

## AVALIAÇÃO DO REATOR UASB PARA REMOÇÃO DE SULFATO DE ÁGUAS ÁCIDAS DE MINAS

**RODRIGUEZ, R.P.<sup>1</sup>, OLIVEIRA, G.H.D.<sup>2</sup>, RAIMUNDI, I.M.<sup>2</sup>, ZAIAT, M.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Alfenas, Instituto de Ciência e Tecnologia, Laboratório de Biotecnologia Anaeróbia. renata@biotech.eng.br

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo (USP), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Departamento de Hidráulica e Saneamento, Laboratório de Processos Biológicos. zaiat@sc.usp.br

### RESUMO

Um reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB) em escala de bancada foi empregado no estudo do tratamento de drenagem ácida de minas por meio de redução biológica de sulfato. O reator foi alimentado com drenagem ácida coletada na mina de urânio Osamu Utsumi (Poços de Caldas, MG), suplementada com etanol como fonte externa de carbono. O inóculo empregado foi lodo granular anaeróbio proveniente de um reator tratando resíduo de abatedouro de aves. O desempenho do reator foi estudado frente a variações de relação DQO/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, diluição do afluente e recirculação da fase líquida. O emprego de diluição na drenagem ácida resultou uma remoção de sulfato de 50,6% e elevação do pH efluente. A elevação da relação DQO/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> resultou em eficiências de redução de sulfato de 93,7%. A redução de sulfato por meio da oxidação completa do etanol foi apontada como a via predominante no reator, embora a remoção de DQO não tenha ultrapassado 68% em nenhuma das fases operacionais. A recirculação da fase líquida com água de abastecimento afetou positivamente o reator, enquanto a recirculação com efluente tratado provocou desequilíbrio e queda na eficiência.

**PALAVRAS-CHAVE:** drenagem ácida de minas; sulfato; reator UASB; carga aplicada; relação DQO/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

### ABSTRACT

A bench-scale Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor was used to study the treatment of acid mine drainage through the biological reduction of sulfate. The reactor was fed with acid mine drainage collected at the Osamu Utsumi uranium mine (Poços de Caldas, MG) and supplemented with ethanol as an external source of carbon. Anaerobic granular sludge originating from a reactor treating poultry slaughterhouse wastewater was used as the inoculum. The reactor's performance was studied according to variations in the chemical oxygen demand (COD)/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ratio, influent dilution and liquid-phase recirculation. The use of dilution on the acid mine drainage resulted in 46.3% removal of the sulfate and an increase in the effluent pH. An increase in the COD/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ratio resulted in a 85.6% sulfate reduction. The reduction of sulfate through complete oxidation of the ethanol was the predominant path in the reactor, although the removal of COD was not above 68% in any of the operational stages. The liquid-phase recirculation with supply water positively affected the reactor, while the recirculation with treated effluent caused disequilibrium and a decrease in efficiency.

**KEYWORDS:** acid mine drainage, sulfate, UASB reactor, applied load, COD/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ratio.

## 1. INTRODUÇÃO

Uma das modificações resultantes da atividade mineradora é a introdução de água e oxigênio em ambientes contendo minerais reduzidos. Tais elementos levam à oxidação desses minerais, dentre os quais estão incluídos os sulfetos metálicos. Esse processo resulta na liberação de prótons, íons sulfato e metais no meio aquoso. O aumento da acidez do meio ainda resulta, subseqüentemente, na dissolução de metais pesados provenientes de óxidos e carbonatos (Kaksonen & Puhakka, 2007). A esse meio aquoso de baixo pH e alta concentração de metais e sulfato dá-se o nome de drenagem ácida de minas (DAM). O método mais utilizado para o tratamento de drenagem ácida baseia-se na neutralização química obtida pela adição de cal virgem (CaO) e cal hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>), que elevam o pH e precipitam metais na forma de hidróxidos e sulfato sob a forma de CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O. Esse método, contudo, é dispendioso e gera resíduos que precisam ser desaguados e dispostos em aterros (Lyew *et al.*, 1994).

