



www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 17, nº 1 (2016)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v17i1.878>



A CONTRIBUIÇÃO DAS NASCENTES NA DESNUDAÇÃO GEOQUÍMICA: BORDA OESTE DA SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL (MINAS GERAIS, BRASIL)

THE CONTRIBUTION OF SPRINGS TO GEOCHEMICAL DENUDATION: WESTERN EDGE OF THE SOUTHERN SERRA DO ESPINHAÇO (MINAS GERAIS, BRAZIL)

Miguel Fernandes Felipe

*Departamento de Geociências, Universidade Federal de Juiz de Fora
Rua José Lourenço Kelmer, s/n, Juiz de Fora, Minas Gerais, CEP: 36.036-900, Brasil
Email: miguel.felippe@ufjf.edu.br*

Antônio Pereira Magalhães Jr.

*Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP: 31.270-901, Brasil
Email: magalhaesufmg@yahoo.com.br*

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
06/10/2015
Aceito (Accepted):
15/11/2015

Palavras-chave:

Nascente; Hidrogeoquímica;
Carga Dissolvida.

Keywords:

Spring; Hydrogeochemistry;
Dissolved Load.

Resumo:

Processos geoquímicos estão associados ao intemperismo e à desnudação em ambientes úmidos. Perdas geoquímicas em bacias hidrográficas e sistemas fluviais já foram estudadas em várias partes do mundo, comprovando a sua efetividade. Todavia, o papel das nascentes de cursos d'água na desnudação geoquímica é praticamente desconhecido. Esse artigo investiga a contribuição das nascentes para as perdas geoquímicas, estudando dois casos na borda oeste da Serra do Espinhaço Meridional. Durante um ano hidrológico, 23 nascentes foram monitoradas para o cálculo das taxas instantâneas e médias anuais de sólidos totais dissolvidos e de perda geoquímica. Os resultados mostram que a origem hidrogeológica e a dinâmica hidrogeomorfológica das nascentes são os principais fatores controladores da sua contribuição para a desnudação geoquímica. Assim, enquanto algumas nascentes em rochas quartzíticas apresentaram perda geoquímica inferior a 10,0 kg/ano, uma das nascentes carbonáticas superou 45.000,0 kg/ano (valor comparável a canais de maiores ordens). Portanto, o papel das nascentes para a desnudação geoquímica e, conseqüentemente, para a evolução da paisagem é mais significativo e complexo do que se pressupunha.

Abstract:

Geochemical processes are associated to weathering and denudation in humid environments. Waste of chemical material in watersheds and fluvial systems have already been studied all around the world, testifying its significance. However, the role of river springs in geochemical denudation is still unknown. This paper aims

to investigate the contribution of river springs to geochemical waste by studying two cases at the western edge of the southern Serra do Espinhaço, Minas Gerais state. During a hydrological year, 23 river springs were studied to calculate taxes of total dissolved solids and geochemical lost. The results show that the hydrogeological origin and the hydrogeomorphological dynamics of springs are the main control factor to their contribution to geochemical denudation. Nevertheless, while some springs in quartzite register a geochemical waste less than 10.0 kg/ano, one of the carbonate spring reaches 45,000.0 kg/ano (a value comparable with major order rivers). Therefore, it seems that the role of springs to geochemical denudation and consequently to landscape evolution is more complex and significant than we presumed.

1. Introdução

Considera-se uma nascente “como um sistema ambiental em que o afloramento da água subterrânea ocorre naturalmente de modo temporário ou perene, e cujos fluxos hidrológicos na fase superficial são integrados à rede de drenagem” (FELIPPE e MAGALHÃES JR, 2013, p. 79). Assim, as nascentes, no âmbito dos estudos geomorfológicos, não devem ser concebidas de modo simplista como os pontos iniciais da drenagem fluvial, mas também enquanto elementos ativos na evolução geomorfológica das paisagens (SPRINGER e STEVENS, 2009). Por meio das nascentes, significativas quantidades de matéria dissolvida podem ser retiradas dos aquíferos e carreadas para os cursos fluviais, contribuindo com a desnudação geoquímica das bacias hidrográficas. Entretanto, a contribuição efetiva das nascentes na perda de massa continental é ainda obscura, dada a escassez de trabalhos sobre o tema.

