

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE DRENAGEM ÁCIDA ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE MÉTODOS ESTÁTICOS

Fernando Basquiroto de SOUZA¹; Nadja Zim ALEXANDRE²; Sérgio Luciano GALATTO³; Gustavo SIMÃO⁴

¹Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), fbs@unesc.net; ²UNESC, nza@unesc.net; ³UNESC, sga@unesc.net; ⁴UNESC, gustavosimao@unesc.net

RESUMO

O passivo ambiental produzido por anos de exploração do carvão sem considerar as questões ambientais traz consigo a problemática relacionada as áreas onde o rejeito do beneficiamento e o estéril da mineração a céu aberto foram depositados de forma inadequada, contribuindo assim para degradação do solo e dos corpos hídricos. A geração de drenagem ácida está associada à oxidação dos sulfetos presentes nos rejeitos e estéréis resultantes das atividades de exploração mineral, entre elas, o carvão. Os métodos de predição do potencial da drenagem ácida são utilizados com maior frequência e com caráter de obrigatoriedade para a exploração mineral em países como os Estados Unidos e Canadá. Nestes países, a avaliação do potencial de geração de drenagem ácida mediante a aplicação de métodos estáticos para os rejeitos e estéréis que serão produzidos durante a mineração são considerados e classificados como primeira medida a ser adotada para avaliar a sustentabilidade ambiental do empreendimento. No Brasil, essa prática ainda não se consolidou como medida preventiva, no entanto, o IPAT – Instituto de Pesquisas Ambientais da UNESC tem adotado métodos de determinação do balanço ácido-base na reabilitação de algumas áreas degradadas pela mineração de carvão. O potencial de geração de acidez (PGA) em diferentes áreas localizadas nas bacias dos rios Araranguá, Tubarão e Urussanga foi determinado a partir da concentração de enxofre, potencial de neutralização e da reatividade do rejeito ou estéril depositados nas áreas de estudo. Utilizou-se a metodologia BAB – Balanço Ácido Base para calcular o Potencial de Geração de Acidez e a Necessidade de Neutralizante (NN) para a definição de estratégias de recuperação de cada área. Para melhor caracterização do material, as áreas foram subdivididas em zonas amostrais em função da homogeneidade da paisagem, obtendo-se uma amostra composta em cada uma das feições. Para as áreas investigadas na bacia do Araranguá, os resultados variaram entre 2 e 7,1 para o pH; PGA variou de 0,62 a 248,0 kg de acidez / t de material; NN entre -21,77 a 250,69 kg de CaCO₃ / t de material e porcentagem de enxofre entre 0,02 a 7,95 %. Na bacia do rio Tubarão os dados variaram entre 3,1 e 5,1 para pH; 0,3 a 37,5 kg de acidez / t de material para PGA; 2,36 a 41,4 kg de CaCO₃ / t de material e porcentagem de enxofre entre 0,05 a 1,2%. Para as áreas da bacia do rio Urussanga obteve-se 3,1 e 5,2 para pH; 0 a 59,37 kg de acidez / t de material para PGA; 1,26 a 61,87 kg de CaCO₃ / t de material e porcentagem de enxofre entre 0,01 a 1,9%. Os dados demonstram que algumas áreas da bacia do rio Araranguá ainda possuem potencial de geração de acidez muito elevado, talvez pelo menor tempo de exposição ao intemperismo frente as demais. Verificou-se também a influência da deposição de rejeitos de beneficiamento nestas áreas.

Palavras-chave: Mineração de Carvão. Drenagem Ácida. Balanço Ácido Base.

ABSTRACT

For years, coal mining has worked without taking into account the environmental impacts and other related issues, leaving behind derelict mine lands and their waste rocks, tailings and spoil piles. These materials significantly contribute to the soil and water pollution. The acid mine drainage is associated with the oxidation of waste rocks and tailings' sulfides produced in the coal mining activities. Acid mine drainage prediction methods are frequently used and in some countries, they are mandatory (e.g. United States of America and Canada). In those countries, applying static methods to predict the acid generation potential of future tailings and waste rocks is the first step to be taken to assess the environmental sustainability of the mining activity. In Brazil, this practice is not fully adopted yet as a mitigation measure, however, IPAT (UNESCO's Environmental Research Institute) has adopted acid base accounting methods to aid in the rehabilitation of derelict coal mines. The acid generating potential (AGP) was defined through sulfur content, neutralization potential and reactivity in different coal mines sites in the Ararangua, Tubarão and Urussanga River Basins. The acid-base accounting method was used to calculate the acid generating potential and the neutralizing necessity (NN) and to define rehabilitation strategies for each site. To fully characterize the samples, the areas were divided in similar sample zones, where it was obtained a compounded sample in each zone. In the Ararangua River Basin areas, the results ranged between pH of 2 and 7.1; AGP ranged between 0.62 and 248.0 kg of acidity / t of material; NN ranged between -21.77 to 250.69 kg of CaCO₃ / t of material and sulfur content ranged between 0.02 to 7.95%. In the Tubarão River Basin areas, the pH results were between 3.1 and 5.1; 0.3 and 37.5 kg of acidity / t of material for AGP; 2.36 to 41.4 kg of CaCO₃ / t of material for NN and sulfur content ranged between 0.05 to 1.2%. In the Urussanga River Basin areas, a range of pH between 3.1 and 5.2 was obtained; 0 to 59.37 kg of acidity / t of material for AGP; 1.26 to 61.87 kg of CaCO₃ / t of material for NN and a sulfur content between 0.01 and 1.9% was also obtained. Data shows that some sites in the Ararangua River Basin still have a very high acid generating potential, probably because of the lower exposure time to weathering. It was also verified the influence of tailings in these sites.

