



CARACTERIZAÇÃO HIDROSSEDIMENTOLÓGICA E DOS PROCESSOS EVOLUTIVOS DE VOÇOROCA EM ÁREA DE ROCHAS GNÁISSICAS DO ALTO RIO DAS VELHAS (MG)

Flávio Nasser Drumond

Universidade Federal de Ouro Preto Escola de Minas
Departamento de Geologia -Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais
UFOP/EM/DEGEO/PPGECRN
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita 35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
bacellar@degeo.ufop.br

Luís de Almeida Prado Bacellar

Universidade Federal de Ouro Preto Escola de Minas
Departamento de Geologia -Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais
UFOP/EM/DEGEO/PPGECRN
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita 35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
flavio.geografia@fasar.com.br

Resumo

Neste trabalho procurou-se caracterizar os processos erosivos e as taxas históricas de evolução de uma voçoroca em área de gnaisses do Complexo Bação, Quadrilátero Ferrífero (MG), na bacia do alto rio das Velhas. Na área predominam latossolos vermelho-amarelos, com horizontes superficiais areno-argilosos, pouco erodíveis, sobre saprolitos areno-siltosos, muito erodíveis. A evolução erosiva, avaliada por aerofotogrametria e em campo, indicou que a voçoroca, inicialmente de forma linear e de evolução lenta (entre 1951 e 1977), passou a adquirir forma mais anfiteátrica e a avançar mais rapidamente entre 1977 e 1986. Esta mudança pode ser explicada pela superação de um nível de base local (*knickpoint*). Entre 1986 e 2006, as taxas de avanço decresceram, possivelmente em função da diminuição da área de contribuição à montante. Os principais processos erosivos identificados na voçoroca foram: erosão hídrica superficial (laminar; em sulcos; em alcovas de regressão; e salpicamento); escorregamentos rotacionais que envolvem todo o talude; escorregamentos planares nos segmentos com rocha alterada; queda de blocos de solo; rastejos, nos sopés dos taludes com exfiltração do lençol freático, que podem resultar em pequenos escorregamentos rotacionais. Os processos de erosão são mais intensos no período chuvoso, mas os rastejos e pequenos escorregamentos são igualmente freqüentes na estiagem, quando o lençol freático atinge a cota máxima. O monitoramento hidrossedimentológico na voçoroca incluiu a coleta diária de dados: pluviométricos; de vazão na drenagem interna; de sedimentos transportados; e do nível do lençol freático. O transporte de sedimentos se correlaciona mais com os dados pluviométricos e menos com os dados de vazão, talvez porque nos meados do ano o fluxo de base, de menor erosividade, é mais intenso. Como os taludes mais ativos são aqueles sob exfiltração do lençol freático, a voçoroca tem avançado não só de acordo com o aclave topográfico, mas também no sentido do afluxo de águas subterrâneas. Comprovou-se que as voçorocas podem modificar o regime hidrológico e o padrão de transporte de sedimentos de pequenas bacias hidrográficas. Seu controle, que exige a utilização de obras estruturais, é essencial para a recuperação destas áreas degradadas pela erosão.

Palavras-chave: voçorocas; processos erosivos; taxas de erosão; monitoramento.

Abstract

The objective of this paper is to characterize the erosive processes and the historical evolution of a gully at gneissic areas of the Bação Complex, Quadrilátero Ferrífero (MG), at the Velhas River Basin. The area presents red-yellow oxisols, with sand-

clay superficial horizons, less susceptible to erosion, that lay on sand-silty saprolite, very susceptible to erosion. The gully evolution, measured by aerial photography and with field methods, indicated that the gully initially (between 1951 and 1977) showed linear form and low evolution rate; between 1977 and 1986, it retreated faster and with amphitheater like form. This change apparently occurred when the gully surpassed a local base level (knickpoint). Since 1986, the gully growth rate has decreased possibly due to the reduction of the contribution area. The main erosive processes identified at the gully were: superficial water erosion (sheet and splash erosion, ravines and regressive alcoves); slumps, that involve the whole slope; translational slides, on the weathered rock portions, and soil falls; in the toe slope with exfiltrating waters creep can occur, which can result in small slumps. The erosion processes are more intense during the rainy season, but creep and small slumps are equally frequent on the dry season, when the water table reaches its maximum. The hydrossedimentologic monitoring at the gully included the daily measurement of: pluviometric data, internal drainage data, transported sediments data and the water table. The sediment transport is highly correlated with pluviometric data, whereas a weak correlation was found with drainage data, maybe because at the middle of the year the base flow, less erosive, is less intense. As the most unstable slopes are those under exfiltration of the water table, the gully has retreating following the topographic declivity and the groundwater influx. It is proven that gullies can modify the hydrological pattern and the sediment transport pattern of river basin. Controlling them, which demands the construction of engineering systems, is essential to the recovery of these erosion-degraded regions.

Keywords: gullies; erosive processes; erosion rate; hydrological monitoring.

1. Introdução

A voçoroca estudada situa-se no distrito de São Gonçalo do Bação, município de Itabirito (MG), a cerca de 60 km de Belo Horizonte, em área de gnaisses do Complexo Metamórfico do Bação (Door, 1969), no Quadrilátero Ferrífero (Figura 1). A voçoroca se localiza numa pequena bacia de drenagem de segunda ordem hierárquica (microbacia do

riacho Manoel Felix), afluente do córrego Carioca, que deságua no rio Itabirito, no alto rio das Velhas. A bacia do córrego Carioca exhibe grande incidência de processos erosivos, manifestados por uma conspícua erosão laminar e por dezenas de voçorocas de grandes dimensões (Costa & Sobreira, 2001). Estudos prévios (Bacellar, 2000) sugerem que o voçorocamento é fenômeno natural e recorrente em todo o Complexo Bação desde o Pleistoceno Superior.