Os métodos e técnicas de quantificação da desnudação de sistemas geomorfológicos (vertentes ou bacias hidrográficas, por exemplo) evoluíram sensivelmente nas últimas décadas. Vários trabalhos de investigação de processos físicos e químicos envolvidos na evolução do relevo têm sido gerados na literatura internacional (ANDERSON *et al.*, 1993; EDMOND *et al.*, 1995; ANDERSON *et al.*, 2002; KIRCHNER *et al.*, 2006). Desse modo, uma série de estudos comparativos já foi disponibilizada, mostrando, entre outros, a importância da resistência do embasamento geológico ao intemperismo para a velocidade e intensidade dos processos intempéricos e desnudacionais (LOUVAT e ALLEGRE, 1997; WHITE *et al.*, 1998; SCHIMIDT e MORCHE, 2006). Porém, a separação das parcelas subterrânea e superficial da desnudação geoquímica ainda é um desafio repleto de perguntas não respondidas. Nesse ínterim, as nascentes ganham importância.

As nascentes se configuram no elemento transicional entre as águas subterrâneas e as superficiais

através do processo de exfiltração. Esta característica gera certa complexidade na sua compreensão, uma vez que as águas das nascentes encontram-se na superfície, mas ainda possuem características químicas de águas subterrâneas logo após a exfiltração. Por isso, a mineralização da água das nascentes depende essencialmente de três fatores: i) das características químicas das águas que promovem a recarga; ii) das características químicas do material (aquífero) no qual a água percola e é armazenada; iii) do tempo de residência da água no aquífero (CLEARY, 1989; FETTER, 1994; FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000). Portanto, o comportamento dos fluxos subterrâneos deve ser compreendido a partir do seu movimento, o qual depende das condições de energia (potencial) de cada sistema. Neste sentido, há tendência para o deslocamento dos fluxos em direção ao maior gradiente (mais rápido decréscimo) potencial (MORAES, 1982).

Entre a recarga dos aquíferos e a descarga dos fluxos nas nascentes há um intervalo temporal muito variável, podendo durar dias, meses ou mesmo milênios. A duração desse processo configura-se no tempo de residência da água nos aquíferos e depende, fundamentalmente, da distância entre as zonas de recarga e descarga, da profundidade do aquífero e da velocidade do fluxo subterrâneo (CLEARY, 1989). Assim, Fetter (1994) relaciona o tempo de residência dos fluxos subterrâneos com a flutuação das descargas em surgências. Geralmente, a vazão das nascentes abastecidas por sistemas de fluxos locais (menor tempo de residência) possui relação mais próxima com a variabilidade da precipitação, mostrando flutuações sazonais mais severas. Por outro lado, nascentes alimentadas por fluxos regionais (maior tempo de residência) terão descargas mais estáveis (FETTER, 1994).

Resumidamente, fluxos regionais, que permanecem mais tempo em contato com o aquífero, tendem a ter maior grau de mineralização do que fluxos locais. Assim, o grau de mineralização é uma medida indireta

do tempo de residência da água no aquífero.

Essa incorporação de elementos na água pode ocorrer na forma molecular ou iônica, sendo resultado do intemperismo e lixiviação das rochas e solos (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000). É esperado, deste modo, que as águas guardem características químicas que remetam aos aquíferos de origem, o que é chamado de assinatura geoquímica (LUIZ-SILVA *et al.*, 2012; SALGADO *et al.*, 2004). Toda a carga em solução na água dos aquíferos é transmitida às nascentes e aos cursos d'água superficiais por meio de processos de exfiltração, contribuindo quantitativamente, para o cálculo da desnudação geoquímica. Os processos geomorfológicos superficiais também contribuem para o aumento da carga em solução dos cursos d'água. Portanto, no exutório de uma bacia hidrográfica, a desnudação geoquímica mensurada é função desses dois conjuntos de processos (superficiais e subterrâneos), sendo impossível distingui-los. Entretanto, como já foi relatado acima, a água que exfiltra nas nascentes é eminentemente subterrânea, sem contribuição de processos superficiais. Assim, ao se avaliar a perda geoquímica nas nascentes, pode-se inferir a contribuição da parcela subterrânea na desnudação geoquímica total.

