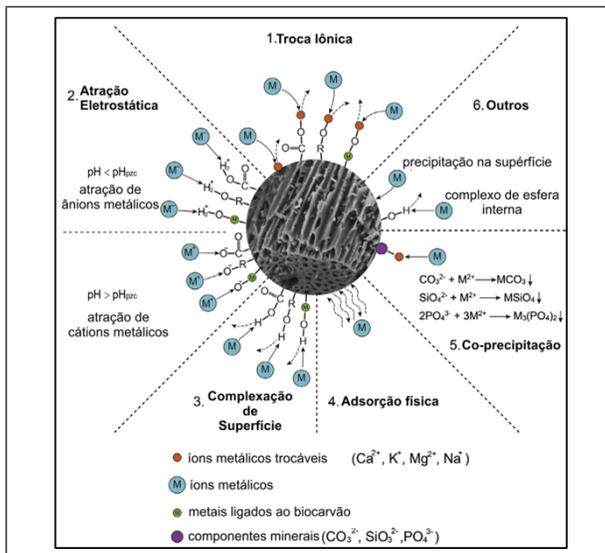


Figura 7 - Mecanismos de adsorção de metais no biocarvão. Modificado de Tan et al (2015).

Como nos biocarvões após a lixiviação, foram detectados pelo DRX e pelo MEV apenas cristais com a estrutura do quartzo e precipitados com a composição da gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{nH}_2\text{O}$) “puro” ou contendo La, Ce, Nd Ca, é provável que o As, U e Th tenham sido adsorvidos em suas superfícies.

CONCLUSÕES

Embora os biocarvões não tenham sido eficientes na neutralização da acidez da DAM, eles apresentaram potencial para a retenção por adsorção de As, U, Th, e precipitação e recuperação dos terras raras (La, Ce e Nd) presentes na DAM, devido à elevação do pH e liberação de íons a partir da solubilização das cinzas. O BCEuc apresentou a maior eficiência nesse processo.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela FAPESP (Proc. 12/02918-5).

REFERÊNCIAS

Acharya, Bharat Sharma, and Gehendra Kharel. 2020. **Acid mine drainage from coal mining in the United States—An overview.** *Journal of Hydrology* 588 : 125061.

Alberti, H.L.C. 2017. **Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas impactadas pela drenagem ácida da mina de urânio - Osamu Utsumi, planalto de Poços de Caldas (MG).** Tese de Doutorado em Geociências – Administração e Política de Recursos Minerais, Universidade Estadual de Campinas, 198 p.

Cipriani, M. 2002. **Mitigação dos Impactos Sociais e ambientais Decorrentes do Fechamento Definitivo de Minas de Urânio**. Tese de Doutorado em Geociências – Administração e Política de Recursos Minerais – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, SP.

Fidel, R.B., Laird, D.A., Thompson, M.L. and Lawrinenko, M., 2017. **Characterization and quantification of biochar alkalinity**. *Chemosphere*, 167: 367-373.

Fraenkel, M. O., Santos, R. C., Loureiro, F. E. V. P., Muniz, W. S. 1985. **Jazida de urânio no planalto de Poços de Caldas, Minas Gerais**. Em: DNPM. Principais depósitos minerais do Brasil – Recursos Minerais Energéticos. Brasília -DF: 1: 89-103.

Fungaro, D., Izidoro, J. 2006. **Remediação de drenagem ácida de mina usando zeólitas sintetizadas a partir de cinzas leves de carvão**. *Química Nova*, 29(4): 735-740.

Hassas, Behzad Vaziri, Mohammad Rezaee, and Sarma V. Pisupati. **Precipitation of rare earth elements from acid mine drainage by CO2 mineralization process**. *Chemical Engineering Journal* 399 (2020): 125716.

Holmes D. C., Pitty A.E., Noy D.J. 1992. **Geomorphological and hydrogeological features of the Poços de Caldas caldera analogue study sites**. *Journal of Geochemical Exploration*, 45: 215-247.

Kaksonen, A. H., and J. A. Puhakka. **Sulfate reduction based bioprocesses for the treatment of acid mine drainage and the recovery of metals**. *Engineering in Life Sciences* 7.6 (2007): 541-564.

Kaksonen, A.H., Puhakka, J.A. 2007. **Sulfate reduction based bioprocesses for the treatment of acid mine drainage and the recovery of metals**. *Engineering in life sciences*. 6: 541-564.

Kapil, N., Bhattacharyya, K.G., 2017. **A comparison of neutralization efficiency of chemicals with respect to acidic Kopili River water**. *Applied Water Science*, 7:2209-2214.

Lehmann, J e Joseph, S. 2009. **Biochar for environmental management: science and technology**. Londres: Earthscan, 415 p.

Li, Y., Li, W., Xiao, Q., Song, S., Liu, Y. and Naidu, R., 2018. **Acid mine drainage remediation strategies: A review on migration and source controls**. *Minerals & Metallurgical Processing*, 35: 148-158.

Naidu, Gayathri, et al. **A critical review on remediation, reuse, and resource recovery from acid mine drainage**. *Environmental pollution* 247 (2019): 1110-1124.

Schrader, B. ed., 2008. **Infrared and Raman spectroscopy: methods and applications**. John Wiley & Sons.

Tan, X., Liu, Y., Zeng, G., Wang, X., Hu, X., Gu, Y., Yang, Z. 2015. **Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions**. *Chemosphere*, 125, 70-85.

Tedeschi, L.R. 2005. **Hidrogeoquímica e hidrologia do reservatório na cava da mina Osamu Utsumi do Complexo Mineiro – Industrial do Planalto de Poços de Caldas, Caldas, MG**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG.

USEPA. **Method 3051, microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods** (third ed.) (1994) U.S