Key-Words: Coal Mining. Acid Mine Drainage. Acid-Base Accounting.

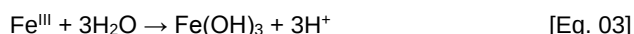
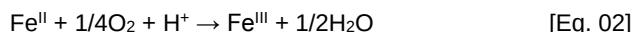
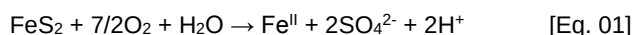
1 INTRODUÇÃO

A exploração de carvão no sul de Santa Catarina no século XX desenvolveu-se sem observar critérios ambientais, o que resultou num passivo ambiental de 4.700 ha de áreas degradadas. Consequentemente, tais áreas, ao serem abandonadas, impactaram na qualidade de outros recursos ambientais (e.g. água e solo) (ALEXANDRE, 1999; BEANE et al., 2016).

Os principais impactos ambientais na mineração de carvão estão associados à abertura de cavas e disposição dos rejeitos do beneficiamento. No primeiro, há inversão de camadas de solos e rochas em pilhas, expondo rochas passíveis de geração de drenagem ácida a um ambiente oxidativo. No segundo, após extrair e beneficiar o material lavrado gera-se rejeito com alto teor de pirita (FeS₂), que se for disposto incorretamente, contribui para a geração de drenagem ácida de mina (DAM) (ALEXANDRE, 1999).

A drenagem ácida é resultante da exposição de minerais sulfetados ao ar e água, ocasionando a liberação de acidez (sulfatos, ferro e íons hidrogênio) (SKOUSEN, SEXSTONE, ZIEMKIEWICZ, 2000), sendo influenciadas por características como a estrutura cristalina e o estado de oxidação dos sulfatos, composição mineralógica e granulometria do material (ITARD, BOSC, 2001).

As reações químicas, conforme Evangelou (1995), Itard e Bosc (2001), da oxidação de minerais sulfetados é influenciada por parâmetros externos como concentração de oxigênio, temperatura e grau de saturação da água, sendo elas dadas como:



Os minerais sulfetados (representados pelo sulfeto de ferro – FeS₂) reagem com o oxigênio do ar (O₂) e da água (H₂O) gerando Ferro II, sulfato (SO₄²⁻) e íons de hidrogênio (H⁺). O Ferro II liberado reage então com oxigênio e com os íons de hidrogênio, resultando em Ferro III e água. Este Ferro III então reage com a água, liberando hidróxido de ferro III (Fe(OH)₃). A partir do Ferro III e água, o sulfeto de ferro reage novamente, gerando mais Ferro II, sulfato e íons hidrogênio. Além disso, ao tornar o meio ácido (pH < 3), as reações são catalisadas por bactérias (ITARD, BOSC, 2001; JOHNSON, HALLBERG, 2003).

Diferentes ensaios podem ser realizados para prever o potencial de geração de acidez de matrizes sólidas (i.e. rochas, solos e rejeitos), sendo que tais ensaios podem ser classificados entre estáticos e cinéticos, conforme a escala de tempo deles. Usualmente, os testes estáticos são menos

custosos e se desenvolvem em até uma semana (BLOWES et al., 2003; PLANTE, BUSSIÈRE, BENZAAZOUA, 2012).

A predição do potencial de geração ácida consiste em uma ferramenta que auxilia na escolha adequada do método de reabilitação de áreas degradadas. Essa medida permite o planejamento, intervenção e controle para o manejo adequado de rejeitos e estéreis, promovendo a redução de maneira considerável de problemas ambientais em longo prazo, bem como contribui para minimizar ou eliminar custos com futuras ações corretivas.