Summerfield (1991) afirma que aproximadamente um terço da desnudação total em escala global é de caráter geoquímico. Todavia, em climas úmidos e semiúmidos, em que as taxas de intemperismo químico e lixiviação são mais acentuadas, esse percentual tende a ser ainda maior (DOUGLAS, 1968; THOMAS, 1994). Considerando-se que as águas subterrâneas possuem grau de mineralização notadamente superior às águas fluviais e meteóricas e que isso implica em grande carga em solução, fica evidenciada a importância do trabalho geomorfológico das nascentes. Nesse sentido, Valadão (1998) afirma que o fluxo geoquímico que ocorre no interior do manto de alteração, corresponde à carga dissolvida que alcança os canais fluviais a partir do movimento da água subterrânea.

A literatura acadêmica geomorfológica que investiga o papel da desnudação geoquímica na evolução do relevo está normalmente associada a grandes compartimentos morfológicos ou grandes bacias hidrográficas. Assim, os métodos e técnicas desenvolvidos não se aplicam diretamente ao estudo das nascentes. A base desses procedimentos tem como parâmetro o TDS (Sólidos Totais Dissolvidos), que representa a totalidade da carga dissolvida na forma iônica ou coloidal

(SCHIMIDT e MORCHE, 2006). Para as nascentes, não há possibilidade de calcular taxas de desnudação geoquímica no modelo tradicional (na forma de massa por área por tempo – ton/km²/ano) devido à imprecisão relacionada ao volume da bacia subterrânea que as alimenta. Porém, ao se relacionar o TDS e a vazão pode-se calcular a quantidade de matéria perdida por unidade de tempo no processo de exfiltração (na forma de massa por tempo ton/ano).

Estudos recentes apontam que a desnudação geoquímica está relacionada à resistência das rochas ao intemperismo (desnudação diferencial) e/ou à energia dos compartimentos do relevo, refletida na densidade e magnitude da rede de drenagem (LEÃO *et al.*, 2012; CHEREM *et al.*, 2012; REZENDE *et al.*, 2010; SALGADO *et al.*, 2004). Em ambos os casos, o tempo de mineralização da água em meio subterrâneo é fundamental, pois, considerando um mesmo contexto geológico, a desnudação instantânea em cabeceiras será maior nos locais relacionados a fluxos subterrâneos mais lentos, capazes de solubilizar maior quantidade de material e promover maior esvaziamento químico.

Sardinha *et al.* (2012), investigando a hidroquímica da bacia do rio Jaú (SP), afirmam que a desnudação química aumenta mormente de jusante para montante, sobretudo devido ao aumento da vazão dos cursos d'água nesse mesmo sentido. Porém, não foi verificada uma linearidade nessa tendência, evidenciando que sub-bacias com valores de TDS mais elevados podem afetar localmente o curso principal, promovendo taxas de desnudação geoquímica mais elevadas no médio-curso. Buscando parametrizar esse tipo de raciocínio, Lecomte *et al.* (2009) realizaram análises estatísticas para verificar a correlação de fatores morfológicos com a geoquímica da água nas Sierras Pampeanas (Argentina). Concordando com Sardinha *et al.* (2012), resultados do trabalho argentino apontam que o tamanho da bacia está altamente relacionado com a concentração dos íons majoritários, exatamente aqueles de maior influência no TDS e, conseqüentemente, com a desnudação geoquímica. Por outro lado, a declividade média das bacias apresentou maior correlação com os metais pesados analisados.

Baylich *et al.* (2004) e Baylich e Laute (2012) ampliaram a discussão a partir de estudos realizados na Escandinávia, incluindo outros fatores ambientais na análise da variabilidade espacial do TDS. Além da já reconhecida relação do material geológico com a hidro-

química dos cursos d'água, esses trabalhos apontam a profundidade e a cobertura areal do regolito, diferenças na cobertura vegetal e diferenças na cobertura nival como aspectos a serem incluídos na discussão da desnudação geoquímica. Zhu *et al.* (2012) buscam retomar a influência da geologia e do clima na hidrogeoquímica. Os autores relacionam a variabilidade espacial do TDS com múltiplas fontes de solubilização (fator hidrogeológico), mas alertam para uma forte influência antrópica nas concentrações de determinados íons. Desse modo, o ser humano pode ter, em alguns casos, maior influência do que os fatores hidrogeológico e climático na desnudação geoquímica mensurada.

