

## Balanço Hídrico do Bota-fora BF4 da Mina de Urânio Osamu Utsumi, como Subsídio para Projetos de Remediação de Drenagem Ácida

Júlio René Toledo Fagundes, Adilson do Lago Leite, Carlos Eduardo Ferraz de Mello, Romero César Gomes

Departamento de Eng. Civil – UFOP

juniorene@yahoo.com.br, alleite@em.ufop.br, carlos@em.ufop.br, romero@em.ufop.br

Recebido: 02/09/05 – revisado: 10/10/06 – aceito: 14/12/07

---

### RESUMO

A drenagem ácida de mina (DAM) constitui um dos grandes problemas ambientais associados às atividades mineradoras. Ela se caracteriza basicamente pela elevação da acidez no meio e, conseqüentemente, pela dissolução de metais pesados associados às matrizes rochosas. O impacto direto da DAM se reflete na degradação da qualidade dos corpos hídricos, com suas conhecidas conseqüências. Inserido na avaliação da geração da DAM, o presente trabalho tem como objetivo principal a obtenção do balanço hídrico na região do bota-fora BF4, um dos maiores responsáveis pela formação da DAM na mina de urânio Osamu Utsumi, propriedade das Indústrias Nucleares do Brasil (INB), situada em Caldas MG. A utilização desta “ferramenta” hidrológica serviu como medida preliminar, na tentativa de determinação dos principais contribuintes hídricos e na melhoria do entendimento do fluxo aquoso para a geração de DAM, no local. Para o balanço, dados meteorológicos fornecidos pela INB e pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foram utilizados e também vazões hídricas monitoradas pela INB. Considerando-se as hipóteses adotadas, os resultados indicam a precipitação como o principal contribuinte para o volume de DAM gerado na base do BF4, norteando assim possíveis medidas de remediação.

**Palavras-chave:** drenagem ácida de mina, balanço hídrico, urânio, remediação.

---

### INTRODUÇÃO

A drenagem ácida de mina (DAM) é um fenômeno causado basicamente pela oxidação natural dos sulfetos dos depósitos e resíduos minerais, mediada por bactérias, em presença de água e oxigênio. Como resultado deste fenômeno tem-se a formação de ácido sulfúrico, responsável pela elevação da acidez no meio e, conseqüentemente, pela dissolução de metais pesados associados às matrizes rochosas. A degradação da qualidade ambiental de córregos e lagos e a mortandade de peixes e outras espécies aquáticas são alguns exemplos dos problemas gerados pela DAM.

Em vista disso e aliado ao fato de que muitas empresas têm despendido elevados recursos para o cumprimento de exigências legais de manutenção da qualidade ambiental, muitos pesquisadores têm se empenhado na busca do pleno conhecimento sobre o assunto e de soluções que visem minimizar os impactos causados pela DAM.

Diante desta questão se encontra a Mina de Urânio Osamu Utsumi, situada no Complexo Minerário-Industrial de Poços de Caldas (CIPC), Caldas, Minas Gerais. A jazida de urânio que deu origem à

referida mina foi descoberta em 1970 e em 1976 a Nuclebrás, empresa estatal titular da jazida na época, contratou a empresa francesa Uranium Pechiney Ugine Kuhlman (UPUK) para executar o projeto básico da mina e da usina de beneficiamento do minério. Com a estimativa de produção de 425 tU/ano durante 10 anos, as atividades tiveram início em 1977, com as operações de decapagem da mina. A comercialização do minério iniciou-se em 1982 e funcionou de forma descontínua até 1995, não atingindo as metas de produção anteriormente previstas (Cipriani, 2002).

Atualmente gerenciada pelas Indústrias Nucleares do Brasil (INB), a mina se encontra em processo de descomissionamento. Dentre as atividades a serem desenvolvidas, assume grande importância o tratamento e monitoramento da DAM gerada no CIPC.

No início da operação, a DAM oriunda dos resíduos da mina (bota-foras) era lançada diretamente nos córregos que drenam a microbacia existente, denominados de Consulta e do Cercado. Com a constatação do problema pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) em 1983, a coleta e o tratamento destas águas passaram a ser obrigatórios. O tratamento, que é executado na Estação de Tra-

tamento de Águas Marginais da mina, utiliza como insumos a cal hidratada para a elevação do nível de pH, e floculantes, que auxiliam na etapa de separação sólido-líquido.

Adicionalmente, o parâmetro econômico assume importância, uma vez que, entre 1994 e 2001, foram gastos aproximadamente US\$ 1,2 milhão com tratamentos corretivos dos efluentes ácidos gerados no CIPC. Atualmente, este procedimento onera a empresa em mais de US\$ 100 mil anuais (Cipriani, 2002).

Como grande contribuinte para o volume total dos efluentes ácidos que são tratados pela INB, o bota-fora BF4 representa o foco de estudo deste trabalho. Trata-se de um depósito de estéréis com volume de 12,4 milhões m<sup>3</sup>, abrangendo uma área de 569 mil m<sup>2</sup>, onde a drenagem ácida gerada e coletada em sua base (bacia BNF), com pH em torno de 3 a 3,5, é continuamente bombeada para a cava exaurida da mina. Seus efluentes ácidos, com volumes médios anuais da ordem de 5 x 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>, representam cerca de 40% de todo volume de DAM tratado no CIPC (Prado, 1994).

