



**ROTAS DE FLUXOS HIDROGEOQUÍMICOS EM UMA PEQUENA BACIA DE DRENAGEM MONTANHOSA—
RURAL: ALTO VALE DO RIO FORTALEZA, BANANAL (SP).**

Adriana Filgueira Leite¹
Ana Luiza Coelho Netto²

Laboratório de Geo-Hidroecologia (GEOHECO)
Universidade Federal do Rio de Janeiro – CCMN – Instituto de Geociências – Dep^o de Geografia
Av. Brigadeiro Trompowsky, S/N^o – bloco H, sala H1-015
Cidade Universitária, Ilha do Fundão – Rio de Janeiro (RJ), Brasil – CEP: 21.941-590
Tel: 55 21 9689-9254 / 55 21 2598-9405 / 55 21 2598-9474 (fax)

¹e-mail: adrianafilgueira@uol.com.br

²e-mail: ananetto@acd.ufrj.br

RESUMO

O presente estudo resulta do monitoramento da composição química das águas da chuva, regolito e canais (Ca^+ , Mg^2 , Na^+ , K^+ , SiO_2 , HCO_3 , Al^{3+} , Fe_{total} , pH e Condutividade Elétrica), visando o reconhecimento das rotas de fluxos d'água, como subsídio à compreensão dos processos geomorfológicos em região montanhosa. Esta área é representada por uma pequena bacia de drenagem constituída por rochas de origem metassedimentar (silimanita-granada-muscovita-biotita gnaiss). O monitoramento foi realizado em dois períodos distintos: um entre Novembro de 1999 e Maio de 2000, caracterizado pela estiagem, e outro em andamento a partir de Abril de 2003. Observou-se na primeira etapa do estudo que, além da ausência de variações espaço-temporais no comportamento geoquímico das águas da drenagem principal, não houve correlação (mistura) entre as águas da chuva e do regolito, com as águas dos canais. Considerando também a permanência efetiva do fluxo de base devido a forte estiagem, propõe-se que as águas de origem subterrânea sejam as principais responsáveis pela manutenção do aporte hídrico da bacia em questão, como já era de se esperar. Com a expansão do monitoramento, englobando uma concavidade estrutural suspensa (tributária do canal principal), a partir da segunda etapa do estudo, observaram-se ali concentrações de elementos bastante superiores as dos demais pontos de amostragem da bacia. Tal comportamento aponta para a existência de um aquífero suspenso em relação à drenagem principal, o qual seria responsável pela permanência de condições de saturação no fundo da concavidade monitorada, independente da ocorrência de estiagem. Até o momento não se identificou nenhuma relação clara entre as águas provenientes da concavidade e as que compõem a drenagem principal.

Palavras-chave: Rotas de fluxos d'água, Hidrogeoquímica, Água Subterrânea.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho trata de um estudo sobre rotas de fluxos subterrâneos em uma bacia de drenagem montanhosa rural, em cujas vertentes pressupõe-se a ocorrência de artesianismo em eixos de fraturamentos. Tais processos expressar-se-iam na paisagem local sob a forma de concavidades estruturais suspensas (bacias de 1^a ordem canalizadas) na vertente do dip (COELHO NETTO, 1997), e, em depressões fechadas geradas por subsidência, na vertente do anti-dip (CASTRO & COELHO NETTO, 2002). Investiga-se a possibilidade de ambas as feições constituírem expressões diferentes de um mesmo processo de maior amplitude, o qual seria regulado pelas relações locais entre as estruturas do substrato e a dinâmica de circulação das águas subterrâneas.

O produto aqui apresentado corresponde à primeira etapa das investigações de tal hipótese, onde se buscou conhecer as resultantes do conjunto de relações entre os condicionantes lito-estruturais e subterrâneos sobre o modelado, à luz do comportamento hidrogeoquímico dos canais de drenagem. Para tanto, avaliou-se para o período amostral as seguintes questões: (a) a origem das águas que compunham os canais de drenagem, especialmente os posicionados nas concavidades estruturais (orientados em fraturas); (b) a representatividade do trabalho exercido pelas águas subterrâneas junto aos processos hidrológicos atuantes nas encostas; e (c) a relação geoquímica entre as águas dos canais e a dos diversos



compartimentos com os quais interage, ou seja, vegetação, regolito, e os segmentos mais profundos da bacia (subterrâneos).

2. ÁREA DE ESTUDO

O alto vale do rio Fortaleza (Bananal/SP) é uma bacia de terceira ordem com cerca de 4 km² de área, posicionada no segmento pré-montanhoso da bacia do rio Bananal (figura 1a). O substrato rochoso é constituído por rochas metassedimentares da Unidade São João, caracterizadas por Almeida *et al.* (1989) como silimanita-granada-muscovita-biotita gnaiss, com intercalações de níveis ou lentes calciossilicáticas, gondito, mármore e de silimanita-muscovita-biotita-xisto (figura 1b).

FIGURA 1a e 1b

A bacia como um todo apresenta uma grande quantidade de depósitos sedimentares, constituídos por terraços fluviais posicionados até 5 m acima do nível da planície de inundação atual, e blocos de rocha com até 2 m de diâmetro, distribuídos ao longo de toda a drenagem principal. Os canais de drenagem apresentam também uma grande quantidade de níveis de base locais (“knickpoints”) articulados entre si. De modo geral, *knickpoints* são feições bastante observadas ao longo de toda a bacia do rio Bananal, tendendo a formar-se nos ângulos de interseção entre as fraturas e o *strike* da foliação/bandamento principal (EIRADO SILVA *et al.*, 1993).

A direção de mergulho das camadas litológicas confere à bacia estudada um perfil de relevo com encostas assimétricas. Esta é uma característica bastante observada em diversas drenagens montanhosas do médio vale do rio Paraíba do Sul, sendo uma resultante da evolução lito-estrutural da região. A colisão continental que deu origem ao grande continente Gondwana (período Pré-Cambriano), fez com que extensas faixas de dobramentos se formassem nos contatos entre os continentes envolvidos, dando origem às cadeias montanhosas do sudeste brasileiro. Posteriormente, uma intensa atividade tectônica de caráter rúptil (na transição entre Cretáceo e Terciário), promoveu a separação continental, formando o Oceano Atlântico (Período Jurássico), e o gráben do Vale do rio Paraíba do Sul. A formação deste gráben consistiu basicamente na separação e movimentação dos compartimentos montanhosos dobrados por meio de falhamentos regionais, dando origem a atual disposição litológica região. De acordo com Heilbron *et al.* (1991), as serras do Mar e da Mantiqueira corresponderiam a antigos anticlinais, e o rio Paraíba do Sul seria controlado pela grande falha que separa estes dois compartimentos montanhosos. Deste modo, a direção de mergulho das camadas nas serras do Mar e da Mantiqueira seriam convergentes para o rio Paraíba do Sul. Isso explicaria a tendência regional de assimetria dos vales que compõem as bacias de drenagem ali posicionadas. Enquanto os canais principais seguem preferencialmente o *strike* das camadas, os tributários desenvolvem-se nas vertentes de *dip* e *anti-dip*, em geral, controlados pelas fraturas (EIRADO SILVA *et al.*, 1993).

A vertente direita do alto vale do rio Fortaleza posiciona-se na direção de mergulho das camadas (*dip*) e caracteriza-se pela presença significativa de concavidades estruturais em diferentes estágios de desenvolvimento, sendo uma bastante evoluída e conectada à drenagem principal (posicionada fora dos limites estabelecidos para esse estudo), e as demais suspensas e desconectadas da drenagem principal. No caso destas últimas, além de haver um controle local exercido por um estrato litológico de composição xisto-quartzítica (figura 1b), há também um condicionante relacionado à dinâmica de circulação das águas subterrâneas. Postula-se que, na competição pelas águas subterrâneas, a concavidade atualmente conectada à drenagem principal tenha sido mais eficiente, canalizando então a maior parte da água. Tal processo teria levado ao rebaixamento do nível de base da bacia



como um todo, e à estagnação evolutiva das demais concavidades, menos eficientes. Assim sendo, tais feições constituiriam no presente em formas residuais representativas dos estágios iniciais de formação de uma concavidade estrutural.