A partir desses ensaios, a avaliação do potencial de geração de acidez pode ser realizada por meio de um Balanço Ácido-Base (BAB), onde a quantidade de enxofre total ou pirítico e neutralizantes (principalmente carbonatos) são analisadas e relacionados. Caso a quantidade de enxofre seja superior ao dos neutralizantes, haverá potencial para geração de acidez (SKOUSEN, SEXSTONE, ZIEMKIEWICZ, 2000).

A utilização do BAB para avaliação e liberação de empreendimentos mineiros é requerida em diversos países (e.g. Estados Unidos da América e Canadá), especialmente para analisar a

sustentabilidade ambiental e indicar a quantidade de neutralizantes para futuros tratamentos.

O conhecimento destes parâmetros é essencial e impacta nos custos e métodos de gestão, estocagem e recuperação ambiental, pois a recuperação de ambientes com estéreis e rejeitos geradores de DAM são mais custosos que aqueles que não geram (BOUZHAAH et al., 2014).

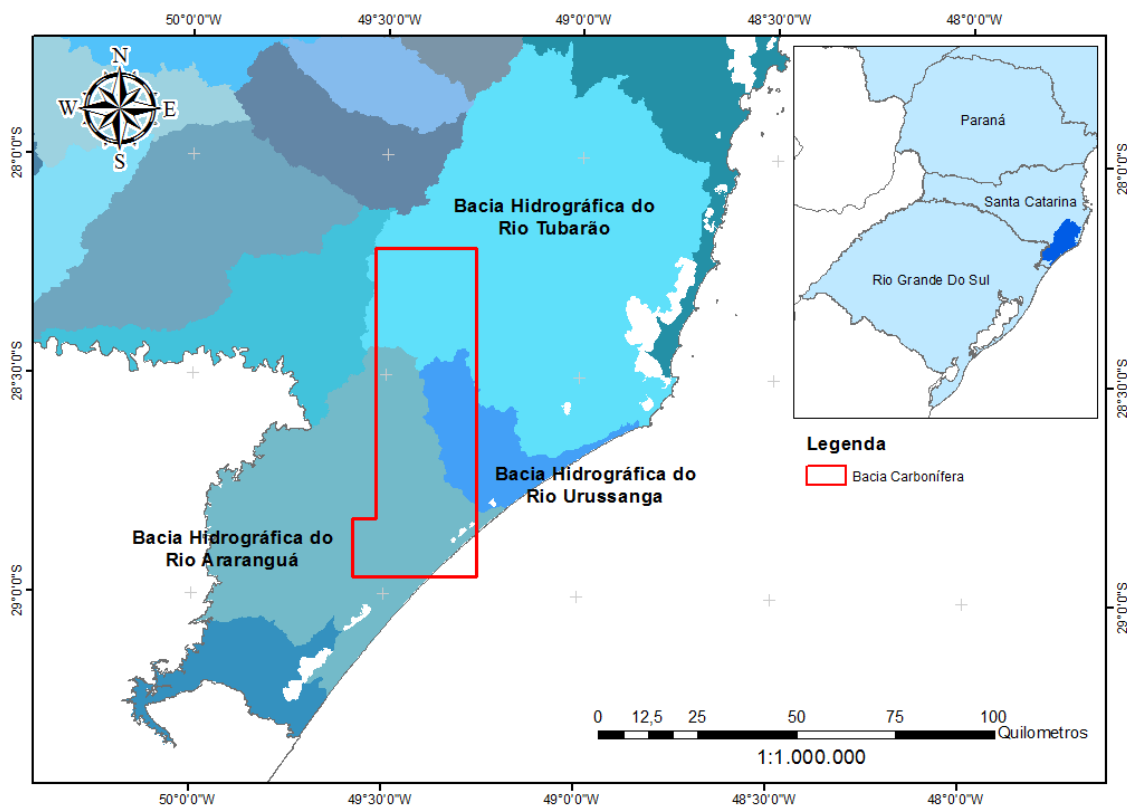
Diante do passivo ambiental das atividades minerárias existentes nas bacias hidrográficas do rio Araranguá, Tubarão e Urussanga, utilizou-se o método estático Balanço Ácido-Base para a definição de estratégias de recuperação ambiental.

2 METODOLOGIA

O estudo foi realizado nas Bacias Hidrográficas do Rio Araranguá, Rio Urussanga e Rio Tubarão, todas localizadas no sul de Santa Catarina (Brasil) (Figura 1).

Na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá, foram amostradas 10 áreas degradadas; na Bacia Hidrográfica do Rio Urussanga 4 áreas foram amostradas, enquanto somente 2 foram amostradas na Bacia do Rio Tubarão.

Figura 1 – Localização das Bacias Hidrográficas onde encontram-se as áreas amostradas.