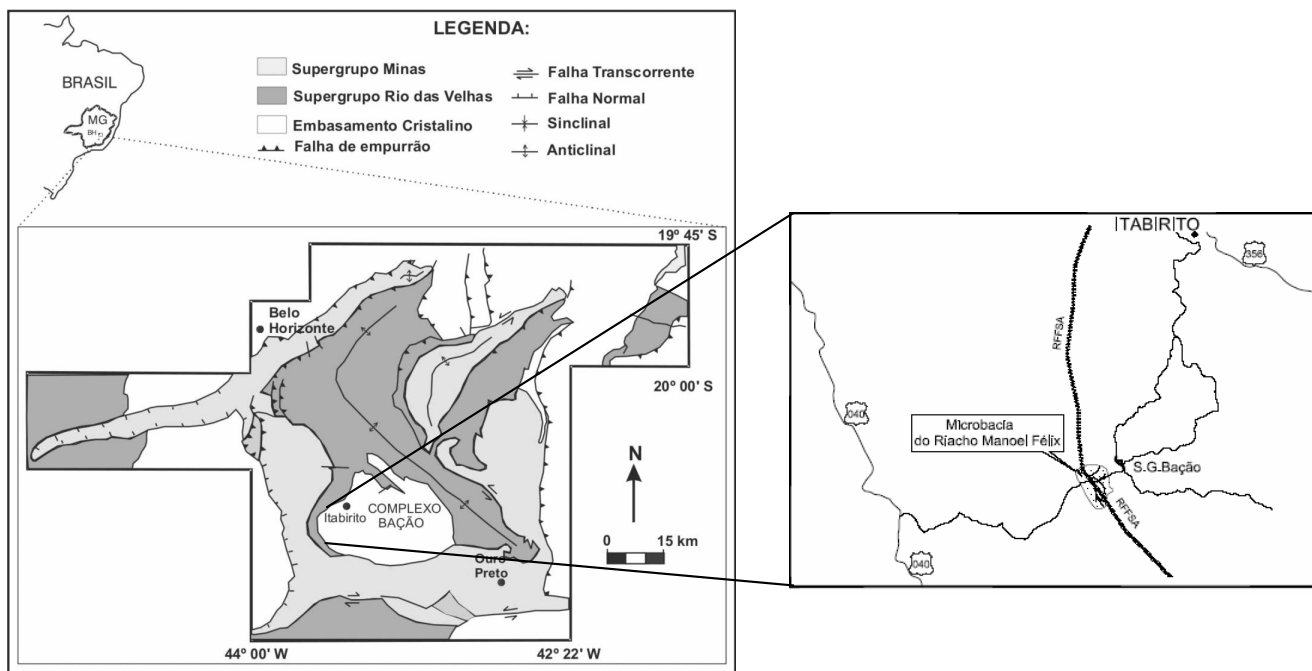


Figura 1 - Mapa de localização da área estudada.

As voçorocas se distribuem na região de forma e intensidades muito variáveis, por razões ainda pouco conhecidas, provocando danos ambientais e sociais e prejuízos financeiros, além de dificultar o processo de desenvolvimento sustentável (Parzanese, 1991; Sobreira *et al.*, 2001). De fato, residências em situação de risco, destruição de estradas, eliminação de terras agriculturáveis e assoreamento dos fundos de vale e de reservatórios são alguns problemas ambientais da região derivados do voçorocamento.

Apesar da vasta literatura disponível sobre voçorocas, até o momento existem poucas informações a respeito das taxas e processos evolutivos das voçorocas, bem como da influência da sazonalidade do lençol freático em sua evolução. Também são muito raros (ex.: Luk *et al.*, 1997) os trabalhos de monitoramento em campo realizados contemplando o binômio voçoroca-sistema fluvial.

O objetivo principal deste trabalho consistiu na caracterização qualitativa e quantitativa dos processos de evolução de voçorocas através de estudo de caso em terrenos gnáissicos, associando informações históricas com dados de monitoramento de campo.

2. Características da Área Estudada

A área está sob a influência do clima Cwb (temperado – chuvoso mesotérmico), de Köppen, com duas estações, o verão de outubro a março, com temperaturas máximas e a maior parte das precipitações, e o inverno frio e seco, de abril a setembro. A média anual de temperatura é 19,2°C e a de precipitação de 1.306 mm (RADAMBRASIL, 1983).

O substrato geológico é composto por gnaisses da unidade Funil, do Complexo Bação, de composição global granodiorítica, com bandas mais escuras, tonalíticas, até mais claras, graníticas, ricas em quartzo (Saraloli, 1999). A foliação (bandamento gnáissico) se orienta para noroeste e o manto de intemperismo é espesso, atingindo cerca de 30 metros no local.

A vegetação primária variava entre a de campos limpos e cerrados, mas atualmente a área do entorno da voçoroca está ocupada por pastagens degradadas. Na área predominam latossolos vermelho-amarelos, com horizonte A de cor marrom (2.5YR5/3) e estrutura granular, com cerca de 40 cm de espessura. O horizonte B é vermelho escuro (2.5YR5/4) e exibe estrutura em blocos. Apresenta 2,80 m de espessura e se adelgaça rumo a baixa vertente, até desaparecer na transição para solos aluviais. Os horizontes A e B possuem textura areno-argilosa e consistência dura e baixa friabilidade. Estas características, provocadas pela presença de agentes agregadores de partículas, como os óxidos e hidróxidos de ferro, lhes conferem baixa erodibilidade (Parzanese, 1991). O horizonte C (saprolito), de cor variegada, chega a ultrapassar os 25 metros de espessura na alta vertente. Exibe textura

areno-siltosa ou silto-arenosa (Parzanese, 1991; Sobreira, 1998; Bacellar, 2000), consistência friável, esboroando-se facilmente sob pressão moderada a leve. Apresenta erodibilidade geralmente muito alta (Parzanese, 1991), mas algumas variedades derivadas de litotipos distintos - como gnaisses de textura mais grossa ou enriquecidos em quartzo - podem ser menos resistentes à erosão (Moraes, 2003).

O relevo é constituído predominantemente de formas com topos poli-convexos e com vertentes longas e suaves. A vertente onde está instalada a voçoroca apresenta perfil retilíneo, com 30 m de amplitude, 292 m de comprimento e 14% de inclinação média.

No Complexo Bação a superfície freática se encontra geralmente na base do saprolito e sua exfiltração, no sopé dos taludes, influi na evolução das voçorocas (Bacellar, 2000).