O mesmo já não se pode afirmar para a vertente esquerda. Considera-se que a posição de *anti-dip* é inibidora do desenvolvimento de concavidades estruturais, na medida em que a disposição das camadas não seria favorável ao trabalho erosivo da água. No topo desta vertente identificou-se a presença de uma depressão fechada cuja evolução vem sendo também objeto de investigação. Os resultados até então obtidos, sugerem que o fraturamento seguido pela percolação subvertical da água tenham sido responsáveis pelo seu surgimento ou evolução por subsidência geoquímica (CASTRO & COELHO NETTO, 2002). Tal comportamento aponta para uma evolução típica de relevos cársticos. De fato, não apenas a bacia em estudo como as adjacentes apresentam feições características de carstes, tais como “verrugas” (na vertente do anti-dip), e grutas esculpidas na rocha por obra da erosão diferencial. É possível que a presença de lentes calciossilicáticas neste setor da bacia tenha favorecido o desenvolvimento de tais feições.

Com relação aos solos, embora nenhum estudo pedológico tenha sido realizado nesta bacia com o intuito específico de uma classificação, sugere-se a ocorrência de Latossolos, especialmente nos segmentos mais íngremes e divisores das encostas. Fernandes (2000), ao realizar um estudo pedogeomorfológico na vertente do dip, observou em grande parte dos pontos analisados, a presença de pequena diferenciação e transição gradual a difusa entre horizontes, além de um horizonte B argiloso, bastante profundo, os quais remeteriam à classe dos Latossolos. Este horizonte B argiloso seria também responsável pela ocorrência de níveis d’água suspensos, e pelo predomínio de fluxos subsuperficiais em detrimento dos fluxos verticais, em resposta à declividade acentuada. Já na vertente do anti-dip, Castro & Coelho Netto (2002) identificaram na depressão supra citada, uma sucessão de solos constituída por Latossolo Vermelho no topo e vertente média/superior, e solos hidromórficos no centro desta. Tal configuração sugere que o Latossolo teria passado por processos de hidromorfia após ter sido rebaixado pela subsidência geoquímica.

Quanto à vegetação, verifica-se que o ambiente em questão encontra-se em estágio de degradação bastante avançado. Predominam as gramíneas, observando-se também fragmentos de mata secundária nos segmentos mais declivosos da bacia. Tais fragmentos constituem remanescentes florestais que ressurgiram após o declínio da atividade cafeeira, tendo ali permanecido devido à dificuldade de acesso.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 – Implementação da Área de Estudo

Para a realização do presente estudo, foi criada a Estação Experimental do alto vale do rio Fortaleza, na qual foram implementados Pluviômetro Digital, Linígrafo Mecânico (autonomia semanal), Vertedouro retangular, além de uma rede piezométrica composta por 15 estações (Figura 1a).

A instalação dos piezômetros foi realizada na vertente direita da bacia, ao longo de três perfis: dois longitudinais e um transversal à encosta (Figura 1a e Figura 2). Os dois perfis longitudinais localizam-se respectivamente, em uma encosta retilínea (em planta e perfil), e outra côncava, sendo esta correspondente a um vale estrutural canalizado e suspenso em relação à drenagem principal (Figura 2). Já o perfil transversal, posiciona-se entre os dois perfis acima referidos, conectando-os. Foram distribuídas 8 estações ao longo do perfil



longitudinal retilíneo, 3 estações ao longo do perfil longitudinal côncavo e 4 ao longo do perfil transversal. A escolha destes perfis baseou-se no pressuposto de um intemperismo diferencial partindo do eixo do vale estrutural em relação à encosta retilínea, proporcionado por artesianismo nas faces de exfiltração da fratura que originou esta concavidade.

FIGURA 2

As perfurações foram feitas com o auxílio de um trado mecânico de caneco. Os piezômetros alcançaram profundidades variáveis tendo o mais profundo 18 m (Estação 1, divisor do perfil retilíneo) e o mais raso 0,65 m (Estação 15, extremidade direita do perfil transversal, adjacente ao canal estrutural suspenso). Nas situações em que níveis freáticos foram alcançados, instalaram-se também poços. Neste sentido, a maior recarga d'água em direção à base da encosta determinou a concentração preferencial de poços neste segmento. Durante as perfurações, realizou-se também coletas de amostras do regolito correspondentes às profundidades mais significativas, para fins de análises físicas, químicas e mineralógicas.

3.2 – Amostragem de Água

O estudo aqui apresentado corresponde a dois monitoramentos distintos: um realizado entre os meses de Novembro de 1999 e Maio de 2000, e outro em desenvolvimento a partir de Abril de 2003.

No primeiro monitoramento foram feitas coletas semanais de água da chuva, canais de drenagem e regolito sempre que possível.

Para evitar contaminação ou alterações na composição química original das águas amostradas, obedeceu-se aos seguintes procedimentos:

1. Todas as amostras foram acondicionadas em garrafas de polietileno (500 ml), cujo material é inerte;
2. Antes de sua utilização no campo, tais recipientes eram lavados com água destilada, até que os mesmos alcançassem padrões internos de condutividade elétrica iguais a $1\mu\text{S}/\text{cm}^1$;
3. Já no campo, os recipientes eram rinsados com água das próprias fontes de coleta, procedendo-se então à amostragem definitiva;
4. Ao final de cada evento de coleta, as amostras eram encaminhadas para análise, sempre que possível no mesmo dia. Na impossibilidade deste procedimento, as amostras eram guardadas na geladeira, sendo então encaminhadas ao laboratório no dia seguinte pela manhã.

Para a amostragem de água da chuva utilizou-se um coletor constituído por um funil de polietileno com 20 cm de diâmetro, conectado a um garrafão plástico, sendo os mesmos constituídos por material inerte. Ao final da amostragem, todas as partes do coletor eram lavadas com água destilada.

Quanto às amostras de água do regolito, somente puderam ser obtidas em três ocasiões, devido à ausência de água nos piezômetros e poços durante a maior parte do período

¹ Considerando que a Condutividade Elétrica da água deve-se em sua maior parte ao ácido carbônico dissociado (o qual produz H^+ e HCO_3^-), e que o conteúdo de dióxido de carbono na água destilada comum está em equilíbrio com o dióxido de carbono contido no ar do laboratório, verifica-se que o valor mínimo de Condutividade Elétrica alcançado pela água destilada é de $1\mu\text{S}/\text{cm}$ (Hem, 1959).



amostral. Tais amostras foram obtidas no piezômetro 6 (base da encosta retilínea) nos dias 10/04, 18/04 e 19/05 de 2000.

Com relação aos canais, realizaram-se coletas de água em nove pontos de amostragem (Figura 1a). O ponto 1 e o ponto 6 localizaram-se ambos na concavidade 1. Enquanto o ponto 1 posicionou-se imediatamente abaixo do estrangulamento da concavidade, o ponto 6 posicionou-se um pouco antes do encontro entre este canal e a drenagem principal. Os pontos 2 e 3 posicionaram-se ligeiramente antes da confluência dos dois canais provenientes da cabeceira da bacia, no segmento onde ambos fundem-se à drenagem principal. O ponto 4 localiza-se entre a concavidade estrutural 1 e a estação flúvio-pluviométrica, enquanto o ponto 5 posiciona-se na saída da bacia (estação). O ponto 7 encontra-se na confluência de um canal estrutural com a drenagem principal. Já os pontos 8 e 9 localizam-se ambos na saída das concavidades 2 e 3, respectivamente.