Buscando ampliar essa discussão, este trabalho

tem o objetivo de investigar o papel das nascentes na desnudação geoquímica, a partir de 24 casos estudados na borda oeste da Serra do Espinhaço Meridional. Por meio da conjugação de análises laboratoriais e modelos hidrogeológicos e geomorfológicos, discute-se a perda geoquímica processada pelas nascentes, quando da exfiltração da água subterrânea.

2. Área de Estudo

De acordo com os objetivos propostos no projeto, foram selecionadas duas áreas de investigação na borda oeste da Serra do Espinhaço Meridional: a porção leste do município de Lagoa Santa (Depressão do São Francisco) e a face oeste da Serra do Cipó (Figura 1).

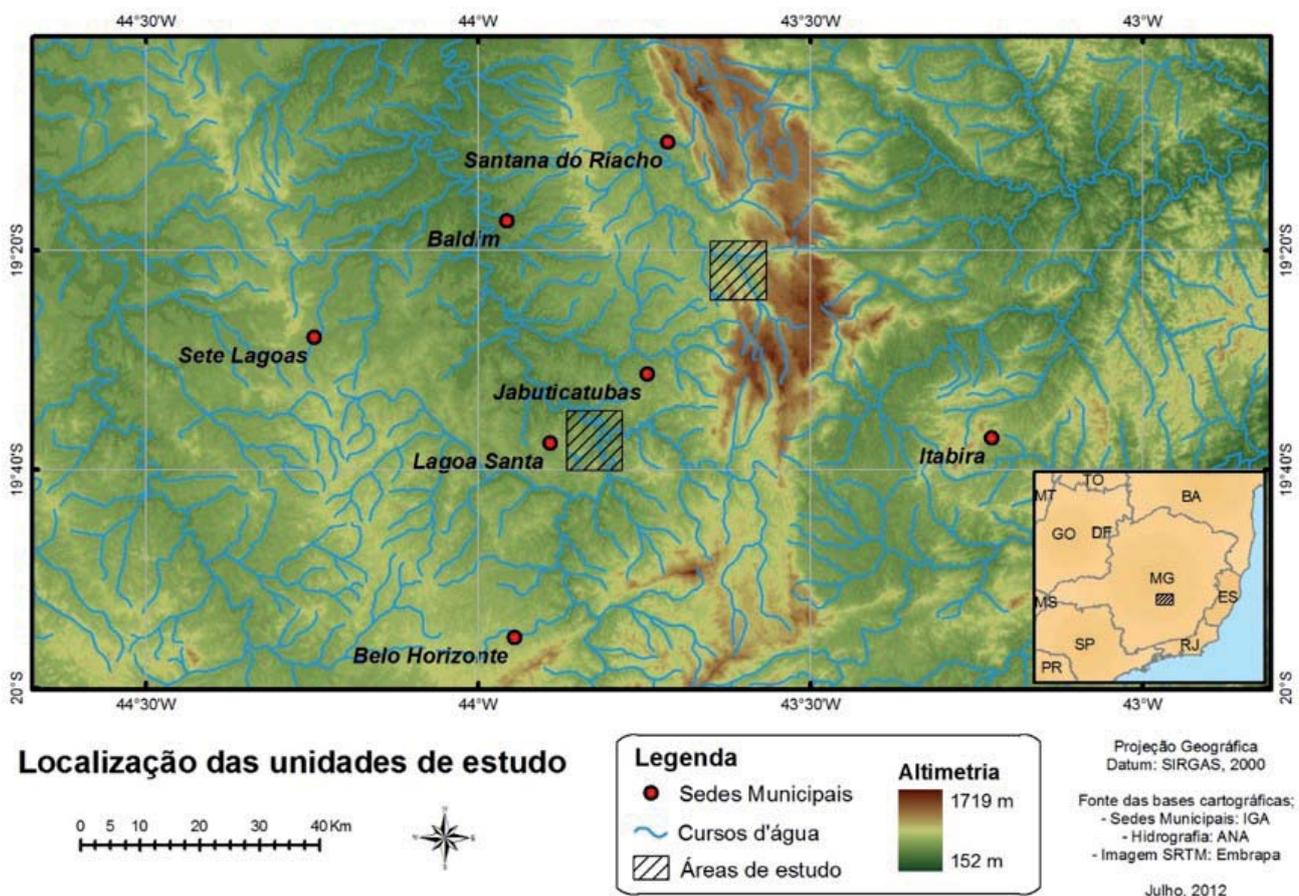


Figura 1 - Localização das unidades de estudo

O quadrante definido como área de estudo em Lagoa Santa (4,1 km x 3,8 km) localiza-se no extremo oeste do município, nas proximidades do rio das Velhas. Possui uma morfologia típica de fundo de depressão, com relevo suave-ondulado entrecortado por uma drenagem dendrítica individualizando colinas e morros com

topos arredondados. A proximidade com o nível de base regional (rio das Velhas) promove bacias de configuração alongada. Os afluentes diretos do rio das Velhas são perenes, porém, a drenagem tributária possui diversos canais temporários e, por vezes, efêmeros, ocorrendo em ravinas e sulcos erosivos. A relação entre o relevo da de-

pressão e a estratigrafia do Grupo Bambuí, referida por Berbert-Born (2002), Shinzato (1998) e Auler (1994) é perfeitamente nítida na área das nascentes estudadas, onde as médias e altas vertentes correspondem à FSH e os fundos de vale à FSL.

Lagoa Santa localiza-se a aproximadamente 40 km ao norte de Belo Horizonte, inserida na Depressão do Alto-Médio São Francisco (IBGE, 2006) e embasada por rochas neoproterozóicas clasto-químicas do Grupo Bambuí (CPRM, 2004). Segundo IBGE (2006), a Depressão do Alto-Médio rio São Francisco configura-se como uma individualização da macrodepressão do São Francisco que se estende a partir do contato com a Depressão de Belo Horizonte (ao sul). O relevo ondulado apresenta gradual suavização em direção à região cárstica de Sete Lagoas.