Fonte: dos Autores.

Nas amostras de estéréis e rejeitos foram analisados os parâmetros pH (em água), Enxofre Total, Potencial de Neutralização (PN), Potencial de Acidificação (PA) e Necessidade de Neutralizantes (NN).

O método analítico utilizado para determinação do pH em água foi por meio do método potenciométrico. Os parâmetros Enxofre Total e Potencial de Neutralização foram analisados basearam-se em Sobek et al. (1978). O Potencial de Acidificação e a Necessidade de Neutralizantes foram calculadas a partir do teor de enxofre e do potencial de neutralização, respectivamente.

Salienta-se que a Necessidade de Neutralizante foi calculada a partir da subtração entre os parâmetros Potencial de Acidificação e Potencial de Neutralização.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para as áreas investigadas na bacia do Araranguá, os resultados variaram entre 2 e 7,1 para o pH; PGA variou de 0,62 a 248,0 kg de acidez

Tabela 1 – Estatística descritiva dos parâmetros analisados nas áreas localizadas nas Bacias Hidrográficas do Rio Araranguá (A), Urussanga (U) e Tubarão (T) (média $\pm$ desvio padrão).

Área	Número Amostras	pH (H ₂ O)	PGA (kg Acidez/t)	Stotal %	NN (kg CaCO ₃ /t)
A001	10	3,92 $\pm$ 0,54	11,44 $\pm$ 6,40	0,37 $\pm$ 0,20	16,22 $\pm$ 7,75
A002	6	3,58 $\pm$ 0,85	73,54 $\pm$ 91,61	2,35 $\pm$ 2,93	80,56 $\pm$ 94,76
A003	2	3,40 $\pm$ 0,28	16,57 $\pm$ 7,95	0,53 $\pm$ 0,25	23,22 $\pm$ 10,71
A004	3	3,97 $\pm$ 0,32	7,29 $\pm$ 1,72	0,23 $\pm$ 0,06	13,19 $\pm$ 1,19
A005	36	3,81 $\pm$ 0,85	7,88 $\pm$ 9,01	0,25 $\pm$ 0,29	9,93 $\pm$ 13,89
A006	15	4,13 $\pm$ 2,17	69,46 $\pm$ 58,72	2,22 $\pm$ 1,88	78,95 $\pm$ 59,63
A007	3	2,50 $\pm$ 0,44	40,63 $\pm$ 36,09	1,30 $\pm$ 1,15	44,32 $\pm$ 37,61
A008	8	3,84 $\pm$ 0,27	6,76 $\pm$ 3,33	0,22 $\pm$ 0,11	10,22 $\pm$ 3,11
A009	17	3,92 $\pm$ 0,50	8,71 $\pm$ 4,47	0,28 $\pm$ 0,14	11,98 $\pm$ 5,69
A010	6	3,37 $\pm$ 0,88	18,65 $\pm$ 18,33	0,60 $\pm$ 0,59	18,98 $\pm$ 18,35
U001	6	4,07 $\pm$ 0,24	3,23 $\pm$ 2,66	0,10 $\pm$ 0,09	5,51 $\pm$ 2,90
U002	1	3,80	0,00	0,05	1,80
U003	6	4,60 $\pm$ 0,75	9,64 $\pm$ 16,81	0,31 $\pm$ 0,54	14,07 $\pm$ 21,78
U004	10	4,63 $\pm$ 0,23	10,47 $\pm$ 17,34	0,34 $\pm$ 0,55	13,81 $\pm$ 17,24
T001	6	4,38 $\pm$ 0,15	5,47 $\pm$ 6,54	0,18 $\pm$ 0,21	8,36 $\pm$ 6,38
T002	17	4,01 $\pm$ 0,64	10,13 $\pm$ 11,67	0,33 $\pm$ 0,37	13,60 $\pm$ 12,20

Fonte: dos Autores.

SRK (1989) propuseram que valores de NN entre -20 e 20 kg CaCO₃/t de material são considerados incertos; valores superiores à 20 kg CaCO₃/t de material representam rejeitos e estéréis passíveis de gerarem DAM.

Tal incerteza deve-se à heterogeneidade e forma complexa do material, que pode apresentar

por t de material; NN entre -21,77 a 250,69 kg CaCO₃ por t de material e porcentagem de enxofre entre 0,02 a 7,95%. Na bacia do rio Tubarão os dados variaram entre 3,1 e 5,1 para pH; 0,3 a 37,5 kg de acidez por t de material para PGA; 2,36 a 41,4 kg CaCO₃ por t de material e porcentagem de enxofre entre 0,05 a 1,2%. Para as áreas da bacia do rio Urussanga obteve-se 3,1 e 5,2 para pH; 0 a 59,37 kg de acidez por t de material para PGA; 1,26 a 61,87 kg CaCO₃ por t de material e porcentagem de enxofre entre 0,01 a 1,9%.