O regime de fluxo hídrico do bota-fora BF4 ainda não foi bem definido e, desta forma, os contribuintes para geração de drenagem ácida em sua região de abrangência são ainda desconhecidos. Assim, trabalhos que objetivem determinar o entendimento do real regime de fluxo neste bota-fora constituem contribuições significativas para possíveis medidas que possam reduzir o volume de drenagem ácida gerado e, por conseqüência, tratado.

A riqueza dos dados de monitoramento ambiental gerados na região da mina em função dos programas de radioproteção induz ao aproveitamento destes dados para outras finalidades, eliminando custos onerosos ao Estado.

Neste sentido, a obtenção do balanço hídrico na região do BF4 servirá como medida preliminar, na tentativa da determinação dos principais contribuintes hídricos para a geração de DAM no local, além de fornecer indícios técnicos para futuras incursões que visem minimizar os volumes de DAM gerados.

Espera-se que tal procedimento possa ser testado e futuramente aplicado a outros empreendimentos mineiros, que normalmente causam grande impacto aos recursos hídricos.

## DRENAGEM ÁCIDA

Resultante do fenômeno da oxidação natural de minerais sulfetados, na presença de oxigênio,

água e bactérias, o problema da drenagem ácida de mina (DAM) se caracteriza pela formação de ácido sulfúrico e elevadas concentrações de metais dissolvidos (Carvalho e Ferreira, 2003). Basicamente, o problema se inicia com a exposição ao oxigênio de grandes volumes de solo ou rocha que contenham esses minerais.

O ácido sulfúrico produzido pelo fenômeno, responsável pelo rebaixamento do pH, solubiliza metais pesados como arsênio, cádmio, zinco, urânio e outros, eventualmente presentes nos depósitos de rocha e solo locais. Estes metais são então transportados pela drenagem e podem posteriormente atingir mananciais superficiais ou mesmo os lençóis subterrâneos (Carvalho e Ferreira, 2003). A Figura 1 retrata esquematicamente o processo de formação da drenagem ácida numa pilha de rejeitos de mineração.

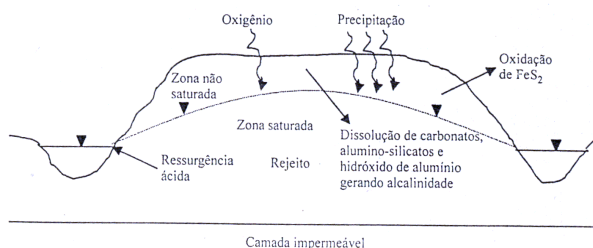
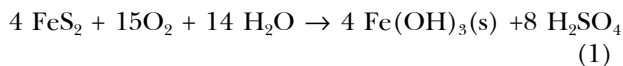


Figura 1 - Formação de drenagem ácida de mina em pilha de rejeito de mineração (Yanful e St-Arnaud, 1990, citado por Pastore e Miotto, 2000).

Embora qualquer depósito mineral que contenha sulfetos seja uma fonte potencial de DAM, certos tipos de minerais são mais propensos à geração que outros (Sullivan et al., 1995, citado por Gray, 1996). Dentre eles podem ser citados: pirita, arsenopirita, bornita, calcocita, calcopirita, marcasita, pirrotita, etc (Fergusson e Erickson, 1988, citado por U.S. EPA, 1994).

A pirita é o mais importante mineral associado à geração de DAM e está relacionada com muitos metais como o zinco, urânio, ouro, prata, etc. A quebra deste mineral é afetada por variações em sua morfologia, como grau de cristalinidade, tamanho das partículas e reatividade (Rodrigues, 2001). Segundo Fergusson e Erickson (1987), citados por Pastore e Miotto (2000), a reação global que descreve o processo da geração de DAM é descrita pela reação (1).



Dentre os microorganismos envolvidos nas reações de oxidação da pirita, a *Thiobacillus ferrooxidans* é a principal bactéria de interesse no estudo do fenômeno da DAM. Estando em condições propícias de atividade (pH na faixa de 3 a 4 e temperatura entre 20 e 40°C), ela pode acelerar substancialmente a taxa de oxidação do S (enxofre) e do íon  $\text{Fe}^{2+}$  a íon  $\text{Fe}^{3+}$ . Segundo Stumm e Morgan (1970), citados por Evangelou e Zhang (1995), esta reação é considerada o principal passo da oxidação da pirita. Conseqüentemente, um aumento na geração da drenagem ácida pode se dar por um fator que varia de 5 até 20 quando da presença de bactérias (Sengupta, 1993).

### BOTA FORA BF 4 - CONTEXTUALIZAÇÃO

A mina exaurida de urânio Osamu Utsumi se situa na grande caldeira vulcânica alcalina de Poços de Caldas, de idade cretácea. Tal caldeira tem como expressão geomorfológica o chamado Planalto de Poços de Caldas.

A Figura 2 mostra o arranjo geográfico do CIPC, com destaque para o bota-fora BF4.