Entretanto, esforços têm sido feitos no sentido de se obter alternativas economicamente viáveis para o tratamento de DAM, baseadas em processos conduzidos por microrganismos. Embora sejam conhecidos diversos processos biológicos que possam remover metais de águas residuárias, bem como processos biológicos que geram alcalinidade, a redução biológica de sulfato parece ser a alternativa mais promissora, justamente por combinar elevação de pH, metais e sulfato. Tal processo baseia-se na produção de sulfeto de hidrogênio e alcalinidade conduzida por bactérias redutoras de sulfato (BRS) (Kaksonen & Puhakka, 2007). Para essa finalidade, diversas configurações de sistemas de tratamento são estudadas. Dentre elas destacam-se os sistemas passivos, tais como as barreiras reativas, lagoas anaeróbias e wetlands; e os métodos ativos, caracterizados pelos biorreatores.

Ainda que o uso de reatores biológicos represente uma alternativa mais dispendiosa e que demande maior manutenção que os métodos físico-químicos, se ganha em outros aspectos, como menor área de tratamento, maior facilidade na recuperação dos metais, melhor controle e maior previsibilidade do sistema. Uma vez que um processo biológico para a completa remoção de enxofre depende da formação de S<sub>0</sub> (Lens & Kuenen, 2001), e a recuperação de compostos de relevância econômica é importante como forma de aumentar a sustentabilidade do sistema de tratamento (Foresti *et al.*, 2006), o emprego de biorreatores mostra-se como uma alternativa bastante adequada. Numerosas configurações de reatores para a redução biológica de sulfato são descritas na literatura. Podem-se citar reatores em batelada, bateladas sequenciais, filtros anaeróbios, reatores de leito fluidificado, biorreatores de membrana, reatores anaeróbios híbridos e reatores UASB (Kaksonen & Puhakka, 2007).

Os reatores UASB são amplamente empregados para o tratamento águas residuárias industriais e esgotos domésticos. O reator destaca-se por sua simplicidade, sendo basicamente constituído por um tanque vertical que contém na sua porção superior um sistema de separação trifásico. A ideia fundamental da concepção do UASB é fornecer condições para que grande quantidade de lodo biológico fique retida em seu interior, sem a necessidade de um meio suporte inerte. Isso é alcançado pelo separador trifásico, associado a diversos parâmetros operacionais do sistema, como baixas velocidades de escoamento, bem como a formação e manutenção de grânulos com boas características de sedimentabilidade. Desta maneira, consegue-se desvincular o tempo de detenção hidráulica do reator do tempo de retenção celular. Esse trabalho analisou a operação contínua de um reator anaeróbio com crescimento granular (UASB) com avaliação da influência da carga de sulfato aplicada, da relação DQO/sulfato e da recirculação sobre a eficiência na remoção de sulfato de drenagem ácida de mina.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Descrição do reator UASB

O reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB) em escala de bancada foi confeccionado em acrílico, sendo constituído de um tubo flangeado de 60 cm de altura e 5 cm de diâmetro externo, com três pontos de amostragem ao longo de seu comprimento. A aproximadamente 48,5 cm da base do reator encontra-se o separador trifásico, constituído por um afunilamento para a deflexão de sólidos seguido de um dispositivo para a captação de gás. O reator possui volume total de 840 ml.

### 2.2. Inóculo e água residuária

O inóculo utilizado para os ensaios com o RAHLF foi lodo proveniente de reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) aplicado ao tratamento de águas residuárias de abatedouro de aves (Avícola Dacar), localizado na cidade de Tietê, estado de São Paulo. A água residuária utilizada na operação dos reatores anaeróbios horizontais de leito fixo foi a drenagem ácida de minas obtida junto à Unidade de Tratamento de Minério Osamu Utsumi da Comissão Nacional de Energia Nuclear em Poços de Caldas – Minas Gerais. A fonte de carbono utilizada foi o etanol adicionado ao reservatório de alimentação.