Atualmente no segundo monitoramento, estão sendo realizadas coletas mensais de águas das mesmas categorias (chuva, regolito e drenagem principal). Foram retomados alguns dos pontos de coleta da drenagem principal relativos ao primeiro monitoramento, com a adição de um ponto em um canal tributário posicionado na vertente do anti-dip. No que se refere ao monitoramento das concavidades estruturais suspensas, optou-se pela ampliação da amostragem correspondente à concavidade 1 em detrimento das demais. Para tanto, foram instaladas as estações 3 e 5 (figura 2, segundo monitoramento) compostas por piezômetro e poço, localizadas respectivamente abaixo do ponto de estrangulamento da concavidade, e no interior desta. Dentro da concavidade a profundidade do piezômetro é de 3,60 m e a do poço de 4,13 m. Abaixo do estrangulamento, o piezômetro apresenta 1,90 m e o poço 2,40 m. Tal procedimento teve como objetivo identificar a origem das águas que mantém saturado o fundo desta concavidade, mesmo durante a estiagem. Já as estações 1, 2 e 4 correspondentes ao segundo monitoramento foram instaladas com o objetivo de complementar a rede piezométrica já existente, e até então não apresentaram água.

3.2.1 – Análises Químicas

No primeiro monitoramento foram feitas análises para os seguintes parâmetros: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SiO_2 , HCO_3^- , Al^{3+} e Fe_{total} , além de pH e Condutividade Elétrica.

Considerando que o estudo em questão tinha como meta principal identificar as rotas dos fluxos d'água na bacia de drenagem em questão, a escolha dos elementos a serem analisados seguiu um critério que espelhasse as áreas-fonte mais significativas. Neste sentido, sendo Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ e SiO_2 os elementos mais abundantes nas rochas, foram selecionados pelo fato de suas concentrações refletirem o maior ou menor tempo de residência das águas no regolito e na rocha. Fe_{total} e Al^{3+} constituem elementos cujas proporções são variáveis em função dos graus de lixiviação do regolito, podendo deste modo, fornecer subsídios a respeito da magnitude dos processos de intemperismo ali atuantes. Já o HCO_3^- por ser referido pela literatura como um elemento significativo em águas subterrâneas, teve aqui a função de investigar a magnitude da contribuição das águas de fontes subterrâneas dentro da bacia estudada. Quanto à Condutividade Elétrica, trata-se de um parâmetro físico-químico que mede a capacidade que as soluções têm em permitir a passagem de corrente elétrica. Quanto maior a quantidade de íons (principalmente os salinos), maior a condutividade.

Com relação à análise dos parâmetros acima referidos, foram utilizadas na primeira etapa do monitoramento, as seguintes metodologias: para os teores de Na^+ e K^+ , Fotometria de



Chama; para os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Ferro}_{\text{total}}$ e Al^{3+} , Espectrometria de Absorção Atômica; para os teores de SiO_2 , método colorimétrico com molibdato de amônio, desenvolvendo o composto amarelo que absorve no comprimento de onda de 410 nm; para HCO_3^- , titulação com ácido sulfúrico 0,02 N e os indicadores fenolftaleína e misto (verde bromocresol com vermelho de metila); pH obtido eletronicamente por meio de eletrodo combinado imerso no líquido; e Condutividade Elétrica (C.E.) pela medição direta através do condutivímetro. Todas as análises de água foram realizadas no Laboratório de Química de Solos da COPPE/UFRJ.

Na segunda etapa do monitoramento, as amostras passaram a ser coletadas mensalmente. Os parâmetros analisados são os mesmos da primeira etapa, acrescidos apenas de cloreto (Cl^-). Todas as análises estão sendo conduzidas no Laboratório de Análise Ambiental e Mineral (LAM) do Instituto de Química da UFRJ.

4. Resultados e Discussão

4.1 – Águas

Os resultados apresentados no item 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3 correspondem à primeira etapa do monitoramento (Novembro/1999 – Maio/2000) e o item 4.1.4 aborda as tendências mais recentemente observadas a partir da segunda etapa.

4.1.1 – Características Gerais da Chuva

Para analisar a relação entre as variações geoquímicas da chuva e a distribuição e frequência das precipitações, utilizou-se apenas os dados relativos ao período em que os mesmos foram obtidos simultaneamente, ou seja, entre fevereiro e abril de 2.000.

A maioria dos elementos analisados apresentou concentrações nulas ou próximas a zero. Na^+ , HCO_3^- e $\text{Ferro}_{\text{total}}$ (média = 0,04 e C.V. = 252,2%) foram praticamente ausentes. K^+ foi o elemento mais abundante, tendo seus teores variando entre 0 e 2,21 mg/l (média = 0,86 e C.V. = 95,4%). A Sílica apresentou valores entre 0 e 0,58 mg/l (média = 0,08 e C.V. = 182,25%), e a Condutividade Elétrica entre 2 e 55 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (média = 10,4 e C.V. = 123,3%). O pH, por sua vez, apresentou-se bastante ácido, com valores variando entre 4,83 e 5,9 (média = 5,4 e C.V. = 5,86%).

² Das dezenove amostras coletadas, apenas três apresentaram teores de ferro total. Nas demais, este elemento foi totalmente ausente. Daí o elevado coeficiente de correlação.



Quanto ao comportamento temporal dos elementos durante o período amostral, verificou-se, conforme o esperado, que as concentrações químicas na chuva tendem a relacionar-se em maior ou menor grau com a duração do período seco³ e com o volume das precipitações. Há uma relação direta com a duração do período seco e inversa com a quantidade de chuvas. No primeiro caso, há um aumento na concentração dos elementos, na medida em que a duração do período seco é prolongada e os volumes de precipitação são baixos. Nesta categoria incluem-se os eventos amostrados nos dias 28/02 e 06/03, antecedidos por períodos secos de 4 e 8 dias, respectivamente (Figura 3). Eles caracterizaram-se também pelas mais elevadas concentrações. Porém, quando a umidade antecedente é elevada e a duração do período seco é curta, a diluição é maior e as concentrações tornam-se mais baixas. Neste caso, incluem-se os eventos amostrados em 14/03, 27/03, 10/04 e 18/04. Em todas estas ocasiões houve o acúmulo de chuvas, o que pode ter intensificado os efeitos da diluição. Nos eventos amostrados nos dias 10/04 e 18/04, apesar da maior duração do período seco em relação aos demais da mesma categoria (6 e 3 dias, respectivamente), as baixas concentrações persistem. Isso é um demonstrativo de que os efeitos da evaporação foram praticamente desprezíveis.

FIGURA 3

4.1.2 – Características Gerais da Água do Regolito

Durante a maior parte do período amostral correspondente ao primeiro monitoramento, não se verificou água em nenhum dos piezômetros ou poços, fato este que dificultou sobremaneira as coletas esperadas.

As três amostras então obtidas ocorreram nos dias 10/04, 18/04 e 19/05 de 2000. A umidade antecedente anterior aos dois primeiros eventos foi talvez a mais elevada de toda esta etapa do monitoramento, tornando-se progressivamente mais baixa logo após. Assim, quando a última amostra foi coletada, até os menores eventos de precipitação já se tornavam menos freqüentes. É evidente que a maior incidência de chuvas ocorrida durante o mês de abril não foi suficiente para preencher o déficit hídrico dos aquíferos temporários, de modo que todas as estações piezométricas permaneceram sem água. Porém, alguma condição local favoreceu ao acúmulo de água no piezômetro 6 e não nos demais. Interessante notar que o poço pertencente a esta mesma estação, posicionado 2 m ao lado, não apresentou água.

De todas as categorias de água amostradas, a proveniente do regolito foi a que apresentou as maiores concentrações (Figura 4). Verificou-se um enriquecimento de todos os elementos em relação à chuva. Exceção é feita aos teores de sódio e bicarbonato que na chuva foram totalmente ausentes. Isso vem a mostrar que as concentrações aqui verificadas para ambos os elementos, resultaram totalmente de reações processadas dentro do regolito.

FIGURA 4

4.1.3 – Características Gerais das Águas dos Canais

De modo geral, os canais apresentaram baixas concentrações de todos os elementos analisados e Condutividade Elétrica (Figuras 4 e 5 e Tabela 1). O pH, por sua vez, é neutro (média = 7 e C.V. = 3,4% na saída da bacia). Essa é uma tendência observada em todos os pontos de amostragem, refletindo assim uma pequena variação espacial dos resultados.

³ Considerou-se como *período seco*, o intervalo de tempo decorrido entre dois períodos chuvosos distintos, sem ocorrência de precipitações. O próprio dia da amostragem não foi contabilizado nessa estimativa, devido ao fato de as coletas terem sido feitas no período da manhã.