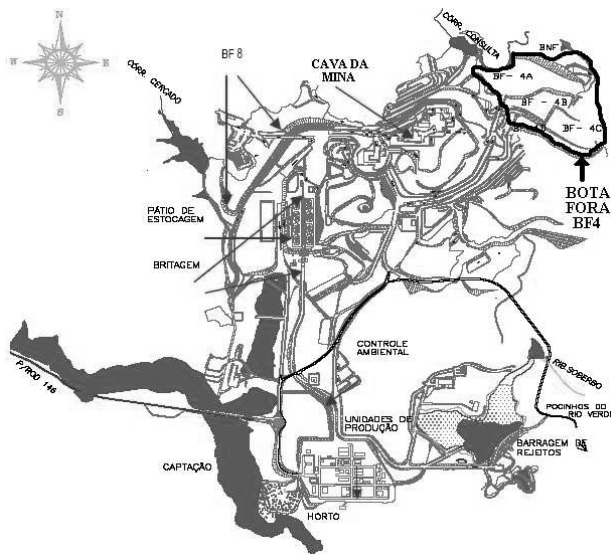


Figura 2 – Arranjo geográfico da Mina Osamu Utsumi e do bota-fora BF4 (Adaptado de Cipriani, 2002.).

A exploração da jazida de urânio desta mina (jazida do Cercado) culminou numa cava de forma aproximadamente circular, de diâmetro e profundidade de cerca de 1200 e 176 m respectivamente (ver

Figura 2). O material oriundo da decapagem da mina (1ª fase de lavra), caracterizado como estéril, era encaminhado aos locais definidos como bota-foras. A Tabela 1 apresenta as quantidades de material dispostas nos bota-foras e suas respectivas áreas. Já o minério lavrado (2ª fase) era dirigido ao pátio de alimentação do britador primário, onde o processo de beneficiamento se iniciava.

Tabela 1 – Características dos bota-foras do CIPC

Bota-fora	Volume (1000 m <sup>3</sup> )	Massa <sup>1</sup> (1000 t)	Área (ha)
BF1	4400	8800	25,5
BF3	9800	19600	20,5
BF4	12400	24800	56,9
BF7	2400	4800	5,3
BF8	15000	30000	64,4
BF - Cava	560	1120	
Total	44560	89120	172,6

Fonte: Wiikman, 1998. Adaptado pelo autor. <sup>1</sup> – estimado.

Com área superficial de 569 mil m<sup>2</sup>, volume de 12,4 milhões m<sup>3</sup>, altura de talude de 90 m e inclinação de 70°, o bota-fora BF4 (Figura 3) foi executado sobre uma vertente do córrego da Consulta, pertencente à bacia do Rio Verde. Esta configuração do depósito favorece a saída da drenagem ácida por um único ponto bem definido em sua base, reduzindo consideravelmente os parâmetros de controle e monitoramento para o seu estudo (Wiikmann, 1998).



Figura 3 – Vista parcial do bota-fora BF4.

Depositados pelo método de avanço por ponta de aterro, os estéréis encaminhados ao BF4 são, em quase sua totalidade, oriundos da decapagem e da triagem da lavra do corpo B da mina. A mineralogia do material mostra que a matriz é constituída por massas tinguaíticas/fenolíticas, onde o feldspato potássico e a sericita são os minerais dominantes. Por sua vez, estes são constantemente impregnados por produtos hidrotermais, tais como pirita, fluorita, minerais de urânio, molibdênio e zircônio (Cipriani, 2002).

Com o objetivo de aumentar a estabilidade física do depósito e de reduzir as alterações das águas do córrego, foi executado um desvio de cerca de 500 m no córrego da Consulta, lançando suas águas num ponto à jusante em relação ao bota-fora. A fim de se evitar a percolação de águas pluviais através da massa de rejeitos e o conseqüente aumento das águas de drenagem contaminadas, foi realizada sobre a superfície do canal uma cobertura com uma camada de 20 a 30 cm de espessura de argila compactada (Wiikmann, 1998).

No início da operação da mina, a drenagem ácida do BF4 era lançada no córrego do Consulta. No decorrer do monitoramento, foi percebido um aumento significativo no teor de urânio e de outros elementos nas drenagens à jusante da mina.

Quando o problema da drenagem ácida foi constatado, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) exigiu a construção de bacias de captação das águas da mina e dos bota-foras, além do tratamento de todo o volume esgotado no meio ambiente. Este procedimento visava a neutralização da acidez, a precipitação dos radionuclídeos e metais pesados e a decantação dos sólidos em suspensão (Cipriani, 2002).

Em 1989 foi construída uma barragem de contenção das águas ácidas que fluíam da base do BF4, denominada de Bacia BNF. Desde então as águas retidas por este barramento passaram a ser bombeadas para a cava da mina. Neste local, outro conjunto moto-bomba transfere suas águas ácidas para uma estação de tratamento, onde são feitas as correções necessárias de pH, (elevação para pH = 10) com a adição de cal hidratada (Cipriani, 2002).

O tratamento das águas de drenagem do bota-fora BF4 resultou num aumento de 60 a 80% no volume de águas tratadas no CIPC, nos anos de 1990 e 1991, em relação ao ano de 1989 (Prado, 1994). Estudos realizados por Prado (1994) indicaram a necessidade da manutenção de um tratamento constante, uma vez que qualquer interrupção provocaria imediato aumento da concentração de poluentes lançados nos córregos.