### 2.3. Análises físico-químicas

As análises de demanda química de oxigênio (DQO), sulfato e pH foram realizadas seguindo os métodos descritos pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2005). A análise de ácido acético foi realizada por cromatografia gasosa.

### 2.4. Operação do reator UASB

O reator foi alimentado com a água residuária utilizando-se bomba peristáltica Gilson® e o tempo de detenção hidráulica (TDH) empregado nos ensaios foi de 24 horas, calculado a partir do volume útil teórico do reator. Etanol foi utilizado como fonte orgânica em todos os experimentos. A operação do reator ocorreu em três etapas distintas, como descritas na Tabela I.

**Tabela I. Etapas realizadas durante a operação do reator UASB.**

Fase	Razão DQO/SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Diluição	Recirculação
I	0,67	Sim	Não
II	1,0	Sim	Não
III	1,0	Não	Sim (com água)
IV	1,0	Não	Sim (com efluente)

Na fase I, a matéria orgânica foi adicionada em quantidade que mantivesse a relação entre as concentrações de DQO e sulfato em 0,67. Esta relação foi definida em função da estequiometria da reação de redução do sulfato quando se observa oxidação completa da matéria orgânica. O afluente contendo drenagem bruta era diluído com água de abastecimento, de forma a manter uma concentração de sulfato de cerca de 350 mg l<sup>-1</sup>. Na fase seguinte (II), aumentou-se o aporte de elétrons, para uma relação DQO/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> de 1,0. A diluição do afluente foi mantida. Na fase III, a variável foi a inserção de um sistema de recirculação com água de abastecimento. O reator passou a

ser alimentado com drenagem sem diluição, porém a redução na carga de sulfato aplicada era resultado da diluição promovida pela recirculação. Na fase IV, o sistema de recirculação foi mantido, porém a água de abastecimento foi substituída pelo efluente tratado, com o mesmo objetivo de promover a diluição da drenagem bruta afluente.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O reator foi inoculado com 468 ml de volume de inóculo e foi empregada uma diluição na alimentação do reator, de maneira a se atingir uma concentração afluente de sulfato em  $350 \text{ mg l}^{-1}$ , o que representa uma redução de 4,2 vezes nas concentrações constituintes da DAM. Assim sendo, a diluição aplicada implicou não somente em uma redução da concentração de sulfato, mas também na redução da quantidade de metais pesados em solução, assim como um ligeiro aumento de pH.

O pH afluente apresentou pequena variação ao longo do período de operação do reator, com um valor médio de 3,9. O pH da corrente efluente apresentou variação significativa na primeira fase. Após um período inicial de adaptação, observaram-se valores na corrente efluente de cerca de 6,0, mas verificou-se subsequente queda após o dia 60, estabilizando em um patamar de 4,54 antes da alteração na relação  $\text{DQO}/\text{SO}_4^{2-}$ . Na segunda fase, após a alteração da quantidade de etanol na alimentação, o pH efluente apresentou comportamento estável, em um patamar superior ao alcançado na etapa anterior, de 5,80. Essa melhora no desempenho do reator em termos de elevação do pH é um indicativo de uma melhoria da redução do sulfato, pois a geração de alcalinidade é uma das conseqüências deste processo biológico. Na fase III, como o reator passou a ser alimentado com drenagem bruta, nota-se queda no pH afluente e conseqüentemente queda no pH efluente. Mesmo com a diluição promovida pela recirculação com água de abastecimento, não foi possível manter o pH afluente mais elevado, como conseguido nas fases I e II. Entretanto, os resultados de análises de DQO e sulfato mostraram que o reator manteve-se eficiente, mesmo com um pH de entrada menor.