A Serra do Cipó pode ser considerada uma das subunidades da Serra do Espinhaço Meridional (IBGE, 2006), estendendo-se até o norte de Minas Gerais e sul da Bahia. Esta macrounidade caracteriza-se como uma faixa dobrada mesoproterozoica embasada prioritariamente por rochas metassedimentares do Supergrupo Espinhaço (SAADI, 1995). Possui papel de um divisor hidrográfico, em nível continental, entre as bacias do rio São Francisco e do rio Doce. A área de estudo está inserida na face oeste da Serra do Cipó em contato com a Depressão do São Francisco e as rochas do Grupo Bambuí.

Essas características configuram uma importante diferenciação hidrogeológica entre as unidades de estudo, a qual é essencial para a proposta já que a dinâmica da água subterrânea é um condicionante fundamental das nascentes e da desnudação geoquímica.

A Depressão do Alto-Médio São Francisco coincide com a área de ocorrência do Supergrupo São Francisco. Apresenta rochas sedimentares neoproterozoicas que sofreram anquimetamorfismo durante a estruturação da cadeia do Espinhaço, com aumento progressivo da influência tectônica (dobras) para leste (UHLEIN *et al.*, 1995). No Neoproterozóico, configurou-se a partir de uma bacia sedimentar do tipo de margem passiva, sobreposta à bacia do Espinhaço (SILVA, 1998).

A estratigrafia regional apresenta a Formação Serra de Santa Helena (FSH) como unidade litológica cimeira, em contato concordante gradativo com a Formação Sete Lagoas (FSL). É constituída pelos Membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo, que se postam sobre a

unidade basal do complexo gnáissico-migmatítico arqueano. Berbert-Born (2002, p. 418) sintetiza essa conformação estratigráfica como “unidades carbonáticas composicionalmente diferenciadas (FSL), superpostas por rochas siliciclásticas muito finas (FSH)”.