A Tabela 1 apresenta os as médias de cada área, seguida do seu desvio padrão para os parâmetros pH (em água), Potencial de geração de acidez (PGA), enxofre total (Stotal) e Necessidade de Neutralizantes (NN), sendo que as áreas localizadas na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá têm prefixo A; na Bacia Hidrográfica do Rio Urussanga utilizam o prefixo U e na Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão o prefixo T.

diferentes minerais e interfaces (EVANGELOU, 1995; ITARD, BOSC, 2001).

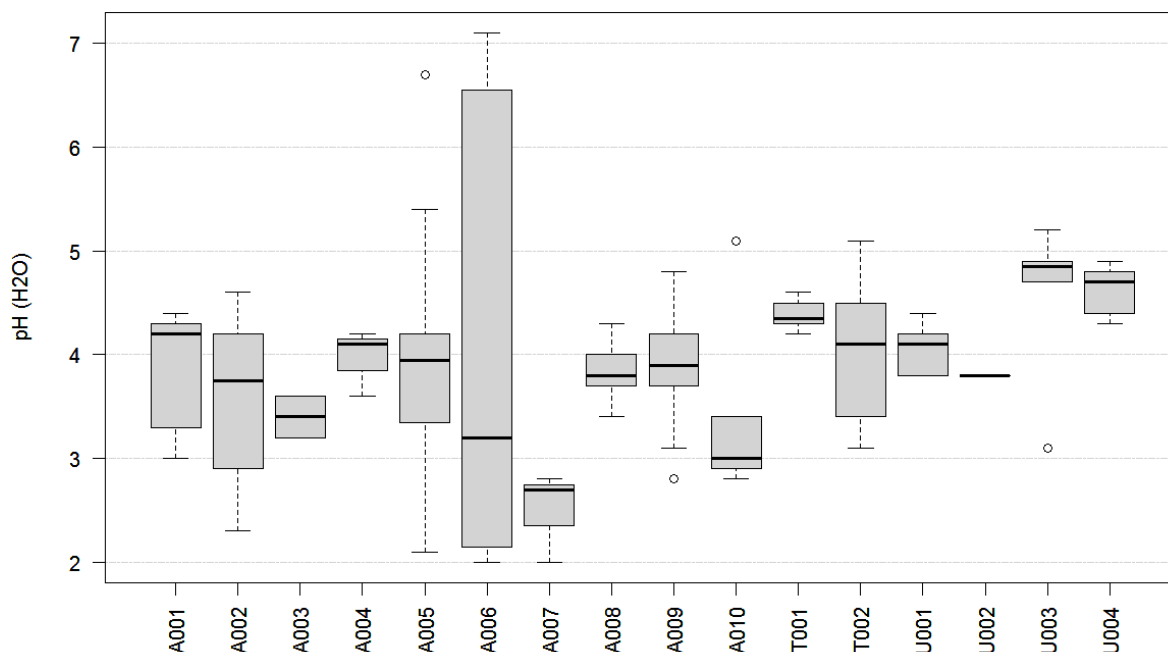
Entre as áreas amostradas, aquelas que apresentam potencialidade de geração de DAM são, considerando-se todo o intervalo do desvio padrão, A001, A002, A003, A005, A006, A007, U003, U004 e T002.

Nestes locais, deve-se detalhar as regiões onde há maior concentração de rejeitos ou estéreis geradores de DAM e dependendo da estratégia de reabilitação ambiental, os rejeitos/estéreis podem ser neutralizados (em situações onde há pouco volume de material), isolados em depósitos ou células impermeáveis (quando há grande volume de

material), ou transportados para depósitos de rejeitos em operação.