Com relação a remoção de DQO e sulfato (Figura 1), na fase I, o reator apresentou relativa estabilidade nas eficiências de remoção de sulfato e DQO. Após um período inicial de certa instabilidade na remoção de DQO, o reator apresenta um comportamento estável, com uma média de  $51,4\% \pm 12,4\%$  de eficiência de remoção de DQO durante a fase I. Ainda assim, a remoção de DQO na fase I ficou aquém do almejado, uma vez que, em um processo para a biorremediação de drenagem ácida, a presença de DQO residual é indesejada, pois implica em outros impactos ambientais. Com o aumento da relação  $\text{DQO}/\text{SO}_4^{2-}$  para 1,0 na fase II, o reator apresentou melhora na remoção de DQO, com uma eficiência média  $67,4\% \pm 10,2\%$ .

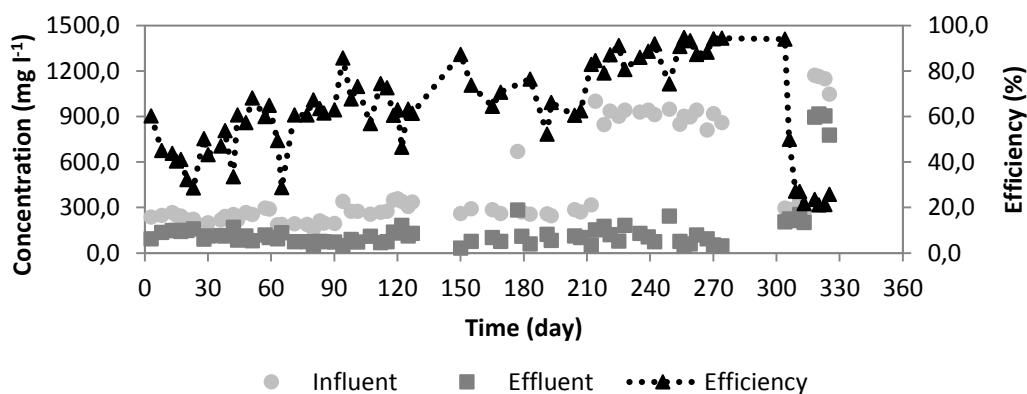


Figura 1. Eficiência de remoção de DQO no reator UASB.

Os resultados observados com a DQO ofereceram indicativos que o parâmetro mais determinante na eficiência do reator foi a carga de sulfato aplicada, que quando reduzida a valores de  $0,35 \text{ g l}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ , proporcionou eficiências de remoção de DQO próximas ou até superiores a 70%. Estudos preliminares com esse reator foram realizados com drenagem ácida sem diluição e mesmo após longo período de adaptação, o reator não foi capaz de desenvolver uma biomassa redutora de sulfato. Assim, a redução da carga de sulfato aplicada foi uma tentativa de melhorar os resultados obtidos até aquele momento. Com o início da fase III, inseriu-se o sistema de recirculação com água de abastecimento no reator. A eficiência na remoção da DQO sofreu ligeira melhora nesse período, ficando em  $85,5\% \pm 15,0\%$ . No caso do reator UASB, a mudança no regime hidrodinâmico parece ter favorecido as reações de oxidação da matéria orgânica. O início da fase IV, agora recirculando o efluente tratado resultou em queda brusca na eficiência de remoção da DQO. Na comparação das fases III e IV, estima-se que a recirculação do efluente tratado devolve ao sistema substâncias tóxicas que poderiam se acumular durante a remoção de sulfato, entre elas, o sulfeto de hidrogênio e os ácidos voláteis formados na oxidação da matéria orgânica. Como reportado por inúmeros autores na literatura (Tang *et al.*, 2009; Kaksonen e Puhakka, 2007; Lens e Kuenen, 2001) a toxicidade dos íons sulfetos pode ser bastante acentuada sobre o metabolismo bacteriano. Considerando que nesses reatores estariam presentes consórcios de microrganismos altamente estruturados, é de se esperar que o aumento de um composto tóxico seja capaz de inviabilizar a continuidade da operação desses sistemas.