Do topo para a base, a FSH é constituída por siltitos, folhelhos e margas, com intercalações de calcário. Predominam estruturas sedimentares plano-paralelas, ocorrendo camadas maciças (IGLESIAS e UHLEIN, 2009). Os pelitos registram deformação dúctil-rúptil heterogênea e gradual, ampliando em direção leste (SHINZATO, 1998). Já a FSL apresenta uma composição faciológica mais complexa. Sedimentada em um evento de subsidência do embasamento, possui uma formação basal composta por calcários impuros (por vezes dolomíticos) e silicosos. Predominam calcissiltitos e calcilutitos finamente laminados, com teor de carbonatos inferior a 90% (SHINZATO, 1998; BERBERT-BORN, 2002).

A área de estudo do trabalho correspondente a parte da face oeste da Serra do Cipó. Constitui-se em um retângulo de 4,5 km x 2,7 km que abrange toda a bacia do córrego da Serra, as cabeceiras de um afluente do ribeirão das Areias (bacia do rio Mascote) e pequenas bacias de ambas as margens do rio Cipó que drenam diretamente para o curso principal. As altitudes na área de estudo variam entre 1200 m, na crista ocidental que margeia as bacias do ribeirão das Areias e do Córrego da Serra, e 800 na planície do rio Cipó. O máximo gradiente topográfico encontrado foi de 0,12 m/m, sendo as declividades, de um modo geral, elevadas. As coberturas superficiais são prioritariamente rasas e arenosas, com diversos afloramentos rochosos nas altas-vertentes em áreas de maior declividade.

A Serra do Cipó, distante aproximadamente 100 km da capital mineira, configura-se como um maciço planáltico orientado vulgarmente no sentido NW-SE, esculpido sobre rochas metassedimentares meso e paleoproterozoicas. Sua morfologia configura-se como uma sequência de cristas entrecortadas por vales fluviais dissecados e intercalados com patamares erosivos. Os principais alinhamentos serranos encontram-se na borda leste da Serra do Cipó, configurando o divisor hidrográfico regional entre as bacias do rio Doce (leste) e São Francisco (oeste). Escarpas de falha são coincidentes com as principais frentes de cavalgamento identificadas por Almeida-Abreu (1995), promovendo vales com alto grau de dissecação, dos quais se destaca o do rio

Mascote. A borda do planalto marca escarpas erosivas associadas a diferenças de resistência litológica.

A litoestratigrafia da face oeste da Serra do Cipó apresenta sequências metassedimentares relacionadas aos depósitos glaciogênicos neoproterozóicos do Grupo Macaúbas, predominando metadiamicititos, quartzitos e metassiltitos (ALMEIDA-ABREU e RENGER, 2002), e à bacia sedimentar do Espinhaço, bordejada por clasto-químicas do Grupo Bambuí.

Em contato com os depósitos Macaúbas, ocorre o Grupo Conselheiro Mata, no topo da sequência do Supergrupo Espinhaço. São depósitos marinhos rasos relacionados a variações eustáticas (CHEMALE JR *et al.*, 2011), com profundidades que variam entre 100 e 1000 metros (ALMEIDA-ABREU, 1995). A Formação Galho do Miguel apresenta-se como uma das mais representativas espacialmente na Serra do Cipó. Possui contato em superfície de transgressão com o Grupo Conselheiro Mata denotando, também, controle eustático (CHEMALE JR *et al.*, 2011). Ocorrem quartzitos com elevado grau de pureza de origem eólica. O pacote sedimentar é espesso, podendo atingir 3000 metros de profundidade (ALMEIDA-ABREU, 1995). Essa formação sustenta as cristas no topo orográfico da Serra do Cipó devido ao seu elevado grau de resistência aos processos desnudacionais (SALGADO e VALADÃO, 2003; RESENDE *et al.*, 2010).

3. Procedimentos Metodológicos

A partir da seleção de duas áreas de estudo que apresentassem significativas diferenças em termos de resistência das rochas ao intemperismo, sob um contexto climático de grande similaridade, foram realizados trabalhos de campo exploratórios nos compartimentos com a finalidade de identificar as bacias mais propícias a serem estudadas. Entre julho de 2010 e fevereiro de 2011 foram mapeadas 61 nascentes nas duas unidades.