Entre os nove pontos de coleta, apenas três apresentaram concentrações químicas ligeiramente superiores – os pontos 1 e 6 localizados na extensão da concavidade 1. As baixas concentrações foram mantidas durante toda esta etapa do monitoramento, havendo apenas pequenas oscilações temporais.

FIGURA 5

TABELA 1

As pequenas variações temporais e espaciais das concentrações químicas das águas da drenagem principal e a ausência de uma correspondência clara entre o comportamento geoquímico dos canais, o das chuvas e o do regolito constituem uma forte evidência de que o fluxo de base desta bacia é mantido por uma única fonte subterrânea pouco influenciada pelos condicionantes atmosféricos.

Embora os modelos clássicos de movimentação da água dentro de uma bacia de drenagem demonstrem que o comportamento geoquímico dos canais é uma resultante direta de interações processadas entre a água que entra no sistema sob a forma de chuvas, e os diversos ambientes com os quais interage ao infiltrar (regolito e substrato rochoso), além do próprio tempo de residência em aquíferos suspensos e profundos que pode ser bastante variável, é possível que na bacia em estudo tais tendências não tenham se reproduzido. Durante o primeiro monitoramento, verificou-se que, não havendo entradas pluviométricas suficientes para gerar escoamentos superficiais e subsuperficiais, que, de modo geral, ao alcançarem a drenagem principal promovem um efeito de diluição, os canais contaram somente com o aporte hídrico proveniente das fontes subterrâneas. Isto foi claramente evidenciado pela ausência de água nas estações piezométricas, pela falta de correspondência geoquímica entre as águas dos canais, do regolito e das chuvas e pela estabilidade espaço-temporal nas dos parâmetros químicos analisados.

Ainda nesta perspectiva, Hem (1959) afirma que rochas com alto grau de metamorfismo, submetidas à temperatura e pressão elevados durante a sua formação, tendem a originar águas com baixas concentrações em elementos. Os gnaisses e os quartzitos presentes na área estudada se incluem nesta categoria. A densa estrutura destas rochas quando não intemperizadas, impede o contato direto da água com os minerais ali presentes, ao longo de grandes áreas superficiais. Neste sentido, a oportunidade da água em captar íons disponibilizados por tais tipos de rocha é mínima. Considerando a hipótese da participação efetiva da água subterrânea de origem profunda na bacia estudada, as baixas concentrações de elementos dos canais estariam refletindo claramente as relações água-rocha características ao tipo de substrato rochoso ali presente.

4.1.4 – Tendências atuais do comportamento hidrogeoquímico do alto vale do rio Fortaleza

A retomada deste monitoramento a partir de abril de 2003, embora ainda com pequena amostragem, aponta para a manutenção dos padrões de comportamento geoquímico observados na primeira etapa. Observa-se que a drenagem principal permanece com baixas concentrações de elementos e com pequenas variações espaço-temporais (Figura 6).

FIGURA 6

Porém, com relação aos pontos correspondentes à concavidade estrutural e ao seu entorno, as concentrações dos elementos em nada se relacionam com a drenagem principal, apresentando-se, de modo geral, bastante superiores (Figura 7 e Tabela 2). Verifica-se que, no conjunto de pontos constituído pelo poço da concavidade (Figura 2, estação 5), pela



fratura e pelo poço posicionado abaixo do estrangulamento (Figura 2, estação 3), as concentrações de praticamente todos os elementos analisados são mais elevadas no interior da concavidade, sendo atenuadas na fratura e novamente enriquecidas abaixo do estrangulamento. Conforme esperado, este comportamento aponta para uma fonte subterrânea, porém, neste caso, suspensa em relação à drenagem principal. As mais altas concentrações dos elementos no interior da concavidade e abaixo do estrangulamento são ambas justificadas pelo maior tempo de residência da água nestes ambientes, condicionado pelas condições de saturação. Dentro da concavidade, os mais elevados teores de ferro total e alumínio (Figura 7 e Tabela 2) parecem refletir as condições redutoras ali atuantes, as quais conferem também características de hidromorfismo aos materiais do regolito (XAVIER, *em preparação*).

FIGURA 7 TABELA 2

Já o canal do anti-dip apresenta um comportamento que por ora parece relacionar-se com o da drenagem principal, embora para o elemento cálcio apresente concentrações médias mais baixas e para o elemento sílica, com exceção dos pontos correspondentes à concavidade, concentrações mais elevadas (Figura 7). Considerando que nesta vertente há ocorrência de lentes calciossilicáticas, é possível que a tendência ora observada esteja em acordo com os padrões de comportamento geoquímico correspondente a cada um destes elementos. É fato que os materiais que compõem o regolito no interior desta bacia encontram-se já em estágio de alteração bastante avançado. Neste sentido, sendo o cálcio bastante solúvel, é possível que tenha sido também altamente lixiviado, apresentando-se atualmente com teores proporcionalmente mais baixos que os demais elementos. Já a sílica, abundante nos resistatos, apresenta ainda altas concentrações, sendo estas proporcionalmente superiores a de todos os outros elementos.

5. Considerações Finais

Considerando o perfil geoquímico da água ao entrar no sistema da bacia de drenagem sob a forma de chuva, ou seja, baixas concentrações de todos os elementos e pH ácido, a água interage com os solos, e sofre um processo de enriquecimento. Porém, diante das baixas frequência e magnitude das chuvas e da ausência de água nos piezômetros durante o primeiro monitoramento, é possível que esta água não tenha alcançado os canais de drenagem.

A água dos canais, por sua vez, apresentou-se pobre em elementos, apesar do pH neutro, refletindo uma baixa relação com a água do regolito e com a chuva. Esse perfil geoquímico dos canais teve uma expressão espacial significativa, na medida em que todos os pontos de amostragem comportaram-se de igual modo. Tais resultados apontam para uma fonte subterrânea única para a drenagem principal, responsável pela contínua manutenção do fluxo de base mesmo em períodos de estiagem, e pela manutenção da estabilidade espaço-temporal no comportamento geoquímico dos canais, verificado em ambos os monitoramentos.

Por outro lado, supõe-se que diante das elevadas concentrações de elementos verificadas nos pontos de amostragem correspondentes à concavidade estrutural e ao seu entorno (monitoramento 2, estações 3 e 5), haja uma fonte subterrânea secundária, constituída por um aquífero suspenso. No entanto, ainda não é possível afirmar com exatidão a rota percorrida pela água entre o fundo saturado da concavidade e a drenagem principal. Até então são propostas duas possibilidades de trajeto: uma em que há um único ponto de



exfiltração dentro da concavidade, de onde a água escoar até a drenagem principal, e outra em que a exfiltração ocorre em toda a extensão da fratura na qual a própria concavidade estrutural encontra-se posicionada até drenagem principal. Esta será uma das questões prioritárias durante as próximas investigações.

Por fim, verifica-se que apesar de as águas do entorno da concavidade estrutural apresentarem os mais elevados teores em todos os parâmetros químicos analisados, os mesmos mostram-se insuficientes para promover qualquer tipo de alteração no equilíbrio hidrogeoquímico da drenagem principal.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho são gratos ao Prof^o Francisco Casanova, Coordenador do Laboratório de Química de Solos da Geotecnia (COPPE/UFRJ) e à Química Maria da Glória M. Rodrigues pela realização das análises químicas de água, através do acordo de cooperação entre o GEOHECO e a Geotecnia/COPPE, por meio do Programa de Núcleos de Excelência (PRONEX). Agradecemos também ao apoio financeiro do CNPq, PRONEX e FUJB, sem o qual este trabalho não teria se concretizado.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, J. C. H.; EIRADO SILVA, L. G. A. & AVELAR, A. S. Perfil lito-estrutural na região Bananal-Arapeí, vertente norte da Serra da Bocaina – SP. In: *I SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE*. Rio de Janeiro. 1989. *Atas*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1989.