O acúmulo de ácido acético analisado ao longo da operação do UASB esteve abaixo de  $100 \text{ mg l}^{-1}$ , com valores inferiores na fase I e III. Durante a fase I, o valor médio de acetato encontrado foi de  $12 \text{ mg l}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ , um valor considerado baixo e que sinalizou que a oxidação do etanol ocorreu completamente. Com o aumento do aporte de elétrons na fase II, o valor médio de acúmulo de acetato foi de  $24,8 \text{ mg l}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ , maior do que a fase anterior e que indicou que o excesso de matéria orgânica pode ter dificultado a oxidação completa por redutoras de sulfato completas, resultando em acúmulo de acetato. Com a inserção de recirculação (fase III e IV), as concentrações de ácido acético foram muito reduzidas, com média de  $1,8 \text{ mg l}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ . Durante a fase III, a oxidação da matéria orgânica ocorreu de maneira completa a gás carbônico e água, mesmo utilizando-se um excesso de elétrons.

Durante a fase I (Figura 2), o reator UASB apresentou uma remoção média de sulfato de  $46,3\% \pm 13,8\%$ . Com o aumento da relação DQO/SO<sub>42-</sub> para 1,0, rapidamente houve aumento da remoção de sulfato, com eficiência média nesta fase de  $85,6\% \pm 13,1\%$ . Na fase II, o reator parece ter encontrado as melhores condições para o seu funcionamento no que diz respeito a redução do íon sulfato.

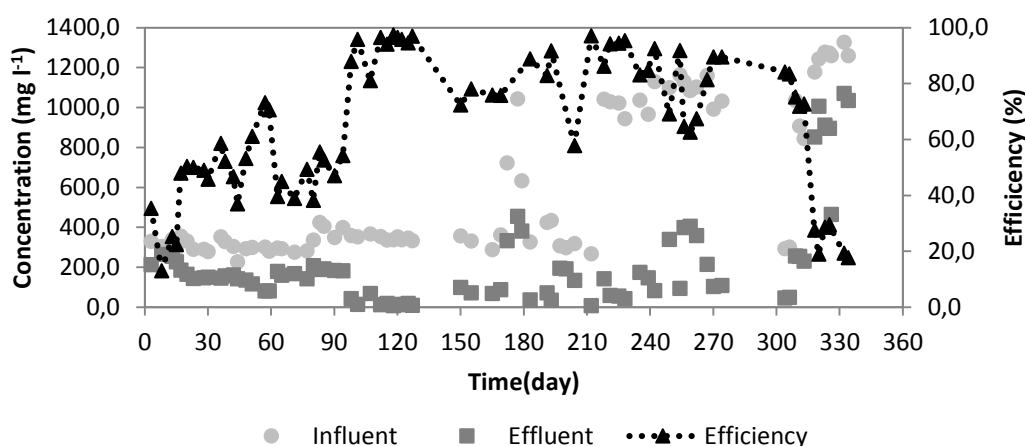


Figura 2. Eficiência de remoção de sulfato no reator UASB.