3. Metodologia

Inicialmente, foi elaborado um mapa topográfico (1:1.000) da vertente da voçoroca, com o método da prancheta e alidade. Para instalação dos poços medidores de nível d'água, foram executadas cinco sondagens à percussão e duas sondagens a trado, no entorno (cabeceiras) e no interior da voçoroca, respectivamente (Figura 2). Os poços para medição do nível d'água foram construídos com tubos de PVC de 1 polegada, totalmente furados e telados na zona de oscilação do freático.

Os processos atuantes na evolução das voçorocas ao longo de um ano foram detalhadamente acompanhados e descritos em campo. O monitoramento hidrossedimentológico contemplou medidas por um ano (entre os dias 15/11/03 e 14/11/04) dos seguintes parâmetros:

- Precipitação, obtida com pluviômetro com coleta diária às 7:00 horas da manhã;
- Cota do nível freático, tomada nos poços com medidor eletrônico. Tomaram-se medidas diariamente, com exceção dos poços internos, com aquisições mensais, em função da dificuldade de acesso. Ao final do período chuvoso, os poços internos foram destruídos por escorregamentos no talude onde estavam instalados;
- Vazão, pelo método da capacidade, tomada num degrau natural (*knickpoint*), no canal principal do sistema de drenagem interna da voçoroca (Figura 2). O método da capacidade consiste na mensuração do tempo necessário para preencher um recipiente de volume conhecido (Costa, 2005). As leituras foram diárias, com exceção do período entre junho e agosto, com duas medidas semanais.
- Peso de sedimentos transportados, coletados em garrafas plásticas de 500 ml no *knickpoint*. O peso de sedimentos foi estimado multiplicando-se a vazão diária pela concentração de sedimentos, determinada em laboratório. Como não há remanso a montante do *knickpoint*, o peso

estimado é uma aproximação do volume de sedimentos totais. As amostras de sedimentos foram também submetidas à análise granulométrica.

Os dados de vazão foram representados em hidrogramas diários, possibilitando separar o fluxo de base do fluxo de chuva, seguindo a metodologia descrita por Costa (2005). Entende-se aqui por fluxo de base como a componente das vazões das drenagens que é alimentada pela descarga de água subterrânea.

Avaliou-se a evolução da borda da voçoroca pelo método das estacas (Baccaro *et. al.* 1998, Guerra 1999, Cruz, 2003) em quatro campanhas de campo no ano de 2004 (janeiro, abril, agosto e novembro). No total, foram colocadas 12 estacas centrais (de A até M, Figura 2). A evolução histórica, por sua vez, foi caracterizada pela comparação de aerofotos de diferentes datas (1951, 1977 e 1986), seguindo a metodologia empregada por Sobreira (1998; 2000). Os resultados obtidos pelos dois métodos foram lançados na base topográfica, possibilitando estabelecer o ritmo de

evolução da voçoroca entre 1951 e 2004.

A conjunção de todos os dados de campo e de gabinete possibilitou a elaboração do padrão hidrossedimentológico e de um modelo evolutivo da voçoroca.

4. Resultados

Em 2004, a voçoroca monitorada encontrava-se com 25 m de profundidade, 118 m de largura e 245 m de comprimento. Na área entre as estacas A-B-C e a M (Figura 2), o gnaiss encontra-se menos alterado, pois se apresenta com bandas enriquecidas em quartzo. Conseqüentemente, neste local a voçoroca é mais estreita e há um *knickpoint*, onde foram tomadas as medidas de vazão. A voçoroca exibe seção transversal em forma de “U” e é linear em planta, embora suas cabeceiras, a montante do *knickpoint*, apresentem forma mais anfiteátrica (Figura 2). Dígitos formados pelos pontos de maior entrada de escoamento superficial são comuns em sua porção mediana e em suas cabeceiras (Figura 2).