## BALANÇO HÍDRICO DO BOTA-FORA BF4

Utilizando o princípio da conservação de massa, o balanço hídrico é o tópico da hidrologia que visa quantificar, em termos de volume, os processos naturais que integram o ciclo hidrológico. Expresso na forma de equação, ele se caracteriza basicamente pela diferença entre a quantidade de água que entra e a que sai de um elemento ou volume de controle pré-determinado, ou seja:

$$[Quantidade\ que\ entra\ no\ vol.\ de\ controle] - [Quantidade\ que\ sai\ do\ volume\ de\ controle] = [variação\ da\ quantidade\ acumulada\ no\ interior\ do\ elemento\ de\ controle]$$

Nestes termos, dois tipos de análises podem ser realizadas quando da aplicação do balanço hídrico: (a) desconsiderando-se o escoamento subterrâneo e (b) considerando-se o escoamento subterrâneo.

No caso (a), o balanço hídrico pode ser escrito da seguinte forma:

$$[P + R_{in}] - [R_{out} + E + T + I] = \Delta V_{ECS} \quad (2)$$

Sendo que:

P – precipitação;

$R_{in}$  – escoamento superficial de entrada;

$R_{out}$  – escoamento superficial de saída;

E – evaporação;

T – transpiração vegetal;

I – infiltração;

$\Delta V_{ECS}$  – variação do volume de água na superfície do solo.

Devido à dificuldade de quantificação de E e T separadamente numa determinada área ou região, é comum a mensuração destes dois processos em conjunto, através da variável evapotranspiração (ET) (Tucci, 2002). Desta forma, a equação (2) pode ser assim rescrita:

$$[P + R_{in}] - [R_{out} + ET + I] = \Delta V_{ECS} \quad (3)$$

Na análise do caso (b), que inclui a consideração do escoamento subterrâneo, a equação do balanço hídrico toma a seguinte forma:

$$[P + R_{in} + G_{in}] - [ET + R_{out} + G_{out}] = \Delta V_{EC} \quad (4)$$

em que:

$G_{in}$  – escoamento subterrâneo de entrada;

$G_{out}$  – escoamento subterrâneo de saída;

ET – evapotranspiração;

$\Delta V_{EC}$  – variação do volume de água no solo (subsuperfície).

A quantificação de cada uma das variáveis do balanço hídrico constitui um desafio a ser solucionado em projetos cujo objetivo é o de conhecer a demanda-disponibilidade de água. Em nível global, o ciclo hidrológico é considerado fechado. Entretanto, em nível local esta consideração pode não ser válida, uma vez que há movimentos contínuos, com dinâmicas diferentes na atmosfera e na superfície terrestre (Tucci, 2002).

Como um meio de se contornar este problema em sistemas abertos ou locais, surge o conceito de bacia hidrográfica, que consiste numa unidade hidrológica de captação natural da água da precipitação. Nela, os escoamentos superficiais convergem para um único ponto, o exutório (Tucci, 2002). A área de uma bacia hidrográfica é definida topograficamente, de modo que seu contorno (divisor de águas) coincida com os pontos de cota máxima entre bacias vizinhas e que seja cortado somente por um curso d'água, na seção de saída. Dessa forma, ela pode constituir um instrumento de grande valia, devido à simplicidade que oferece para a aplicação da equação do balanço hídrico (Barbosa Jr., 2002).

Neste sentido, o primeiro passo para o balanço hídrico do BF4 consistiu na delimitação de sua microbacia, utilizando-se para isto um mapa topográfico atualizado da mina. Esta delimitação foi feita por meio do reconhecimento de divisores de águas superficiais, tendo como base somente as características topográficas. A bacia BNF, localizada na base do BF4, foi definida como o ponto exutório. A área de contribuição (A) da microbacia foi calculada em aproximadamente  $8,35 \times 10^5 \text{ m}^2$ , sendo maior que a área do BF4 propriamente dito, avaliada em torno de  $5,69 \times 10^5 \text{ m}^2$ .

O balanço hídrico foi desenvolvido em termos médios, tendo como base a equação (4), que considera o volume de controle como sendo constituído pela camada superficial de solo mais o subsolo. Acrescenta-se que algumas considerações foram feitas, com o objetivo de simplificar os cálculos deste balanço, sendo:

- segundo Tucci (2002), numa análise de longo período (como um ciclo anual, por exemplo) e considerando-se termos médios, a soma das variações positivas e negativas do volume de água acumulado no elemento de

controle tende a se anular. Logo, a  $\Delta V_{EC}$  pode ser desprezada;

- como só ocorre escoamento superficial através da linha de contorno da bacia hidrográfica no seu exutório, pode-se afirmar que a componente  $R_{in}$  é igual a zero;
- acredita-se que o escoamento superficial seja mínimo, por tratar-se de um material inconsolidado e bastante permeável. Ao mesmo tempo não foram visualizados registros erosivos na superfície do BF4, apesar da total ausência de obras de drenagem. Optou-se então por desprezar-se o escoamento superficial, desprezando-se os termos  $R_{in}$  e  $R_{out}$  da equação (4).

Sendo assim, a equação que caracteriza o balanço hídrico do bota-fora BF4 toma a seguinte forma:

$$[P - ET].A + G_{in} = G_{out} \quad (5)$$

sendo A a área de contribuição da microbacia, introduzida na equação de modo a homogeneizar as dimensões dos termos para volume.