CASTRO, S. S. & COELHO NETTO, A. L. Evolução pedogenética em depressão de topo, na bacia do alto vale do rio Fortaleza, região de Bananal (SP): resultados preliminares. In: *IV ENCONTRO SOBRE ENGENHARIA GEOTÉCNICA E HIDROLOGIA NO SISTEMA ENCOSTA-PLANÍCIE COSTEIRA*. Bananal. 2002. *Anais*. Rio de Janeiro: Programa de Núcleos de Excelência (PRONEX/CNPq), 2002. p. 181-192.

COELHO NETTO, A. L. Catastrophic landscape evolution in a humid region (SE Brasil): inheritances from tectonic, climatic and land use induced changes. *Supplementi di Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, Torino, s. III, t. 3, p.21-48, 1999.

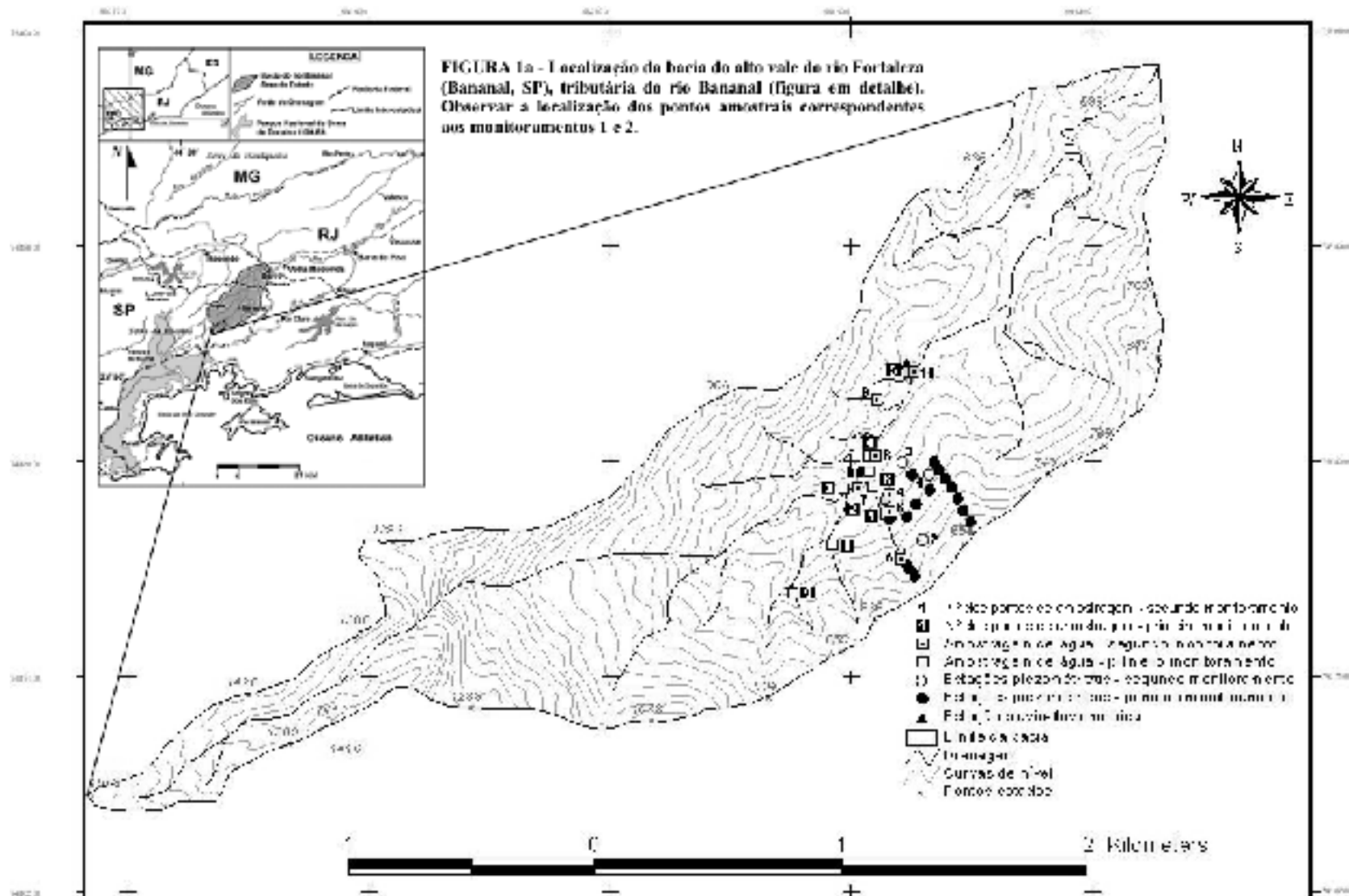
EIRADO SILVA, L. G. A.; DANTAS, M. E. & COELHO NETTO, A. L. Condicionantes lito-estruturais na formação de níveis de base locais (“knickpoints”) e implicações geomorfológicas no médio vale do rio Paraíba do Sul (RJ/SP). In: *III SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE*. Rio de Janeiro. 1993. *Atas*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1989.

FERNANDES, M. R. *Evolução pedogeomorfológica de vertentes – o caso da bacia do Fortaleza, Bananal – SP*, 2000. 104 p. Relatório Final (Pós-Doutorado em Geografia) UFRJ/FAPERJ. Rio de Janeiro.



HEILBRON, M.; VALERIANO, C. M.; ALMEIDA, J. C. H. & TUPINAMBÁ, M. A. A megassinforma do Paraíba do Sul e sua implicação na compartimentação tectônica do setor central da Faixa Ribeira. In: *II SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE*. São Paulo. 1991. *Atas*. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1991.

HEM, J. D. 1959. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural waters. *U.S. Geological Survey, Water Supply paper 1473*.



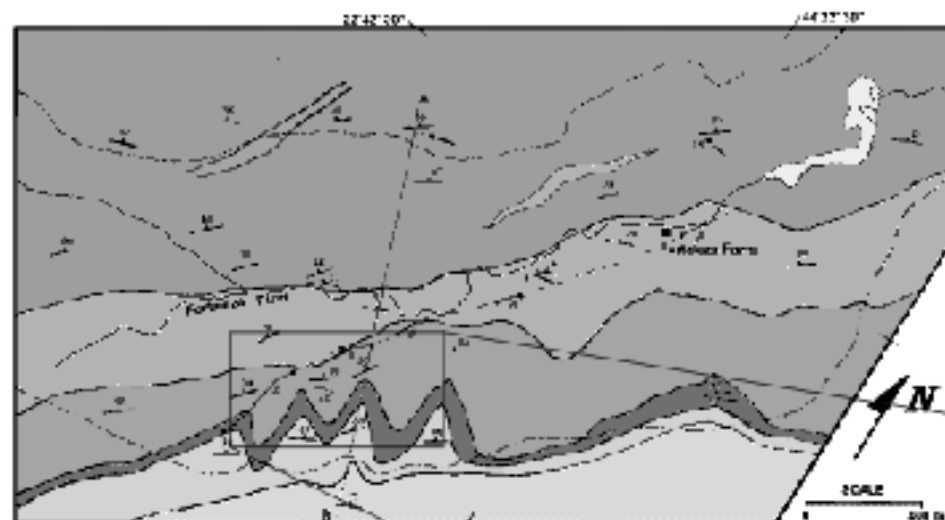


FIGURA 1b - Mapa de Geologia de parte da bacia do alto vale do rio Fortaleza, Bananal (SP) em escala 1:10.000.



(Adaptada. Estado São Paulo, 1995)

Pré-Cambriano - Grupo Parolito do Sul

Formação São João

- Tm, Si, G, R, Gnaiss porfiríticos em nível lacustro-marinho e lenticos Ca, Co, P, S, Al.
- Si, G, R, G, Gnaiss de nível lacustro-marinho e lenticos de Ca.
- Si, G, R, G, Gnaiss silicificados em nível lacustro-marinho e lenticos de Ca.

- G, Si, Mu, G, Gnaiss e calcário quartzítico em nível lacustro-marinho e lenticos de Ca, Co, P, S, Al.
- Si, G, Mu, G, Gnaiss silicificados com lenticos de Ca, P, S, Al.