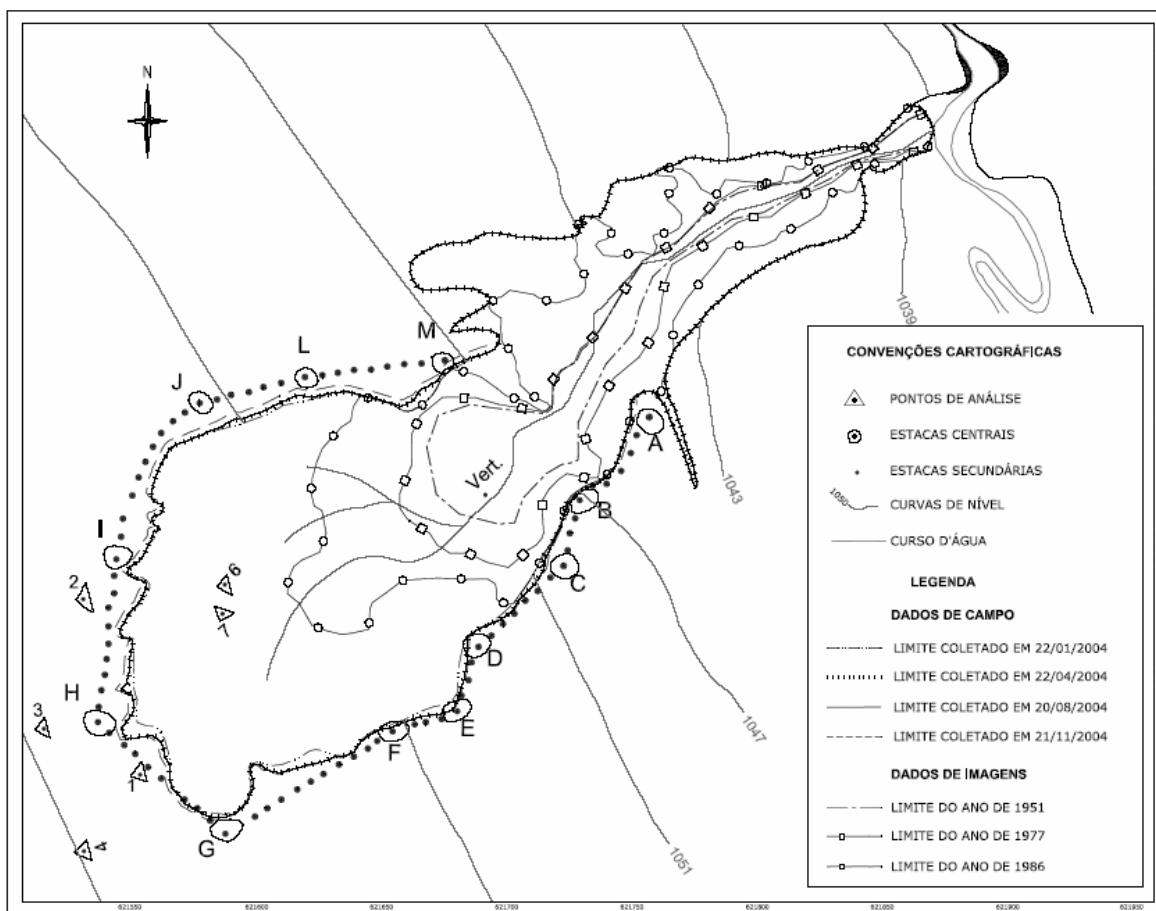


Figura 2 - Mapa topográfico com registro da evolução da voçoroca. As estacas foram numeradas em ordem crescente no sentido anti-horário a partir das estacas centrais. O ponto denominado Vert representa o *knickpoint*.

A água subterrânea, que se exfiltra apenas à montante do *knickpoint*, nas cabeceiras da voçoroca, deixa o solo próximo de seu limite de liquidez, tornando difícil e perigoso caminhar pelo interior da feição em boa parte do ano. No ponto de confluência com as águas do riacho Manoel Felix é visível, através da turbidez da água, a imensa quantidade de sedimentos transportados pela drenagem proveniente da voçoroca.

A montante do *knickpoint*, os taludes encontram-se praticamente desprovidos de vegetação, que aparece a jusante, constituída predominantemente por samambaias e pequenos arbustos. Tal fato corrobora as observações de Farias (1992), de que a regeneração só prevalece nos taludes das voçorocas da região nos quais o lençol freático é mais profundo.

4.1. Processos Atuantes

Não foi possível estabelecer a gênese desta voçoroca, mas sua evolução tem se dado por uma conjunção de processos de erosão hídrica superficial e de movimentos de massa.

Os processos de erosão hídrica atuam preferencialmente sobre os saprolitos, mais erodíveis. Destes, destacam-se a erosão laminar, em sulcos e por salpicamento, todos atuando no talude ou no interior das voçorocas. As águas de enxurrada, que se formam principalmente ao longo das trilhas de gado, causam erosão do saprolito pelo efeito cachoeira em alcovas de regressão. Os movimentos gravitacionais mais freqüentes são os escorregamentos rotacionais, que envolvem todo o talude e são facilitados pelas trincas de tração e pela exfiltração de água no sopé. Nos setores com rocha mais resistente ao intemperismo, como nos arredores do *knickpoint*, predominam escorregamentos planares que se aproveitam das descontinuidades da rocha

alterada. Os horizontes superficiais de solo situados sobre as alcovas de regressão se instabilizam na forma de quedas. Por fim, há os rastejos, que envolvem os saprolitos e sedimentos situados no sopé dos taludes das cabeceiras da voçoroca, onde a declividade é baixa e a exfiltração de água do lençol significativa. Os rastejos podem culminar em pequenos escorregamentos rotacionais de amplitude centimétrica a métrica (Bacellar & Morais, 2005).

Cabe destacar também a importância do aumento das vazões no canal interno da voçoroca durante e imediatamente após os eventos de precipitação, que eleva a capacidade de transporte de sedimentos e pode causar solapamento basal dos taludes junto à margem externa dos meandros, favorecendo os movimentos de massa.

O acompanhamento de campo confirmou que a voçoroca é menos ativa no período de estiagem. Contudo, como será discutido a seguir, a ascensão gradativa do lençol freático após o período chuvoso faz com que o rastejo e os pequenos escorregamentos rotacionais no sopé dos taludes ocorram (ou até se intensifiquem) mesmo no auge da estação seca.

4.2. Taxas de Crescimento da Voçoroca

As taxas de evolução da voçoroca foram obtidas por levantamento aerofotográfico e por monitoramento de campo (Tabela 1 e Figura 2). Verificou-se que a taxa média de recuo de borda da voçoroca na estação chuvosa (de 22/01 a 22/04/06) foi de 0,58 cm/dia, enquanto que na estação seca (de 20/08 a 21/11), de apenas 0,02 cm/dia, com recuos mais expressivos registrados nas cabeceiras da voçoroca, especialmente nas proximidades da estaca H e na porção media entre as estacas F e G (Figura 2). Similarmente, o segmento noroeste, entre as estacas J e M, recuou mais que o sudeste, entre as estacas A e D (Figura 2).

Tabela 1 - Evolução do comprimento e da área ocupada pela voçoroca.

Período	Tempo (ano)	Aumento do comprimento (m)	Taxa de aumento anual do comprimento (m/ano)	Aumento da área (m ²)	Taxa de aumento da área (m ² /ano)
1951/1977	26	12	0,46	1.298	49,9
1977/1986	9	41	4,50	4.829	536,6
1986/2004	18	69	3,83	10.775	598,6
2004	1	-	-	848,1	848,1
1951/2004	53	122	2,30	16.903	318,9

4.3. Monitoramento Hidrossedimentológico

De início, verificou-se que a análise e a interpretação dos dados hidrossedimentológicos seria mais fácil se as medidas fossem apresentadas em totais mensais.

Os dados de pluviosidade (Figura 3) evidenciaram duas estações bem definidas, uma chuvosa e outra seca, e demonstraram que o período monitorado foi mais úmido (1.611 mm) que a média histórica da região (1.306 mm).

O nível freático se encontra a mais de 20 m de profundidade nos poços situados à montante da voçoroca. O nível oscilou mais de 1,5 m ao longo do ano hidrológico

2003/2004, atingindo o ápice no inverno, entre o final de julho e início de agosto, e o mínimo no período chuvoso, especialmente em fevereiro (Figura 4a). Já nos poços internos, a variação não foi muito perceptível devido ao curto tempo de monitoramento.

Verifica-se que a superfície freática sugere um sentido de fluxo subterrâneo para SE (Figura 4b), oblíquo ao declive topográfico local, que cai para NE (Figura 2).