As águas ácidas drenadas no pé do BF4 e retidas na bacia BNF são decorrentes do escoamento subterrâneo que volta à superfície. Desta forma, a vazão que a BNF recebe foi considerada como sendo a parcela  $G_{out}$  da equação (5), que se refere ao escoamento subterrâneo de saída.

O Laboratório de Controle Ambiental da INB (LCA) disponibilizou um grande conjunto de dados de monitoramento que foram utilizados neste balanço, dentre os quais os de precipitação (P) e de  $G_{out}$ .

Os dados de  $G_{out}$  correspondem a registros de vazão feitos na base do BF4 (BNF) durante o período de janeiro de 1998 a agosto de 2004. Estes dados foram determinados por medição direta, que consistia da contagem do tempo gasto para o preenchimento de tambores, cujos volumes eram previamente conhecidos. Este procedimento era efetuado uma vez a cada mês, de modo que a vazão medida correspondia a uma vazão instantânea no dia da mensuração. Tal prática era efetuada pela INB, com anuência da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Neste trabalho estes dados foram assumidos como sendo a vazão média mensal drenada durante o mês de medição. Acredita-se que as flutuações do lençol freático normalmente não são muito

significativas no local dentro do período de um mês, justificando-se tal generalização.

Porém, havia ainda a necessidade de se estimar mensalmente o valor de ET. Para tanto, foi necessário adotar um modelo matemático de estimativa de ET que pudesse contemplar o maior número possível dos dados de monitoramento disponíveis e, com isso, retratar mais fielmente as condições reinantes no BF4.

Em relação aos modelos, eles procuram estimar o valor da evapotranspiração potencial ( $ET_p$ ), que é aquela existente em uma região com disponibilidade hídrica, ou cuja umidade do solo não seja um fator limitante. Ou seja, a  $ET_p$  refere-se ao valor da evapotranspiração hipotética de uma superfície extensa, completamente coberta por vegetação de porte baixo e bem suprida de água (Tucci, 2002).

Considerando-se que a região do BF4 possui um alto índice pluviométrico (da ordem de 1500 mm/ano), acredita-se que haja disponibilidade hídrica no solo passível de evapotranspiração durante todo o ano. Nestas condições, como definido anteriormente, espera-se que os valores de  $ET_p$  possam representar com grande aproximação os valores reais de ET.

O modelo então escolhido para a estimativa da  $ET_p$  utilizada na equação (7), foi o proposto por Penman, que é considerado na comunidade científica como um dos mais completos (Tucci, 2002). Também conhecido como modelo combinado, este método baseia-se no balanço de energia, aliado às características aerodinâmicas do processo. Desta forma, sua aplicação requer o conhecimento de inúmeros parâmetros, tais como temperatura, umidade, velocidade dos ventos, insolação, posição geográfica etc. Mais detalhes sobre este modelo podem ser encontrados em livro textos de hidrologia, como Tucci (2002) e outros.

Dos parâmetros meteorológicos necessários para a aplicação do modelo de Penman, a insolação era o único sobre o qual o LCA/INB não tinha informações. Para suprir esta deficiência foram utilizados os registros de insolação da estação meteorológica de Caldas/MG, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Gentilmente cedidos pelo 5º Distrito de Meteorologia do INMET, estes dados estão compreendidos entre janeiro de 1989 e dezembro de 2004, sendo que a referida estação situa-se a aproximadamente 15 km do CIPC.

Outros parâmetros do modelo de Penman, como  $\alpha$  e  $\beta$ , são variáveis de local para local e levam em consideração o conteúdo de vapor d'água na atmosfera, a altitude do terreno e a espessura das nuvens (Barbosa Jr., 2002). Neste estudo, pelo fato

do município de Lavras/MG ser a localidade mais próxima à INB/Caldas que possui referência a esses valores na literatura, optou-se por utilizar os parâmetros desta cidade. Dantas et al. (2003) determinaram que os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  para Lavras valem, respectivamente, 0,23 e 0,49.

O albedo ou fator de reflectância ( $a$ ), utilizado no modelo de Penman, é um parâmetro de difícil determinação e varia de acordo com o tipo de superfície. Segundo Sellers (1965), para solos nus e levemente arenosos, o valor de  $a$  varia de 0,25 a 0,45. Para Tucci (2002), solos arenosos secos apresentam albedos variando entre 0,15 e 0,45. Demattê et al. (2004) estudaram o albedo de três classes de solo do estado de São Paulo, incluindo um Podzólico Vermelho-Amarelo. Dentre todos os solos anteriormente citados, talvez o que mais se pareça com o material disposto no BF4 seja este último, cujos resultados de Demattê et al. (2004) apontam uma variação de  $a$  entre 0,30 a 0,35. Portanto, as análises feitas neste trabalho consideraram um valor intermediário:  $a = 0,32$ .

Logo, a realização do balanço hídrico na região do BF4, baseada na equação (5), consistiu na comparação mensal das parcelas  $[P - ET_p].A$  e  $G_{out}$ , sendo a diferença destas atribuída ao escoamento subterrâneo de entrada ( $G_{in}$ ).