Formação Três Barras

- Si, Gnaiss silicificados com lenticos de Ca, P, S, Al.

Abreviações

Tm = Tamaíba; Si = Silimanita; G = Granada; Mu = Muscovita;
 H = Horta; P = Poreira; Ca = Carbonato; Co = Córneo;
 Al = Alúmina; S = Sulfato; P = Fosfato; S = Sódio;
 R = Ródio; G = Gnaiss

1, 2 e 3 - Concavidades Estruturais

Simbologia

- Linha de base (rio de Fortaleza)
- rede de drenagem
- Contorno (topografia)
- 50 — Contorno (elevação em metros)
- Contorno (elevação em metros)
- Contorno (elevação em metros)
- Contorno (elevação em metros)
- Contorno (elevação em metros)



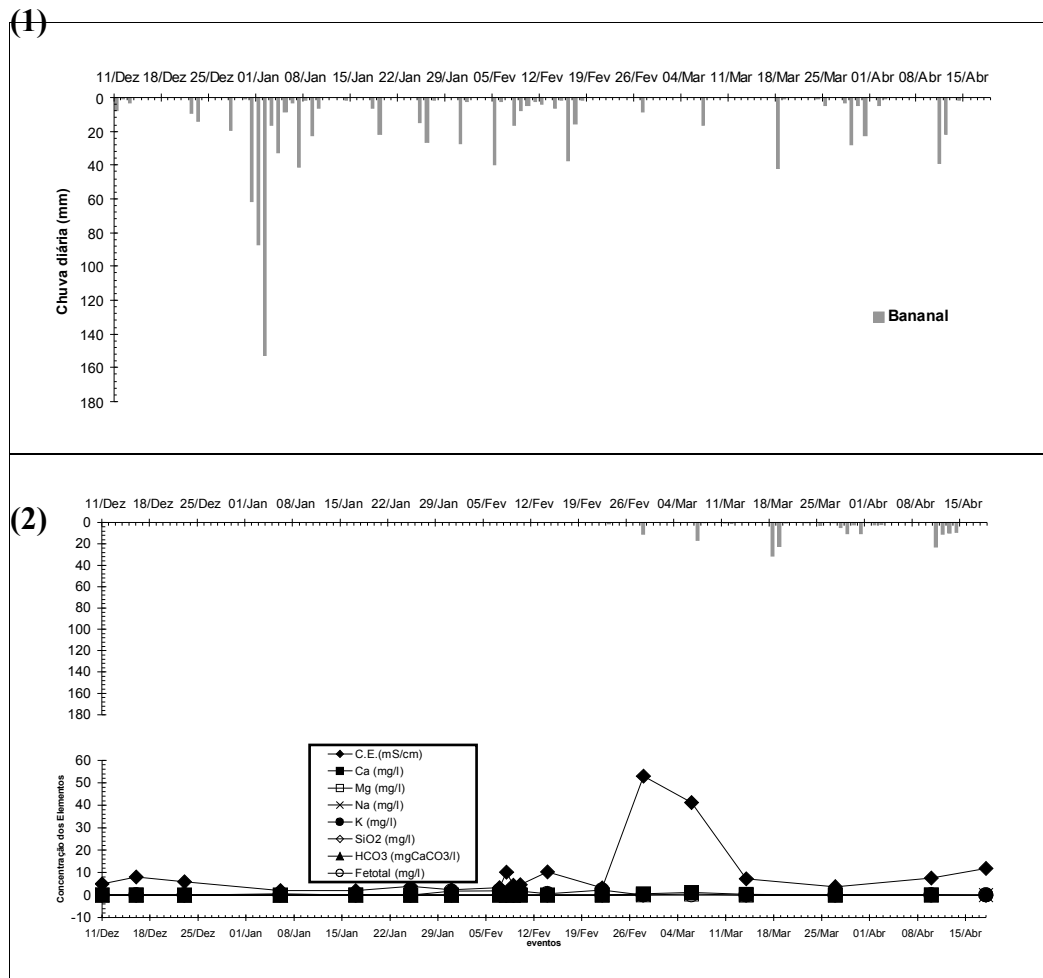


FIGURA 3 – (1) distribuição da chuva diária na Estação Bananal; (2) relação entre a concentração dos elementos na precipitação e a distribuição das chuvas diárias durante o período amostrado. Devido à um problema de entupimento da saída de água do pluviômetro digital, os dados compreendidos entre 27/11/2000 e 11/02/2000 não mostraram-se confiáveis, daí a sua ausência nesta figura.

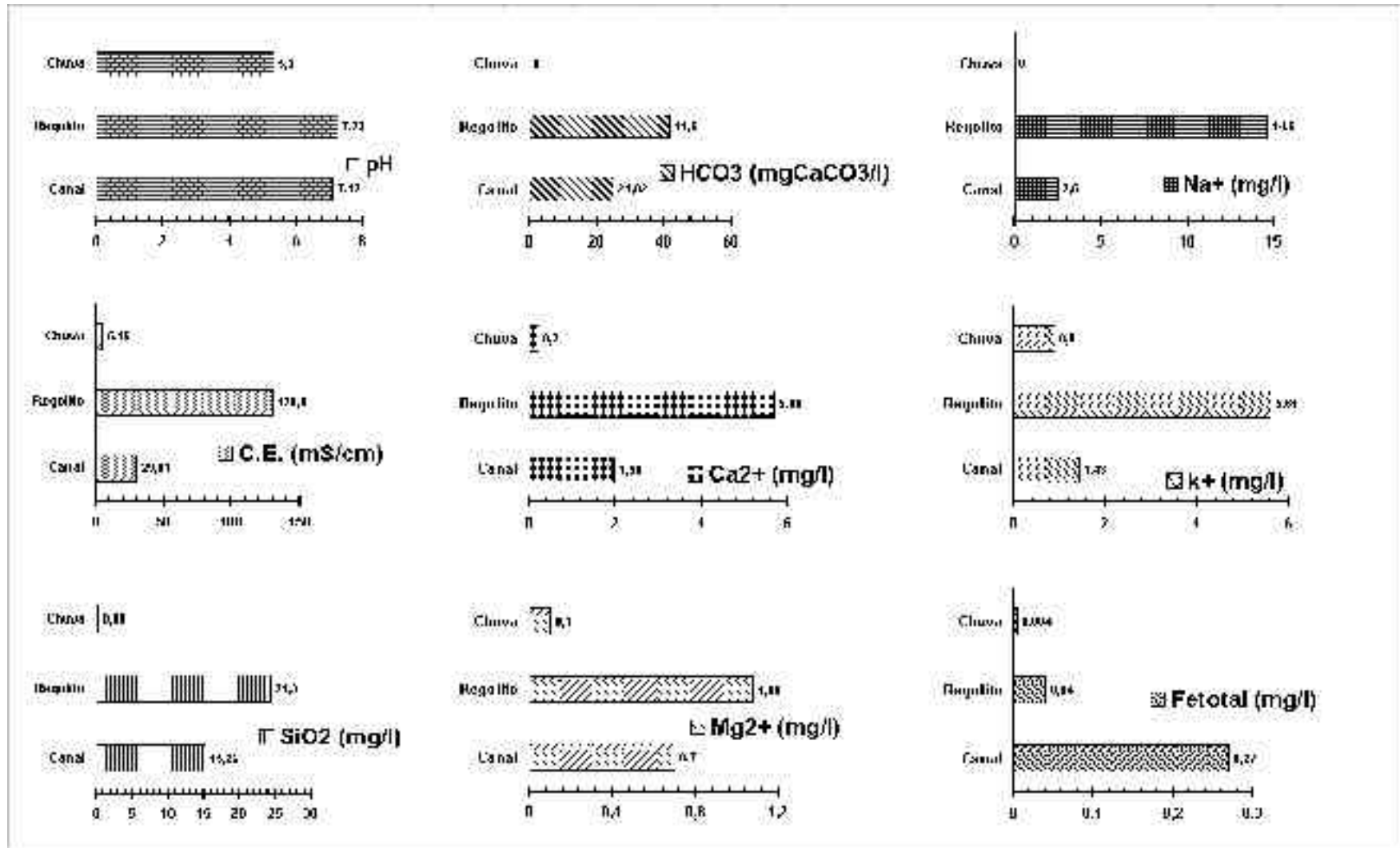


FIGURA 4 – Concentrações dos elementos analisados nas águas da chuva, regolito e canal principal (saída da bacia).