A vazão da drenagem interna da voçoroca foi maior em fevereiro e março de 2004, com 1,10 l/s e 0,97 l/s, respectivamente (Figura 5) e menor em setembro (0,46 l/s).

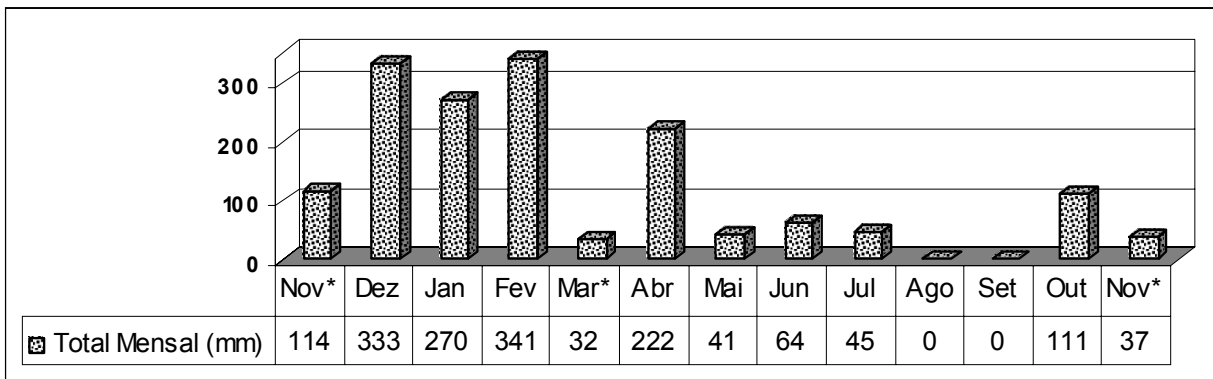


Figura 3 - Total mensal de pluviosidade. Não houve leituras na primeira quinzena de novembro de 2003, na última de novembro de 2004 e por sete dias em março.

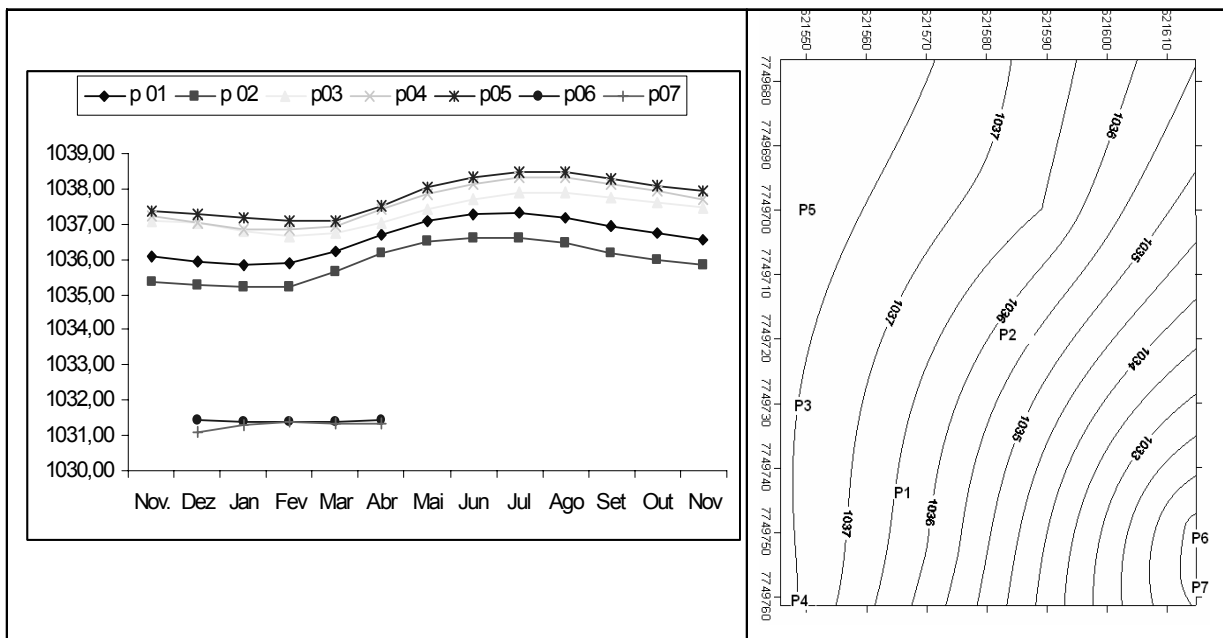


Figura 4 - (a) Variação da cota do nível freático nos poços monitorados; (b) Posição média da superfície freática. A interpolação foi feita desconsiderando-se o provável incremento do gradiente do lençol nas proximidades da borda da voçoroca. A letra P representa os poços de monitoramento.

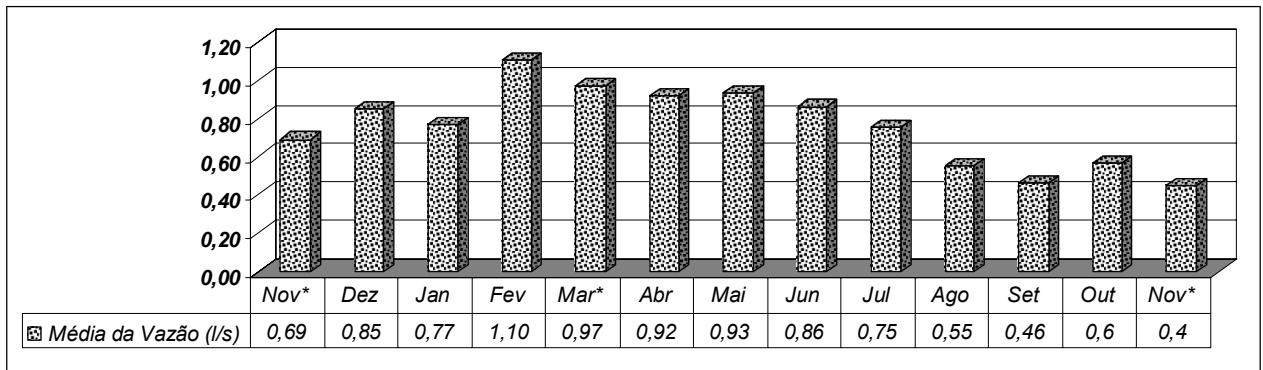


Figura 5 - Médias mensais de vazão da drenagem interna da voçoroca. Não houve leituras na primeira quinzena de novembro de 2003, na última de novembro de 2004 e por sete dias em março.