Uma vez que os escoamentos superficiais ( $R_n$  e  $R_{out}$ ) no BF4 foram desprezados e subtraídos da equação do balanço hídrico, optou-se por considerar que a taxa de precipitação ( $P$ ) subtraída da evapotranspiração potencial ( $ET_p$ ) seria igual à infiltração, ou seja, a passagem de água da superfície para o interior do solo. Sendo assim, a equação (5) toma a seguinte forma:

$$IA + G_{in} = G_{out} \quad (6)$$

Portanto, segundo as hipóteses assumidas neste trabalho, uma vez que se estabeleça um regime de fluxo permanente no BF4, todo o volume infiltrado deveria atingir a água subterrânea e, a partir de seu fluxo, alcançar a base do BF4 (BNF) ou outros caminhos de percolação. Desta forma, caso este volume seja inferior ao volume coletado na BNF, haveria, em tese, contribuição de outras origens para a geração da drenagem ácida no BF4. De modo inverso, se o volume infiltrado superasse o coletado, o excedente líquido estaria percolando para outros locais, contribuindo para alimentar bacias adjacentes.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Precipitação (P)

Instalada dentro dos limites da mina Osamu Utsumi, a estação pluviométrica situa-se à aproximadamente 2,5 km do BF4. O LCA/INB possui registros mensais de precipitação desde julho de 1976 até os dias atuais. No entanto, somente foram analisados os dados a janeiro de 1998 a dezembro de 2004, os quais correspondiam ao período dos dados de vazão na base do BF4 ( $G_{out}$ ).

O grau de homogeneidade dos registros desta estação foi avaliado, aproveitando-se a proximidade de outras três estações, distantes até 7 km do BF4. O método empregado para tal foi o da dupla massa da *U. S. Geological Survey* e é válido para séries mensais e anuais (Barbosa Jr., 2002).

O resultado desta avaliação foi considerado muito satisfatório, uma vez que o coeficiente de determinação esteve muito próximo da unidade ( $R^2 = 0,9992$ ). Sendo assim, os índices mensais médios de pluviometria foram determinados para utilização nas equações (5) e (6), referente ao balanço hídrico do BF4. A Tabela 3 apresenta estes índices pluviométricos, bem como a precipitação acumulada média anual para o local.

**Tabela 3 – Índices pluviométricos mensais médios e total médio anual (1998 a 2004).**

MÊS	MÉDIA (mm)
Janeiro	286,58
Fevereiro	248,44
Março	154,95
Abril	79,04
Maio	68,02
Junho	21,91
Julho	19,42
Agosto	24,98
Setembro	61,24
Outubro	99,24
Novembro	159,80
Dezembro	247,04
<b>ANUAL</b>	<b>1.470,66</b>

A análise destes valores indica a presença de duas estações marcantes: a de estiagem, compreendida entre os meses de abril e outubro, quando as precipitações mensais são menores que 100 mm/mês, e outra chuvosa, de novembro a março. O mês de janeiro se caracteriza como sendo o de maior intensidade pluviométrica, com média próxima a

300 mm/mês, enquanto o mês de julho é o de menor intensidade, registrando média inferior a 20 mm/mês.

### Evapotranspiração Potencial ( $ET_p$ )

Em função de todo o universo de dados disponíveis, todas as variáveis relativas à equação de Penman puderam ser determinadas com razoável precisão. Os resultados de  $ET_p$  obtidos segundo esta equação são expostos na Tabela 4.

**Tabela 4 – Evapotranspiração potencial mensal (mm).**

MÊS	$ET_p$ (mm)
Janeiro	87,86
Fevereiro	84,40
Março	81,58
Abril	69,26
Maio	53,12
Junho	53,02
Julho	52,48
Agosto	77,89
Setembro	92,53
Outubro	102,70
Novembro	92,86
Dezembro	99,29
<b>ANUAL</b>	<b>946,99</b>

**Tabela 5 – Volumes médios mensais e anual de  $G_{out}$  coletados na BNF (01/1998 a 08/2004).**

MÊS	VOLUME ( $m^3$ )
Janeiro	49986,17
Fevereiro	48748,80
Março	53621,14
Abril	49453,71
Maio	50007,43
Junho	45617,14
Julho	47541,60
Agosto	43779,09
Setembro	40488,00
Outubro	40932,40
Novembro	42312,00
Dezembro	46016,40
<b>ANUAL</b>	<b>558.503,89</b>

### Vazão na BNF ( $G_{out}$ )

Disponibilizadas as vazões na base do BF4 – bacia BNF - ( $G_{out}$ ), suas médias aritméticas foram

calculadas para os meses correspondentes ao período de janeiro de 1998 a agosto de 2004. A partir daí, considerando-se o número de dias de cada mês, foram obtidos os volumes médios mensais escoados na base do BF4. A Tabela 5 apresenta os valores mensais de  $G_{out}$ , além do volume anual médio coletado na BNF.

### Diferença [P – ET<sub>p</sub>] no BF4

Devido às dificuldades na determinação dos valores mensais de  $\Delta V_{EC}$  no BF4, optou-se pela realização de uma análise anual do balanço hídrico, que prevê que a soma das variações positivas e negativas do volume de água acumulado no solo tende a se anular numa consideração de longo período.

Sendo assim, o parâmetro [P – ET<sub>p</sub>] foi calculado com base nos somatórios anuais constantes das tabelas 3 e 4, totalizando a quantia de 0,52367 m anuais.