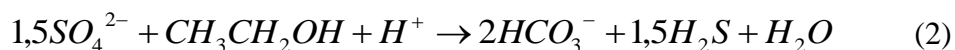
A redução de sulfato aumentou em conjunto com o aumento de elétrons disponíveis. A necessidade de matéria orgânica em quantidade acima da relação DQO/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> de 0,67 ocorre, pois essa é uma relação teórica, que assume que o todo o processo é conduzido por BRS que oxidam completamente o etanol. Contudo, essa consideração é demasiadamente simplificada, pois acaba por ignorar outros processos (tais como fermentação e oxidação incompleta) que podem ocorrer concomitantemente e que resultariam numa redução dos elétrons disponíveis para a redução do sulfato (Damianovic e Foresti, 2007). Com o início da recirculação com água de abastecimento (fase III), o sistema pouco se alterou quanto a eficiência na remoção de sulfato, permanecendo em 82,3% ±17,4%. Decididos a investigar a questão a influencia do escoamento hidrodinâmico e da toxicidade, o sistema de recirculação com água foi substituído pela recirculação com o efluente tratado, em uma razão de recirculação que mantivesse a mesma concentração de sulfato afluente adotada até então. O que se observa na fase IV, todavia, é que assim que a recirculação com água é substituída, o sistema entra em declínio quanto a remoção de sulfato, com eficiências inferiores a 50% de remoção. Duas possibilidades poderiam explicar esse resultado. Uma delas seria que o reator UASB sofreria menos impacto com a mudança no regime de escoamento provocada pela recirculação ou seria a toxicidade provocada pelo retorno ao sistema do sulfeto produzido durante a remoção do sulfato.

### 3.1. Balanço de massa

Utilizando-se das reações de oxidação completa e incompleta da matéria orgânica (equações 1 e 2), tentou-se estimar, para o reator UASB, os principais caminhos metabólicos microrganismos redutores de sulfato e a presença de outras vias de utilização da DQO que não a redução do sulfato (Tabela II). Na análise do reator não serão considerados os períodos de partida do reator e a fase IV na qual o reator se instabilizou após a inserção de recirculação do efluente tratado.



$$\Delta G^\circ = -69,2 \text{ kJ/mol etanol}$$



$$\Delta G^\circ = -162,28 \text{ kJ/mol etanol}$$

**Tabela II. Dados de eficiência de remoção de DQO e sulfato e acúmulo de ácido acético na etapa B de operação do reator UASB.**

Fase	Carga DQO removida (mg l <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> )	Carga etanol removida (mg l <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> )	Carga SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> removida (mg l <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> )	Ácido acético [Ef-Af] (mg l <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> )
I	117,0	56,0	146,0	12,0
II	203,0	97,0	303,0	25,0
III	800,0	383,0	880,0	2,0

A carga de DQO removida na fase I de operação do reator UASB se oxidada completamente a CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O resultaria em uma redução de 175 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> l<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>. Sabe-se que a concentração média de ácido acético gerada no sistema foi de 12,0 mg l<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>. Caso todo o acetato tenha sido originado da via oxidativa incompleta, seriam necessários 9,3 mg etanol l<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, o que corresponde a 19,4 mg DQO l<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>. Pela via incompleta, portanto, seria reduzidos 10,0 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> l<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>. Sendo a carga removida de DQO de 117 mg l<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>, restariam ainda 97 mg DQO l<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>. Essa quantidade de DQO poderia reduzir pela via completa 144 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> l<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>. Somando-se a quantidade de sulfato

removida em cada via (completa + incompleta), chega-se em  $154 \text{ mg SO}_4^{2-} \text{ l}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ , valor ligeiramente acima da carga de sulfato removida no sistema. Nota-se que na fase I de operação do reator UASB, o consumo de doador de elétrons ocorreu, provavelmente, apenas por bactérias redutoras de sulfato.

Durante a fase II, o acúmulo de acetato foi ligeiramente superior ao da fase I. Considerando, inicialmente, que as bactérias redutoras de sulfato tenham oxidado completamente o etanol, a carga removida de etanol de  $97 \text{ mg l}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  seria suficiente para reduzir  $304 \text{ mg SO}_4^{2-} \text{ l}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ . Isso significa que a via com maior rendimento de redução de sulfato resultaria em um valor idêntico àquele observado na fase II do reator. Entretanto, foi detectado acúmulo de acetato na saída do reator, o que significa que parte do etanol pode ter sido oxidada pela via incompleta ou, ainda, que outras fontes de matéria orgânica estivessem sendo utilizadas para oxidação. Como não era adicionada nenhuma fonte orgânica diferente do etanol, essa hipótese poderia ser atribuída à endogenia do sistema ou utilização de polímeros acumulados no reator.