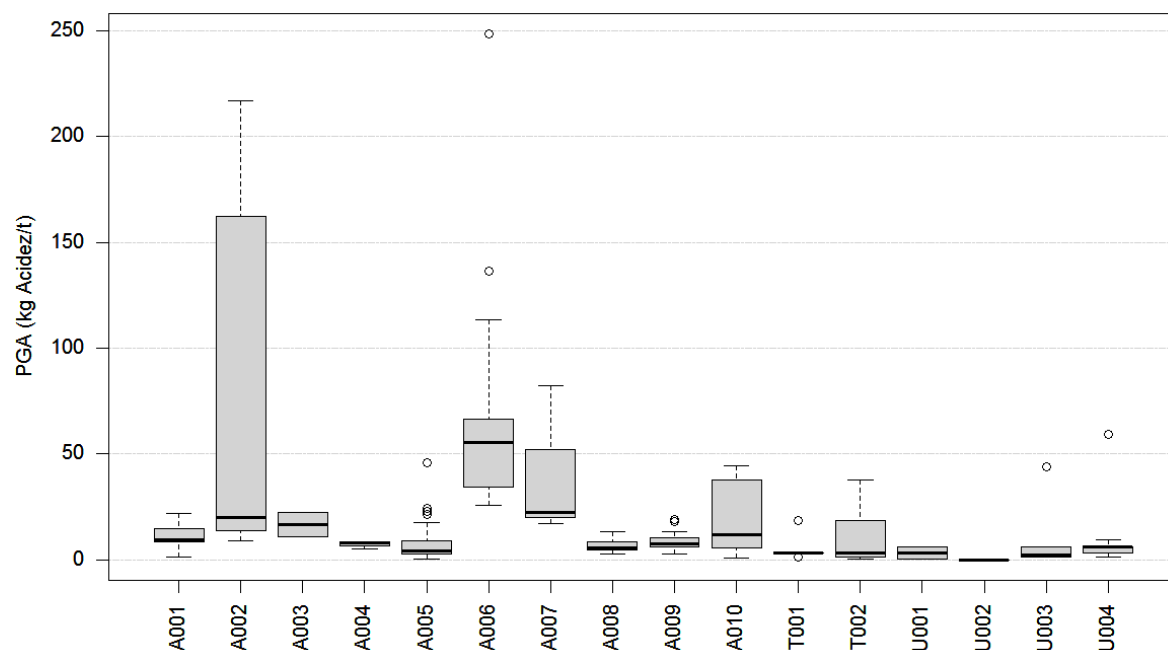
As Figuras 2 a 5 demonstram a distribuição dos dados na forma de boxplots para os parâmetros pH (H₂O), PGA, Enxofre Total e NN, respectivamente.

Figura 2 – Boxplots da distribuição dos valores de pH (H₂O) nas áreas amostradas.



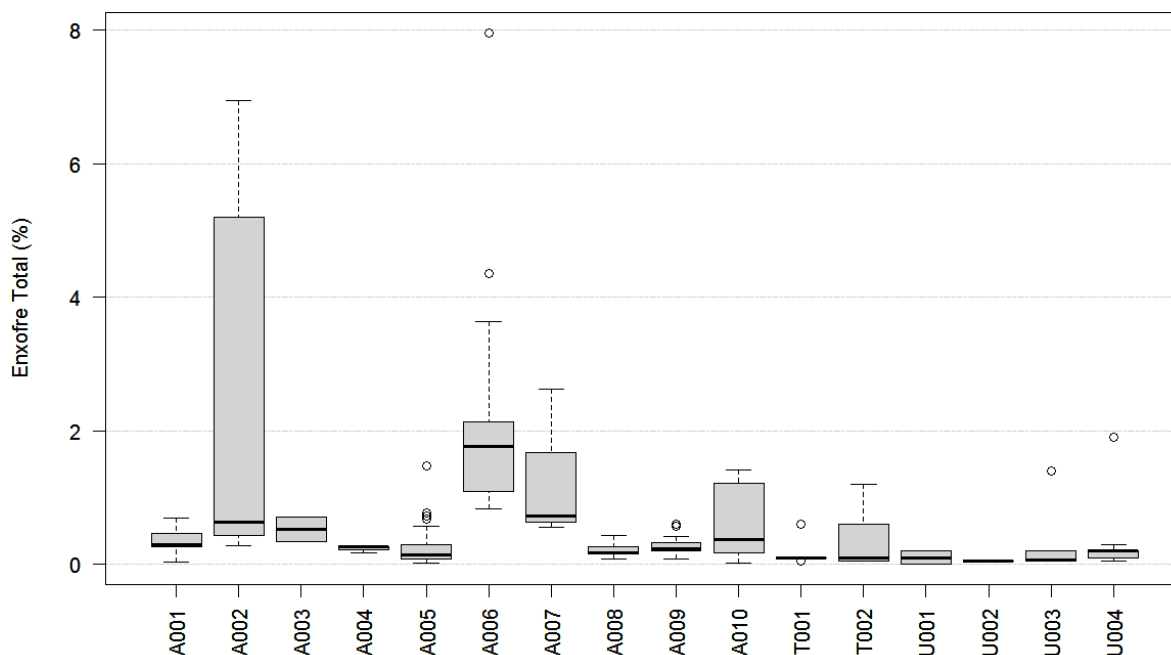
Fonte: dos Autores.

Figura 3 – Boxplots da distribuição dos valores de Potencial de Geração de Acidez nas áreas amostradas.