Com os dados diários de vazão, foi separado graficamente o fluxo de base do total (Figura 6). Verificou-se, assim, que o fluxo de base atingiu seu pico máximo ao final de maio.

Os meses com maior e menor peso de sedimentos

transportados foram dezembro de 2003 e setembro de 2004, com 104 Kg e 13 Kg, respectivamente (Figura 7). A fração argila se mostrou relativamente constante ao longo do ano, enquanto que o silte e a areia fina predominam, respectivamente, na estação chuvosa e seca.

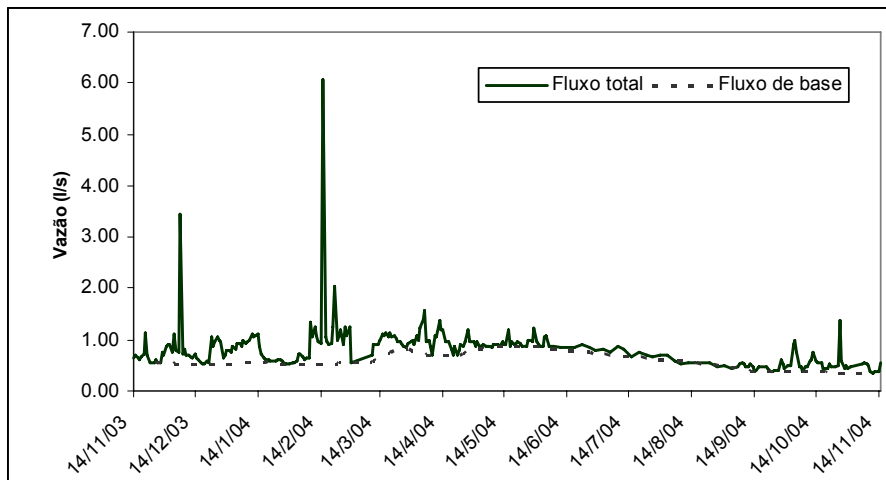


Figura 6 – Separação do fluxo de base no hidrograma de vazões diárias.

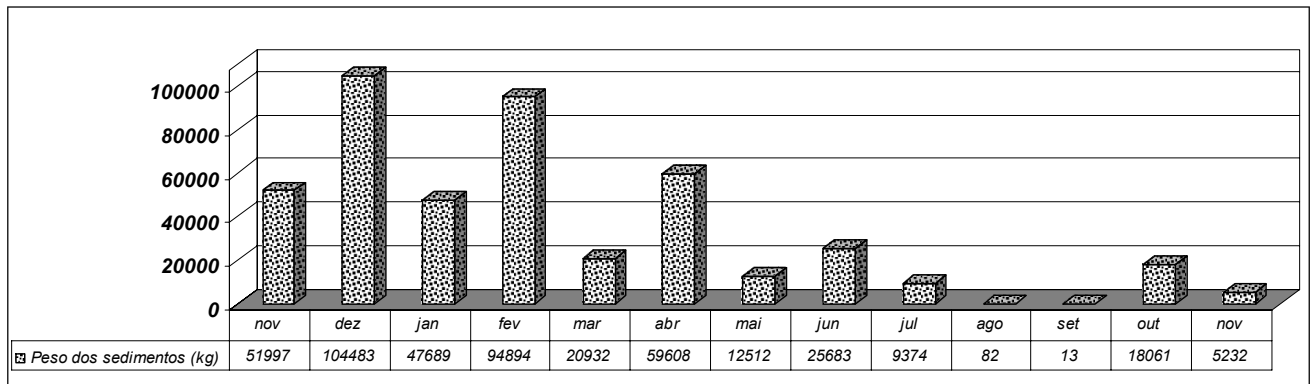


Figura 7 - Peso estimado de sedimentos transportados pelo sistema de drenagem da voçoroca. Não houve leituras na primeira quinzena de novembro de 2003, na última de novembro de 2004 e por sete dias em março.

5. Discussão dos Resultados

Na determinação do grau de evolução da voçoroca, utilizou-se de métodos (aerofotogramétrico e monitoramento de campo) com escalas espaciais e temporais muito distintas, o que dificulta comparar os resultados. Cabe lembrar que é preferível comparar taxas de evolução de comprimento que de aumento de área, pois estas podem continuar a crescer mesmo com a gradativa estabilização da voçoroca. Levando-se estas questões em consideração, é possível verificar que a voçoroca, com forma linear e evolução lenta no início (entre 1951 e 1977), passou a adquirir forma mais anfiteátrica e a avançar mais rapidamente entre 1977 e 1986 (Tabela 1 e Figura 2). Esta mudança pode ser explicada pela superação de um nível de base local (*knickpoint*), constituído por bandas mais resistentes do gnaiss. Rompido este nível, a voçoroca pode ter evoluído mais rapidamente (4,5 m/a) devido à atuação mais efetiva dos processos de erosão conduzidos pela água subterrânea – como os movimentos de massa – tornando-se gradativamente mais circular. Entre 1986 e 2004, a taxa de crescimento diminuiu (3,8 m/a).

Nos 10 meses monitorados de 2004, a taxa foi muito variável, mas em suas cabeceiras (entre as estacas G e I, Figura 2) a taxa média foi de 1,3 m/a, inferior às anteriores. Considerando-se que este ano foi mais úmido que a média histórica, pode-se supor que, mantidas as condições atuais de uso e ocupação, a voçoroca esteja em processo de estabilização, pelo fato de suas cabeceiras estarem se aproximando do divisor topográfico. A taxa de avanço em 2004 é semelhante à encontrada em áreas com voçorocas pouco ativas, como no sudeste do Complexo Bação (Sobreira, 1998) e no Complexo Belo Horizonte (Paulo *et al.*, 2005). Porém, é necessário prosseguir o monitoramento para confirmar esta tendência.