### Balço Hídrico

Como mencionado anteriormente, o balanço hídrico do BF4 foi estabelecido com base na Equação (5), sendo aplicados valores médios, em análise anual.

A Tabela 6 apresenta a comparação entre os volumes médios medidos na bacia BNF ( $G_{out}$ ) e os valores de [P – ET<sub>p</sub>].A, sendo A estimado em 834778,6 m<sup>2</sup>.

**Tabela 6 – Comparação dos volumes relacionados às parcelas da Equação (5).**

Parcela	Volume (m <sup>3</sup> )	Diferença (%)
$G_{out}$	558.503,9	–
[P – ET <sub>p</sub> ].A	437.148,5	–
[P – ET <sub>p</sub> ].A – $G_{out}$	– (121.355,4)	+21,73

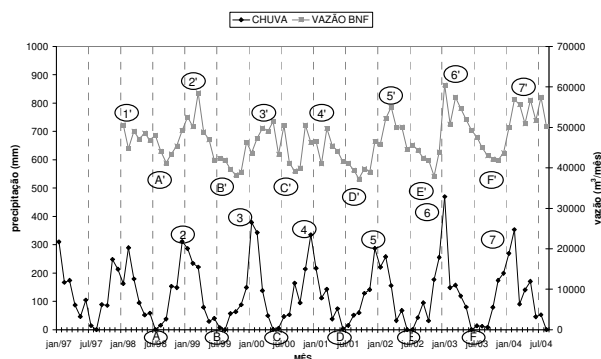
De acordo com a abordagem deste trabalho, as diferenças reveladas referem-se à parcela  $G_{in}$  da Equação (5). Quando positivas, as diferenças indicam a existência de contribuições hídricas subterrâneas para o volume de controle analisado, no caso, o BF4. De modo inverso, isto é, quando negativas, fugas subterrâneas para outras bacias adjacentes podem estar ocorrendo.

Observando-se a Tabela 6, esta diferença foi positiva, indicando uma contribuição de 121.355,4 m<sup>3</sup> das bacias adjacentes para a bacia BF4. Como mostra esta tabela, tal contribuição representa

21,73% em relação ao total inferido para a vazão na base do BF4 ( $G_{out}$ ), sendo o restante, 78,27%, representado pela precipitação e infiltração.

Na tentativa de se avaliar melhor a relação entre a precipitação e  $G_{out}$ , um diagrama cartesiano foi elaborado, como mostra a Figura 4. Nela, em ambos os gráficos gerados os pontos ordenados numericamente referem-se aos valores máximos, enquanto os de ordem alfabética, aos valores mínimos. Aqueles assinalados com apóstrofe (') designam os pontos na curva de vazão na BNF ( $G_{out}$ ). Adotando-se este artifício, procurou-se fazer comparações entre os pontos correspondentes de ambos os gráficos.

Em termos de forma, é possível notar algumas semelhanças de comportamento em alguns trechos dos gráficos da Figura 4. Dentre os pontos de vazões mínimas A' a F' verifica-se uma tendência geral deles se situarem em torno de 40000 m<sup>3</sup>/mês, correspondendo-se claramente com os picos de precipitação mínima A a F. Entretanto, as correlações entre os picos máximos de precipitação e de vazão não se mostraram muito claras. Outro fato que pode ser percebido é que os picos de vazão tendem a ocorrer depois de dois ou três meses após os picos de precipitação, considerado como tempo de retardo (*lag time*).



**Figura 4 – Correlação da precipitação (P) com a vazão na BNF ( $G_{out}$ ) – período de 01/1997 a 08/2004.**

Em resumo, o presente balanço hídrico envolveu a abordagem de bacia hidrográfica para a pilha de estéril BF4 da INB. Neste balanço algumas hipóteses foram assumidas, tais como: (I) considerou-se o escoamento subterrâneo; (II) exclusão do escoamento superficial e (III) as vazões de um dia medidas pela INB na base do BF4 representavam valores mensais médios.



Com isto, os resultados obtidos por meio do uso da equação (5) e do digrama da Figura 4 reforçam a conclusão de que a precipitação pluviométrica com sua consequente infiltração são os maiores contribuintes para a geração de drenagem ácida na base do BF4. Sendo assim, medidas que possam diminuir a infiltração são indicadas para esta pilha com o objetivo de se diminuir a geração de DAM.

## CONCLUSÕES

Nesta pesquisa um modelo de balanço hídrico foi aplicado, incorporando-se algumas hipóteses simplificadoras. Os resultados mostraram a significativa contribuição hídrica da precipitação para a vazão na base do BF4 ( $G_{out}$ ).

Segundo o balanço hídrico, esta contribuição alcança 437.148,5 m<sup>3</sup>, o que corresponde a 78,3 % de  $G_{out}$ . O restante, 121.355,39 m<sup>3</sup> (21,73%), é proveniente de outras bacias, provavelmente com grande contribuição da bacia do Córrego da Consulta, o qual foi desviado para área adjacente ao BF4.

Adicionalmente, parece existir uma correspondência temporal entre os gráficos de precipitação e  $G_{out}$ . O tempo de retardo (*lag time*) encontrado para esta correspondência temporal foi de aproximadamente 2 a 4 meses. Isto reforça ainda mais a relação hídrica entre a pluviometria, infiltração e a variação de  $G_{out}$ .