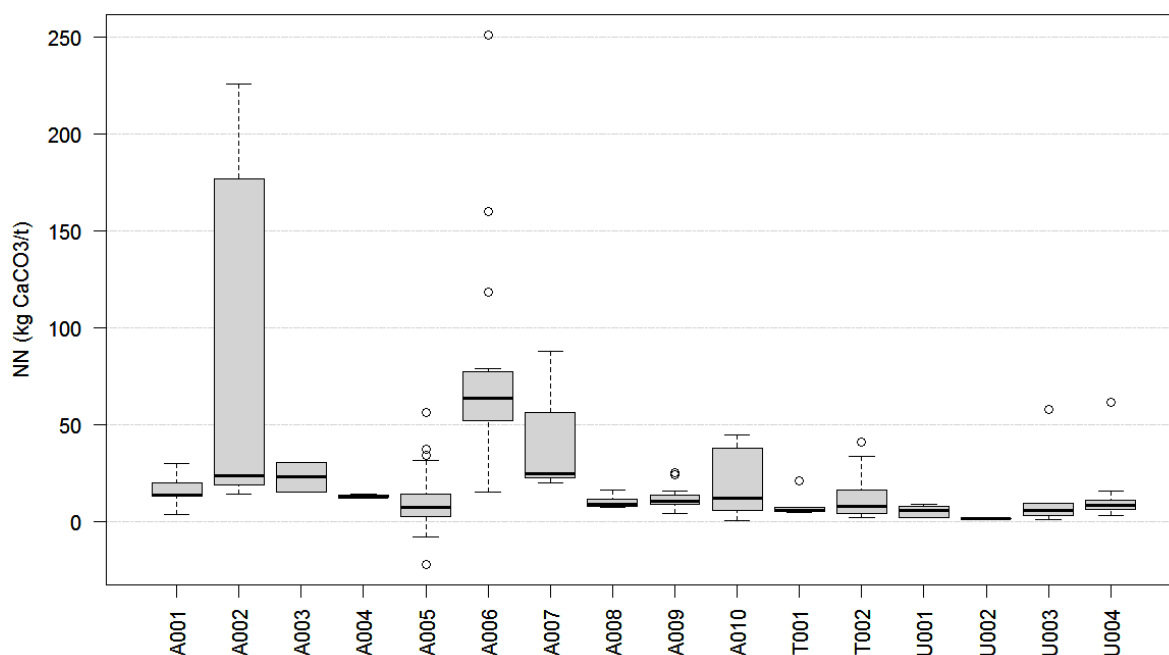
Fonte: dos Autores.

Figura 4 – Boxplot da distribuição dos valores de Enxofre Total nas áreas amostradas.



Fonte: dos Autores.

Figura 5 – Boxplot da distribuição dos valores de Necessidade de Neutralizantes nas áreas amostradas.



Fonte: dos Autores.

Analisando-se a distribuição dos dados nas figuras anteriores, observa-se que as áreas que apresentaram *outliers* (pontos brancos nos boxplots) podem representar situações onde há rejeitos da mineração de carvão dispostos em áreas isoladas.

Com destaque para a área A005 onde se identificou 3 pontos específicos de deposição de rejeito de beneficiamento em meio ao estéril da

mineração à céu aberto; e a área identificada como A006 onde ocorreu a deposição de rejeito com maior concentração de enxofre. O percentual de enxofre nesta área variou entre 0,83 a 7,95, enquanto que na área A009, onde só foi identificada a presença de estéril de cobertura (mineração a céu aberto), a porcentagem de enxofre ficou entre 0,09 e 0,61. Esta situação se reflete diretamente sobre o

potencial de geração de acidez e consequentemente na necessidade de neutralizantes, muito embora esta última esteja relacionada também com a presença de carbonatos na matriz investigada.

Situação diferenciada pode ser destacada para a área A002, onde só foi identificado material estéril proveniente da mina a céu aberto. Nesta área, foram caracterizadas seis amostras compostas, sendo que em duas destas os resultados foram compatíveis ao rejeito de beneficiamento. Desta forma, pode se concluir, que dependendo da geologia local, o estéril de cobertura pode ser tão poluente quanto o rejeito proveniente da etapa de beneficiamento de carvão.

Outros autores também avaliaram rejeitos e rochas geradores de acidez por meio do BAB. Por exemplo, Plante, Bussière e Benzaazoua (2012) avaliaram rochas geradoras de acidez no Canadá e elas apresentaram NN que variaram entre 135 kg CaCO₃/t e -103,7 kg CaCO₃/t, sendo, inclusive, algumas amostras classificadas como não-geradoras de acidez.