Em 2004, os recuos mais significativos (como na estaca F5, com 5,37m) foram encontrados nas cabeceiras da voçoroca, sobretudo naquelas próximas às áreas de expressiva entrada do fluxo superficial concentrado em trilhas. Nestes casos, o recuo foi comandado principalmente pela erosão pelo efeito cachoeira (Parzanese 1991; Sobreira 1998), o que fez com que a voçoroca tenha evoluído historicamente no sentido do aclave topográfico (Figura 2). Fora das cabeceiras, os taludes dos segmentos noroeste e sudeste estão evoluindo por ação dos processos subsuperficiais de erosão, já que o declive topográfico dificulta nestes casos a entrada de fluxos superficiais (Figura 2). No entanto, ultimamente a voçoroca tem avançado mais na face noroeste, entre as estacas J e M (Figura 2), possivelmente devido aos fluxos subterrâneos, com sentido dominante para E-SE (Figura 4b).

Os processos de erosão atuam com menor intensidade no período de estiagem em virtude das chuvas menos frequentes e intensas. Porém, neste período, os rastejos e pequenos escorregamentos no sopé dos taludes se

intensificam em função da subida gradual do nível freático, que leva à exfiltração do lençol. Tais fluxos têm a capacidade de saturar o material do sopé dos taludes (saprolito *in situ* ou movimentado) acima do seu limite de liquidez (Bacellar, 2000) ou até mesmo de exercer sub-pressões, facilitando os movimentos de massa.

As chuvas que se concentraram entre dezembro e abril (Figura 3) começaram a recarregar o aquífero entre fevereiro e março, mas o ápice da recarga só se deu entre julho e agosto, quando o lençol freático atingiu a cota máxima (Figura 4a). Nos poços onde o lençol freático é mais raso a recarga é nitidamente mais rápida. No período de maio a setembro, a vazão no sistema de drenagem da voçoroca é sustentada pelo fluxo de base proveniente do aquífero recarregado com atraso (Figura 6).

A confrontação das figuras 3, 5 e 7 e uma análise de regressão linear indicam que a carga de sedimentos transportados apresenta maior correlação com a pluviosidade ($r^2 = 0,89$) que com a vazão da drenagem interna da voçoroca ($r^2 = 0,37$). Isto provavelmente ocorre porque a vazão nos períodos de estiagem é sustentada pelo fluxo de base, de menor erosividade. Em monitoramento de área com características semelhantes no sul da China, Luk *et al.* (1997) também encontraram uma boa correlação entre a descarga sólida proveniente das voçorocas e a descarga líquida de cheia.

Contudo, chama a atenção que as primeiras chuvas do período úmido, como em novembro de 2003 (Figura 3), são capazes de transportar maior volume de sedimentos que os meses subseqüentes, com maior índice pluviométrico, como janeiro de 2004 (Figura 7). Tal comportamento pode ser explicado pela maior disponibilidade dos sedimentos no interior das voçorocas pelos rastejos e pequenos escorregamentos, abundantes na estação seca. A ascensão de lençol nas zonas de exfiltração dificulta o estabelecimento de uma vegetação protetora (Farias, 1992), favorecendo a progressão da erosão. Por tais razões, como já observado por Bacellar & Morais (2005) para outras áreas do Complexo Bação, os taludes da voçoroca sem aporte de águas de enxurrada e de exfiltração de água subterrânea, como à jusante do *knickpoint*, tendem a se estabilizar.

Durante os picos de vazão, grande quantidade de sedimentos, de textura predominantemente siltosa, é transportada. Nos períodos de baixa vazão, o volume transportado cai significativamente, a água fica mais límpida, contando apenas com pequena carga de fundo de textura arenosa fina.

Como já demonstrara Costa (2005), as voçorocas modificam significativamente o regime hidrossedimentológico de pequenas bacias hidrográficas. Para estabilizar as voçorocas do Complexo Bação é necessário disciplinar as águas do escoamento superficial concentrado e estabilizar os taludes com exfiltração de água do lençol freático. Tal

estabilização pode ser alcançada através do assoreamento natural resultante da construção de diques de retenção no interior da voçoroca (Carvalho, 1992) ou, em situações mais prementes, através da construção de drenos alternativos, de baixo custo, no pé do talude (Prandini *et al.*, 1974).

6. Conclusões

O estudo pormenorizado da evolução de uma voçoroca típica de áreas de rochas gnáissicas do Complexo Bação (MG) permitiu tecer as seguintes conclusões:

- os principais processos responsáveis pela evolução da voçoroca são: erosão hídrica superficial (laminar; em sulcos; em alcovas de regressão; salpicamento; nos meandros dos canais de drenagem); escorregamentos rotacionais que envolvem todo o talude; escorregamentos planares nos segmentos com rocha alterada; queda de blocos de solo; rastejos nos sopés dos taludes com exfiltração do lençol freático, que podem resultar em pequenos escorregamentos rotacionais. Os processos subsuperficiais de erosão hídrica, como o *piping* e a erosão por percolação, não parecem significativos;

- os processos de erosão são mais ativos durante o período chuvoso; contudo, os rastejos e os pequenos escorregamentos são muito freqüentes no período de estiagem, quando o lençol freático encontra-se mais alto devido à recarga;

- o fluxo pela zona não saturada é lento, pois as chuvas de verão só recarregam plenamente o aquífero (situado a pouco mais de 20 m de profundidade, à montante da voçoroca) entre julho e agosto; a recarga alimenta o fluxo de base da drenagem interna da voçoroca, que teve seu ápice ao final de maio;

- as águas exfiltrantes que compõem o fluxo de base não têm energia suficiente para transportar quantidades significativas de sedimentos pelo canal da voçoroca; contudo, os pequenos movimentos de massa no sopé dos taludes disponibilizam sedimentos que saem em grande quantidade nas primeiras chuvas intensas no verão;

- o peso de sedimentos transportados pelo sistema de drenagem da voçoroca varia muito ao longo do ano, atingindo 104 kg/mês, no verão, e 13 kg/mês no inverno. O peso de sedimentos se correlaciona melhor com a pluviosidade que com a vazão, já que esta sofre influência do fluxo de base, de baixa erosividade;