TABELA 1 – Concentrações médias dos elementos analisados (por ponto de amostragem dos canais) e Coeficiente de Variação (C.V.%).

	P1		P2		P3	
	Média	C.V.(%)	Média	C.V.(%)	Média	C.V.(%)
C.E. (mS/cm)	34,95	12,12	26,25	16,01	26,30	13,60
pH	7,00	3,85	7,10	3,04	7,17	4,37
SiO ₂ (mg/l)	18,68	9,25	15,76	11,18	13,94	10,23
HCO ₃ (mgCaCO ₃ /l)	26,60	11,87	23,80	14,93	25,38	14,41
Ca ²⁺ (mg/l)	2,09	20,42	1,50	29,22	1,86	21,84
Mg ²⁺ (mg/l)	1,03	17,47	0,80	10,80	0,60	18,16
Na ⁺ (mg/l)	3,21	11,42	1,84	16,11	2,09	21,30
K ⁺ (mg/l)	1,50	69,47	1,48	64,47	1,38	107,68
Fe _{total} (mg/l)	0,71	67,77	0,08	180,64	0,15	116,12

	P4		P5		P6	
	Média	C.V.(%)	Média	C.V.(%)	Média	C.V.(%)
C.E. (mS/cm)	27,63	15,40	29,73	12,30	40,65	35,55
pH	7,20	3,57	7,12	4,06	7,25	4,12
SiO ₂ (mg/l)	15,71	27,12	15,31	6,17	22,48	18,30
HCO ₃ (mgCaCO ₃ /l)	25,76	19,25	25,22	19,27	28,33	12,94
Ca ²⁺ (mg/l)	1,78	21,49	1,98	17,87	2,44	14,43
Mg ²⁺ (mg/l)	0,65	14,93	0,70	15,18	0,90	11,47
Na ⁺ (mg/l)	2,16	20,07	2,46	19,19	3,61	21,18
K ⁺ (mg/l)	1,24	56,74	1,42	71,60	2,12	53,80
Fe _{total} (mg/l)	0,17	134,47	0,27	77,61	0,11	73,28

	P7		P8		P9	
	Média	C.V.(%)	Média	C.V.(%)	Média	C.V.(%)
C.E. (mS/cm)	25,65	26,32	22,97	31,97	26,98	27,65
pH	7,06	1,03	7,12	3,06	7,21	1,36
SiO ₂ (mg/l)	13,70	5,14	14,54	21,94	16,05	4,95
HCO ₃ (mgCaCO ₃ /l)	23,81	13,84	24,44	17,16	24,52	14,48
Ca ²⁺ (mg/l)	1,22	18,57	1,17	37,96	1,40	5,89
Mg ²⁺ (mg/l)	0,77	16,93	0,56	12,11	0,68	4,67
Na ⁺ (mg/l)	1,66	7,16	1,20	65,92	1,38	6,1
K ⁺ (mg/l)	1,29	59,03	2,48	187,75	1,65	67,15
Fe _{total} (mg/l)	0,21	219,64	0,11	86,28	0,11	60,6

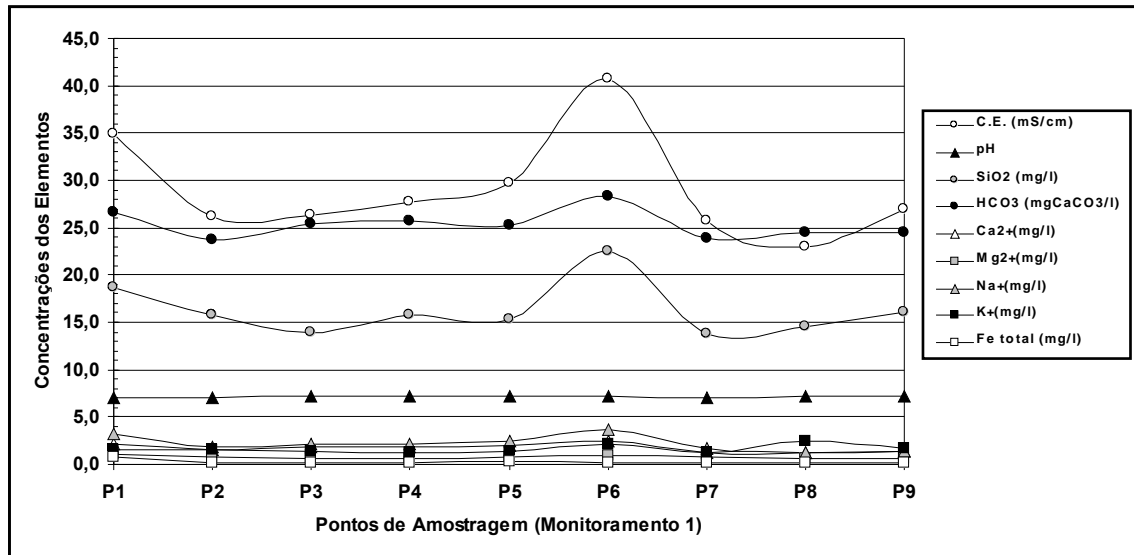


FIGURA 5 – Comparação das concentrações médias dos elementos analisados nas águas dos canais entre os pontos amostrados.

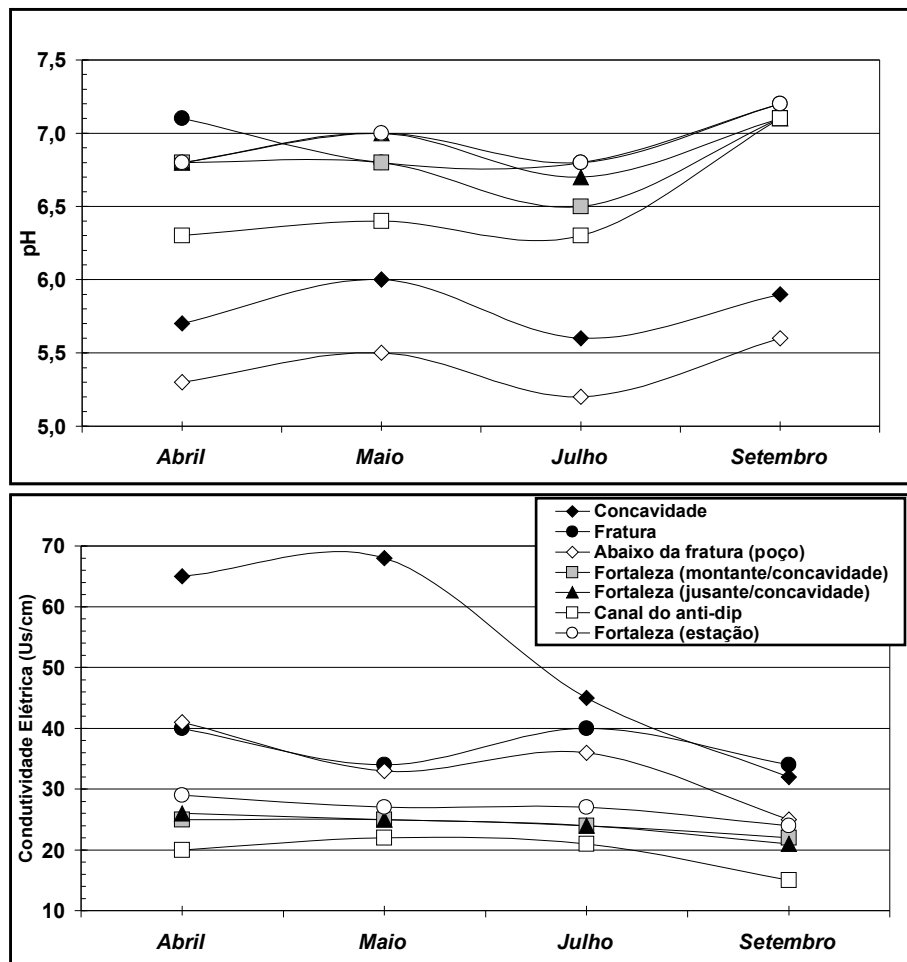


FIGURA 6 – Variações espaço-temporais dos parâmetros físico-químicos pH e Condutividade Elétrica em alguns pontos da drenagem principal e entorno da concavidade estrutural suspensa, na bacia do alto vale do rio Fortaleza, Bananal (SP). Os dados ora apresentados referem-se à segunda etapa do monitoramento. Observar a manutenção das condições de equilíbrio espaço-temporais identificadas durante a primeira etapa do estudo.