No Marrocos, Hakkou, Benzaazoua e Bussière (2008) avaliaram rejeitos e estéréis de uma mina abandonada e obtiveram valores entre 22,5 a 453 kg CaCO₃/t de NN, sendo que os materiais mais finos obtiveram resultados superiores.

Salienta-se que o conhecimento das características dos estéréis e rejeitos também pode auxiliar tomada de decisão quanto ao seu rebeneficiamento ou reaproveitamento.

Santos, Tunino e Schneider (2015) avaliaram a possibilidade aproveitamento de rejeitos de carvão na produção de pavimentos de concreto, sendo que os rejeitos amostrados por esses autores apresentaram NN de 218,8 kg CaCO₃/t (após moagem, o material apresentou NN de 60,8 kg CaCO₃/t).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados demonstram que algumas áreas da bacia do rio Araranguá ainda possuem potencial de geração de acidez muito elevado, talvez pelo menor tempo de exposição ao intemperismo. No entanto, a presença de rejeito proveniente da etapa de beneficiamento de carvão é fator preponderante na geração de acidez de cada área. Destaca-se ainda que o teste realizado leva em conta o total de enxofre presente em cada amostra, sendo que apenas o enxofre pirítico está mais exposto ao

intemperismo e, portanto, será o que efetivamente contribuirá com a formação da acidez.

Embora tenham limitações, os testes estáticos demonstraram-se suficientes para indicar estratégias de reabilitação de áreas degradadas.

5 REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, N.Z. **Diagnóstico Ambiental da Região Carbonífera de Santa Catarina: Degradação dos Recursos Naturais**. Rev. Tecnol. Ambiente, Criciúma, v. 5, n. 2, p. 35-50. 1999. pg. 35-50.

BEANE, S.J.; COMBER, S.D.W.; RIEUWERTS, J.; LONG, P. Abandoned metal mines and their impact on receiving waters: A case study from Southwest England. **Chemosphere**. v.153, 2016. pg. 294-306.

BLOWES, D.W.; PTACEK, C.J.; JAMBOR, J.L.; WEISNER, C.G. The geochemistry of acid mine drainage. In: HOLLAND, H.D.; TUREKIAN, K.K. (Eds.). **Treatise on Geochemistry**. Elsevier. 2003. pg. 149–204.

BOUZAHAZAH, H.; BENZAAZOUA, M.; BUSSIÈRE, B.; PLANTE, B. Revue de Littérature Détaillée sur les Tests Statiques et les Essais Cinétiques comme Outils de Prédiction du Drainage Minier Acide. **Déchets, Sciences & Techniques**. n. 66. 2014. pg. 14-31.

EVANGELOU, V.P. **Pyrite Oxidation and Its Control**. CRC Press, 1995. 293 p.

HAKKOU, R.; BENZAAZOUA, M.; BUSSIÈRE, B. Acid Mine Drainage at the Abandoned Kettara Mine (Morocco): 1. Environmental Characterization. **Mine Water and the Environment**. Springer: v. 27, n. 3. 2008. pg. 145-159.

JOHNSON, D.B.; HALLBERG, K.B. The Microbiology of Acidic Mine Waters. **Research in Microbiology**. v. 154, n. 7. 2003. pg. 466-473.

ITARD, Y.; BOSC, R. **Traitements et preventions des drainages acides provenant des résidus miniers**. Revue bibliographique. BRGM/RP-50829-FR, 2001. 85 pg.

PLANTE, B.; BUSSIÈRE, B.; BENZAAZOUA, M. Static Tests Response on 5 Canadian Hard Rock Mine Tailings with Low Net Acid-Generating Potentials. **Journal of Geochemical Exploration**. v. 144. 2012. pg. 57-69.

SANTOS, C.R.; TUBINO, R.M.C.; SCHNEIDER, I.A.H. Mineral Processing and Characterization of Coal Waste to be used as Fine Aggregates for Concrete Paving Blocks. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**. v. 8. n. 1. 2015. pg. 14-24.

SKOUSEN, J.G.; SEXSTONE, A.; ZIEMKIEWICZ, P.F. Acid Mine Drainage Control and Treatment. In: **Reclamation of Drastically Disturbed Lands**. Agronomy Monograph 41. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. 2000. pg. 131-168.

SOBEK, A.; SCHULLER, W.; FREEMAN, J.; SMITH, R. **Field and Laboratory Methods Applicable to Overburdens and Minesoil**. U.S.

Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/2-78/054 (NTIS PB280495), 1978.

SRK. **Draft acid rock drainage technical guide**, vol. 1, prepared for the British Columbia Acid Mine Drainage Task Force. Steffens, Robertson and Kirsten (SRK), Inc. (B.C.), in association with Norecol Environment Consultants and Gormely Process Engineering, Vancouver, B.C. 1989. 274 pg.