- entre 1951 e 1977, a voçoroca apresentava geometria linear e taxas de avanço lentas (0,5 m/a); entre 1977 e 1986, as taxas de avanço aumentaram (4,5 m/a) e a forma se tornou mais anfiteátrica, o que pode ser creditado a um nível de base local que foi suplantado; as taxas de avanço diminuíram entre 1986 e 2004 (3,8 m/a) e em 2004 (1,3 m/a), talvez devido a redução progressiva da área de contribuição à montante

da voçoroca; a taxa estimada em 2004 foi semelhante a de outras regiões na proximidades, com voçorocas pouco ativas;

- a voçoroca tem evoluído conforme o aclave topográfico, para sudoeste; contudo, sua face noroeste tem avançado mais rapidamente, possivelmente por influência do gradiente local do lençol freático;

- o controle das voçorocas da região é fundamental, pois estas interferem significativamente no regime hidrológico e no transporte de sedimentos, proporcionando grandes impactos sócio econômicos e ambientais; para controle das voçorocas da região é necessário disciplinar as águas torrenciais de superfície e evitar a progressão dos taludes instabilizados pela exfiltração da água subterrânea.

7. Agradecimentos

Ao professor Frederico Sobreira, pelo apoio, e à FAPEMIG, pelo suporte financeiro.

8. Referências Bibliográficas

- Baccaro, C.A.D., Feltran Filho A., Carijó, B.R., Macedo, J.A. (1998) Monitoramento e dinâmica evolutiva dos processos de voçorocamento em relevos residuais no oeste do Triângulo Mineiro. GEOSUL .UFSC, Florianópolis-SC. 14(27).
- Bacellar L. A. P. (2000) Condicionantes geológicos, geomorfológicos e geotécnicos dos mecanismos de voçorocamento na bacia do rio Maracujá. Ouro Preto, MG, 2000. Tese de doutoramento. PEC/ COPPE/UFRJ.
- Bacellar, L. A. P.; Morais, F. (2005) Caracterização dos processos evolutivos de voçorocas em rochas do embasamento cristalino do Complexo Bação. M.G. Congr. Brasil Geologia de Engenharia. Florianópolis. CDRom.
- Carvalho E.T. (1992) O mecanismo das voçorocas. In: Anais do Simpósio Situação Ambiental e Qualidade de Vida na Região Metropolitana de Belo Horizonte e Minas Gerais, ABGE- Núcleo MG. Belo Horizonte, 2: 71-73.
- Costa F.M & Sobreira F.G. (2001) Estudo preliminar das voçorocas da bacia do rio Carioca, Quadrilátero Ferrífero, MG. VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2001, Goiânia. Anais...
- Costa, F.M. (2005) Análise por métodos hidrológicos e hidroquímicos de fatores condicionantes do potencial hídrico de bacias hidrográficas – Estudo de Casos no Quadrilátero Ferrífero (MG), Dissertação de Mestrado. UFOP/EM/DEGEO, Ouro Preto 147p.

- Cruz, L.O.M. (2003) Comportamento desnudacional e evolução de curto termo em voçorocas na micro-bacia do córrego do Quebra em Gouveia – Espinhaço Meridional/MG. Monografia. IGC/UFMG, Belo Horizonte.
- Door, J.N. (1969) Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, v. 641-A, 110S.
- Farias, C.A. (1992) Dinâmica da revegetação natural de voçorocas na região de Cachoeira do Campo - MG. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, 63 p.
- Futai M. M. (2002) Estudo Teórico-Experimental do Comportamento de Solos Tropicais Não-Saturados: Aplicação a um Caso de Voçorocamento, Tese de doutoramento. PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 372 p.
- Guerra A.J.T. (1999) O início do processo erosivo. In: erosão e Conservação dos Solos: Conceitos Temas e Aplicações. Guerra, A.J.T., Silva, A.S., Botelho, R.G.M. (Eds) Bertrand. Rio de Janeiro
- Luk, S.H., Dizenzo, P.D., Liu, X.Z. (1997) Water and sediment yield from a small catchment in the hilly granitic region, South China. *Catena*, 29: 177-189.
- Morais, F. (2003) Estudo dos processos erosivos subsuperficiais na bacia do rio Maracujá – MG. Dissertação de Mestrado. UFOP/EM/DEGEO, Ouro Preto, 98p.
- Paulo J.R., Bacellar, L.A.P., Danderfer Filho, A. (2005) Avaliação de áreas de risco geológico na bacia de Vargem das Flores, municípios de Contagem e Betim – MG. Solos e Rochas, São Paulo, 28 (2):205-219.
- Parzanese, G.A.C. (1991) - Gênese e desenvolvimento de voçorocas em solos originados de rochas granitoides na região de Cachoeira do Campo, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa.
- Prandini F.L., Cruz, P.T., Guidicini, G., Santos, J.P. (1974) Study of an urban boçoroca: possibilities of control. In: Anais do II Int. Congress. IAEG. São Paulo. 1: III-37
- RADAMBRASIL (1983) Levantamento de recursos naturais: Folhas SF 23/24. Rio de Janeiro/Vitória. Rio de Janeiro, 32: 1-767.
- Salaroli, I.S. (1999) - Mapeamento litoestrutural da região de Santo Antônio do Leite, Complexo Metamórfico Bação, Quadrilátero Ferrífero – MG. Trabalho Geológico. UFOP/EM/DEGEO. Ouro Preto.
- Sobreira, F. G. (1998) Estudo das erosões do distrito de Cachoeira do Campo, Ouro Preto. Universidade Federal de Ouro Preto. Relatório final de projeto. FAPEMIG 120 p.
- Sobreira, F. G. (2000). Processos erosivos acelerados (Voçorocas): O exemplo de Cachoeira do Campo. Ouro Preto, MG. Solos e Rochas: revista latino-americana de geotecnia. ABMS/ABGE, pp. 217-233. São Paulo.
- Sobreira, F.G; Leite, M.G; Bacellar, L. A P.; Fernandes, S.M. (2001) Processos Erosivos de São Gonçalo do Bação, Quadrilátero Ferrífero, MG: Evolução Geomorfológica Recente e suas Implicações Ambientais. Proposta de projeto da FAPEMIG.