FIGURA 7 – Concentrações médias dos elementos analisados nas águas da drenagem principal e entorno da concavidade estrutural suspensa, a partir da segunda etapa do monitoramento (iniciada em Abril de 2003). Observar que as mais altas concentrações são evidenciadas nos pontos referentes ao interior da concavidade, à fratura (posicionada abaixo do ponto de estrangulamento da concavidade), e ao poço posicionado à jusante da fratura. Observar também que, as mesmas tendências são mantidas praticamente inalteradas em todos os elementos.

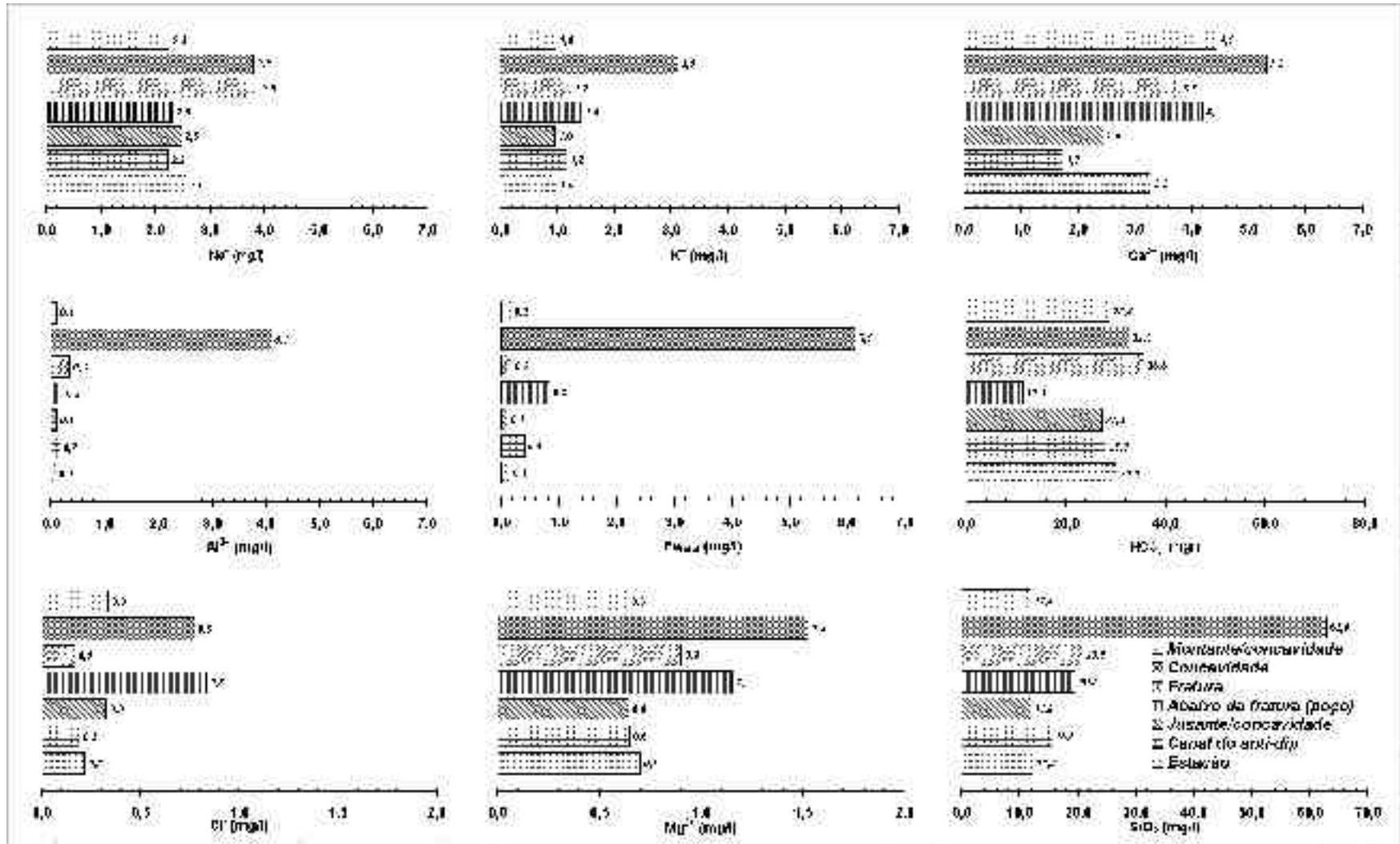




TABELA 2 – Concentrações médias, desvio padrão e coeficiente de variação (%) das concentrações dos elementos analisados nas águas da drenagem principal e entorno da concavidade estrutural a partir do segundo monitoramento (iniciado em Abril de 2003).

	MONTANTE/CONCAVIDADE			JUSANTE/CONCAVIDADE			CANAL DO ANTI-DIP			ESTAÇÃO		
	Média	Desv. Pad.	C.V. (%)	Média	Desv. Pad.	C.V. (%)	Média	Desv. Pad.	C.V. (%)	Média	Desv. Pad.	C.V. (%)
Na⁺	2,25	0,11	4,97	2,48	0,04	1,75	2,23	0,15	6,65	2,58	0,13	5,04
K⁺	0,97	0,06	5,82	0,95	0,05	5,72	1,15	0,05	4,35	0,97	0,07	7,60
Mg²⁺	0,64	0,03	4,49	0,64	0,04	5,86	0,65	0,04	5,50	0,70	0,06	9,31
Ca²⁺	4,43	0,13	2,94	2,45	0,15	6,12	1,73	0,04	2,51	3,28	0,04	1,32
Al³⁺	0,09	0,02	17,74	0,09	0,01	5,55	0,15	0,05	33,23	0,09	0,01	13,21
Fe_{total}	0,16	0,01	4,42	0,09	0,02	18,25	0,39	0,25	64,28	0,13	0,05	35,93
Cl⁻	0,34	0,10	28,75	0,33	0,11	33,74	0,19	0,05	26,32	0,22	0,04	20,14
HCO₃⁻	28,75	2,28	7,92	27,25	1,30	4,77	28,00	1,41	5,05	30,00	1,58	5,27
SiO₂	11,75	0,83	7,06	11,75	0,43	3,69	15,50	1,12	7,21	12,25	1,48	12,07

	CONCAVIDADE			FRATURA			ABAIXO DA FRATURA (POÇO)		
	Média	Desv. Pad.	C.V. (%)	Média	Desv. Pad.	C.V. (%)	Média	Desv. Pad.	C.V. (%)
Na⁺	3,80	0,12	3,22	3,90	0,12	3,14	2,33	0,08	3,57
K⁺	3,10	0,07	2,28	1,23	0,08	6,77	1,43	0,08	5,82
Mg²⁺	1,53	0,08	5,44	0,90	0,09	9,80	1,15	0,05	4,35
Ca²⁺	5,30	0,07	1,33	3,78	0,11	2,89	4,18	0,08	1,99
Al³⁺	4,10	1,81	44,24	0,34	0,38	112,21	0,21	0,09	42,61
Fe_{total}	6,13	0,82	13,43	0,17	0,06	35,55	0,84	0,73	87,57
Cl⁻	0,77	0,27	34,71	0,17	0,03	18,58	0,83	0,11	12,64
HCO₃⁻	32,50	1,80	5,55	35,50	3,50	9,86	11,33	2,21	19,48
SiO₂	62,75	4,87	7,76	20,75	1,30	6,26	19,50	4,03	20,67