Dentre essas, foram selecionadas para o monitoramento 11 nascentes em Lagoa Santa e 12 na Serra do Cipó. Em Lagoa Santa, as fontes LS02, LS05, LS06, LS13, LS14, LS15, PV07 e PV11 estão localizadas em terrenos mapeados como pertencentes a FSH; e as nascentes PV03, PV05 e PV14 encontram-se embasadas por rochas da FSL, todas pertencentes ao Grupo Bambuí. Já na Serra do Cipó, duas nascentes estão em

terreno carbonático da FSL, na Depressão do Alto-Médio São Francisco (SC04 e SC23); as demais (SC05, SC10, SC12, SC14, SC18, SC19, SC24, SC27, SC28, SC29) localizam-se nos metadiamicititos e quartzitos do Grupo Macaúbas.

Após a seleção das nascentes a serem monitoradas, iniciou-se a coleta de dados. As informações foram obtidas em trabalhos de campo periódicos durante um ano hidrológico; entre março de 2011 e março de 2012. As características fisográficas e hidrológicas das nascentes foram avaliadas/mensuradas mensalmente, enquanto a coleta de amostras para análises laboratoriais ocorreu semestralmente, nos períodos úmido e seco.

Seguindo a metodologia adotada por Pinto *et al.* (2004) e Felipe e Magalhães Jr. (2009), a vazão das nascentes foi calculada via medidores graduados. Com a utilização de sacos plásticos, a água exfiltrada foi coletada com tempo cronometrado e posteriormente transportada para medidores de volume graduados. A relação entre o volume e o tempo da coleta representa a vazão. Para minimizar os erros, foram realizadas três medições seguidas, sendo a vazão da nascente definida pela média aritmética dos eventos (FELIPPE e MAGALHÃES JR, 2009). As simulações realizadas apresentaram um valor mínimo mensurável de 0,001 L/s para a técnica adotada. Quando a velocidade do fluxo era muito baixa ou quando os fluxos não divergiam após a exfiltração, as vazões não puderam ser mensuradas por limitações técnicas. Adicionalmente, em algumas poucas situações, quando as atividades de campo foram realizadas sob chuva intensa (dezembro 2011), o monitoramento da vazão foi impedido pela ação do escoamento pluvial concentrado. Em todas essas situações as vazões foram consideradas “não mensuráveis” e excluídas dos cálculos realizados.

Neste trabalho, a análise de sólidos totais dissolvidos (TDS) foi realizada pela técnica da somatória de cátions e ânions (Equação 1), comumente adotada em pesquisas que priorizam análises hidrogeoquímicas (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000), conforme apresentam Salgado e Valadão (2003), Salgado *et al.* (2004), Sardinha *et al.* (2012), entre outros. Ciente das eventuais imprecisões da técnica, foi realizada a mensuração de íons secundários e traços além dos tradicionais íons prioritários retratados na literatura, visando a diminuição no risco de subestimação dos resultados. Ademais, os carbonatos foram corrigidos pela massa molecular

para retirar a duplicidade da contabilização do cátion associado. Portanto, com as devidas precauções metodológicas, acredita-se que esta técnica, replicada constantemente nos últimos anos, gera resultados profícuos para a interpretação hidrogeomorfológica das nascentes.

$$\Sigma \text{cátions} + \Sigma \text{ânions} + \Sigma \text{coloides} \approx \text{TDS} \quad (1)$$

A partir do TDS é possível calcular a perda de massa proporcionada pelo esvaziamento geoquímico. Como há uma clara dupla estacionalidade climática, inicialmente utiliza-se a Equação 2 para o cálculo da perda geoquímica sazonal (instantânea). Posteriormente, a Equação 3 leva à perda geoquímica anual (total).

$$\text{PG}_{\text{inst}} = \text{TDS}_{\text{inst}} \cdot \text{Q}_{\text{inst}} \quad (2)$$

$$\text{PG}_{\text{total}} = (\Sigma(\text{TDS}_{\text{inst}})_n) \cdot \text{Q}_m \cdot d \quad (3)$$

Nas equações 2 e 3 PG_{inst} é a perda geoquímica instantânea, TDS_{inst} é a concentração de sólidos totais dissolvidos em uma amostra de água, Q_{inst} é a vazão mensurada no momento da amostragem do referido TDS_{inst} , PG_{total} é o somatório de todas as TDS_{inst} dividido pelo número de mensurações de TDS_{inst} , Q_m é a média das vazões mensuradas e d é o período de monitoramento (para este caso, um ano hidrológico).