Considerando-se o cunho empírico-teórico do balanço hídrico e a quantidade de variáveis medidas e estimadas para sua realização, acredita-se que mesmo os erros implícitos ao modelo utilizado não comprometam a interpretação imediata de que a maior parte da vazão na base do BF4 é proveniente da precipitação. Desta forma, em médio e longo prazo, ao ser interrompida a infiltração decorrente da precipitação, esta vazão possivelmente sofrerá grande impacto, reduzindo-se o volume de DAM gerado neste bota-fora.

Sugere-se a construção de um sistema de cobertura no topo do BF4, o que promoverá a diminuição da infiltração e redução substancial da geração de DAM.

## AGRADECIMENTOS

Os autores expressão seus agradecimentos às Industrias Nucleares do Brasil S/A (INB), pelo

apoio a esta pesquisa e também ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), por ceder os dados de insolação utilizados nesta pesquisa. O primeiro autor agradece à CAPES pela bolsa de mestrado cedida.

## REFERÊNCIAS

- BARBOSA JR., A. R. (2002). *Hidrologia aplicada*. Apostila de curso. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.
- CARVALHO, M. S.; FERREIRA, E. M. (2003). *Estudo para eliminar metais radioativos e outros efluentes industriais pode recuperar águas para uso agrícola ou industrial*. Resumo. Site: "http://www.ien.gov.br/noticias/midia\_arquivo/canalciencia\_140803.pdf".
- CIPRIANI, M. (2002). *Mitigação dos impactos sociais e ambientais decorrentes do fechamento definitivo de minas de urânio*. Tese. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 332 p.
- DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA E. (2003). *Estimativa da radiação solar global para a região de Lavras, MG*. Revista Ciência e Agrotecnologia – "http://www.editora.ufla.br/revista/27\_6/art08.htm".
- DEMATTÊ, J. A. M.; TOLEDO, A. M. A.; SIMOES, M. S. (2004) *Metodologia para reconhecimento de três solos por sensores: laboratorial e orbital*. Rev. Bras. Ciênc. Solo, Sept./Oct., vol.28, no.5, p.877-889.
- EVANGELOU, V. P.; ZHANG, Y. L. (1995). *A review: pyrite oxidation mechanisms and acid mine drainage prevention*. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*: p. 141 – 149.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall, Inc. 604 p.
- GRAY, N. F. (1996). *Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem*. *Environmental Geology Journal*, v. 30, p. 62-71.
- PASTORE, E.L.; MIOTO, J.A. (2000). *Impactos ambientais em mineração com ênfase à drenagem mineira ácida e transporte de contaminates*. Solos e Rochas – Revista Latino-americana de Geotecnia, v. 23. p. 33-53.
- PRADO, V. C. S. (1994). *O impacto da produção de concentrado de urânio sobre a qualidade da água dos rios – Um estudo de caso na área do Complexo Mínero-Industrial de Poços de Caldas*. Dissertação. UFRJ, COPPE. Rio de Janeiro, RJ, 195 p.
- RODRIGUES, J. A. (2001). *Drenagem ácida do bota-fora 4 (Mina de urânio de Caldas – MG): aspectos hidroquímicos e hidrogeológicos*. Dissertação. Departamento de Geologia, UFOP. 270 p.

- SELLERS, W.D (1965). *Physical climatology*. The Univ. of Chicago Press, EUA. 272 p.
- SENGUPTA, M. (1993). *Environmental impacts of mining – monitoring, restoration, and control*. Lewis Publishers, v. 1, 494 p.
- TUCCI, C. E. M. (organizador) (2002). *Hidrologia: ciência e aplicação*. 3ª ed. Editora da UFRGS/ABRH, Porto Alegre, RS, 943 p.
- U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – U. S. EPA (1994). *Acid mine drainage prediction*. Technical Document, p. 1-32.
- WIKMANN, L. O. (1998). *Caracterização química e radiológica dos estereis provenientes da mineração de urânio do Planalto de Poços de Caldas*. Dissertação. Centro de Energia Nuclear na Agricultura, USP, Piracicaba, SP, 98 p.

***The Water Balance of the BF4 Waste Pile at the Osamu Utsumi Uranium Mine, as a Contribution to Future Acid Drainage Remediation Projects***

**ABSTRACT**

*Acid mine drainage (AMD) is a major environmental concern associated with mining activities. It promotes water acidification followed by heavy metals dissolution when associated with minerals in the rock matrix. The direct impact of AMD is water resources degradation and all its known consequences. As part of AMD generation assessment, this work focuses on the water balance of the BF4 waste pile microbasin. BF4 is one of the main AMD generators at the Osamu Utsumi Uranium Mine, owned by Industrias Nucleares do Brasil (INB), located in the town of Caldas, Minas Gerais, Brazil. The use of this hydrologic tool was intended as a first step to determine the main water contributors and to understand the flow regime for AMD generation at this site. Meteorological data from INB and Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) were used, as well as discharge data monitored by INB. Taking into account the hypotheses considered, the results indicate precipitation as the main water contributor to AMD generation at the bottom of the BF4 waste pile. This will guide future AMD remediation projects.*

*Key-words: acid mine drainage, water balance, uranium, remediation.*