Com a inserção de recirculação com água de abastecimento (fase III), foram obtidas remoções maiores de DQO e sulfato, visto que o reator passou a ser alimentado com drenagem bruta. Sabendo-se que não havia acetato a corrente efluente, foi realizado o balanço de massa para a oxidação completa do etanol. Dessa forma, a carga de sulfato removida deveria ser de  $1200 \text{ mg SO}_4^{2-} \text{ l}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ , porém o que foi detectado neste reator foi uma redução 24% menor do que o valor teórico. Como na fase II, o balanço de massa foi quase fechado, é interessante notar que com a recirculação, ocorreu um desvio na utilização da matéria orgânica para outras vias que não a redução do sulfato. A mudança do regime hidrodinâmico parece ter favorecido o desenvolvimento de comunidades microbianas que não utilizavam o sulfato como receptor de elétrons ou, ainda, estimularam a utilização de outros receptores de elétrons.

#### **4. CONCLUSÕES**

O presente trabalho permitiu uma melhor compreensão do processo de redução biológica de sulfato em águas de drenagem ácida de minas em reator UASB. A redução da concentração de sulfato e de metais e ligeiro aumento do pH, obtidos pela diluição da drenagem ácida, influenciaram positivamente o desempenho do reator. A relação DQO/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> parece exercer fundamental influência no processo de redução biológica de sulfato. O aumento da relação DQO/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> de 0,67 até 1 resultou em elevação da remoção de DQO de 61,4% para 68,1% e da remoção de sulfato de 50,6% para 86,2%. O início da recirculação foi favorável ao sistema por oferecer uma resposta tecnológica a diluição do afluente. Influenciou de maneira positiva a remoção de DQO, que aumentou de 68,1 % para 81,2%, enquanto manteve a remoção de sulfato estável em cerca de 86,0%. Entretanto, quando a recirculação foi realizada com efluente tratado, o reator entrou em colapso, provavelmente, devido ao acúmulo de sulfeto de hidrogênio na porção inicial da manta de lodo.

#### **5. AGRADECIMENTOS**

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-graduação da UNIFAL-MG, pelo apoio financeiro.

## 6. REFERÊNCIAS

Damianovic, M.H.R.Z., Foresti, E. Anaerobic degradation of synthetic wastewaters at different levels of sulfate and COD/sulfate ratios in horizontal-flow anaerobic reactors (HAIB). *Environmental Engineering Science*, v. 24, n. 3, p. 371-381, 2007.

Foresti, E.; Zaiat, M.; Vallero, M. Anaerobic processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: consolidated applications, new trends perspectives and challenges. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 5, p. 3-19, 2006.

Kaksonen, A.H.; Puhakka, J.A. Sulfate reduction based bioprocesses for the treatment of acid mine drainage and the recovery of metals. *Eng. Life Sci.*, v. 7, n. 6, p. 541-564, 2007.

Lens P.N.L.; Kuenen, J.G. The biological sulfur cycle: novel opportunities for environmental biotechnology. *Water Science and Technology*, v. 14, n. 8, p. 57-66, 2001.

Lyew, D.; Knowles R.; Sheppard J. The biological treatment of acid mine drainage under continuous flow conditions in a reactor. *Trans Icheme*, v. 72(B), p. 42-47, 1994.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th ed. American Public Health Association / American Water Works Association / Water Environment Federation, Washington, DC, USA, 2005.

Tang, K.; Baskaran, V.; Nemati, M. Bacteria of the sulfur cycle: An overview of microbiology, biokinetics and their role in petroleum and mining industries. *Biochemical Engineering Journal*, v. 44, p. 73-94, 2009.