A seleção dos parâmetros para análise laboratorial foi realizada respeitando as características hidrogeológicas das unidades de estudo, bem como as recomendações apresentadas por Feitosa e Manoel-Filho (2000), Hindi *et al.* (2003) e Salgado e Valadão (2003). As amostras foram coletadas em agosto de 2011 (representando o período seco) e fevereiro de 2012 (período úmido), sem influência direta das águas pluviais.

Os ensaios de determinação da concentração de fluoreto, cloreto, brometo, nitrito, nitrato, sulfato, sódio, potássio e amônio nas amostras de água das nascentes foram realizados via cromatografia por troca iônica, com limite de quantificação de 0,1 mg/L para ânions e 0,1 mg/L para cátions. Para determinação dos cátions, as amostras foram coletadas e filtradas em campo com o uso de filtros de 0,45 μm e posteriormente acidificadas com HNO_3 concentrado até obter pH final igual ou inferior a dois. O armazenamento foi feito sob refrigeração

em recipientes plásticos de 100 mL, até o envio para o Laboratório de Cromatografia Líquida do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN, Belo Horizonte-MG). A preparação e o armazenamento das amostras para as análises de ânions por cromatografia foram similares às dos cátions, porém sem acidificação.

As concentrações de magnésio, alumínio, cálcio, cromo, ferro total, cobalto, cobre, cádmio, titânio, manganês, níquel, zinco, bário e chumbo foram realizadas pelo método de espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) no Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa (CPMTC) do Instituto de Geociências da UFMG. As amostras foram armazenadas em frascos plásticos de 200 mL com o mesmo preparo citado anteriormente. Em alguns casos foi necessária diluição das amostras em água destilada na proporção de 1:10 v/v.

No Laboratório de Geomorfologia do Instituto de Geociências da UFMG foram realizadas as análises de carbonato e bicarbonato, sílica e condutividade elétrica. O preparo das amostras envolveu a filtragem (filtros de 0,45 μm) e armazenamento sob refrigeração em recipientes plásticos de 200 mL, sem acidificação. Excetuam-se as amostras de condutividade, que não necessitaram de filtração, mas também foram armazenadas em geladeira.

As concentrações de carbonato e bicarbonato foram determinadas por titulação com HCl em titulador automático. As amostras com baixos teores foram reanalisadas manualmente. Os resultados expressam a soma de carbonatos e bicarbonatos.

A determinação da concentração de sílica nas amostras de água foi realizada pela técnica de fotocolorimetria no Fotocolorímetro AT 100PB (Alfakit®). Uma curva de calibração ($R^2 = 0,9996$) foi construída a partir da leitura da absorvância de soluções-padrão de SiO_2 em água, com concentrações entre 0,124 mg/L e 3,100 mg/L. As amostras foram diluídas em água destilada na proporção de 1:10 v/v e os resultados da concentração de sílica foram obtidos em função da curva de calibração obtida.

4. Resultados e Discussões

Apesar da notável sazonalidade climática existente nas áreas de estudo, a variabilidade do TDS entre

o período seco e o período úmido foi baixa (Figura 2). No período seco, quando as nascentes são alimentadas exclusivamente pelo fluxo de base (em tese, com maior tempo de residência) e representam fielmente a geoquímica dos aquíferos, as taxas de TDS oscilaram

entre 12 e 210 mg/L. As águas de menor mineralização relacionam-se a nascentes da Serra do Cipó, embasadas pelo Grupo Macaúbas; por outro lado, todas as águas com TDS acima de 50 mg/L correspondem a nascentes do Grupo Bambuí (Tabela 1).

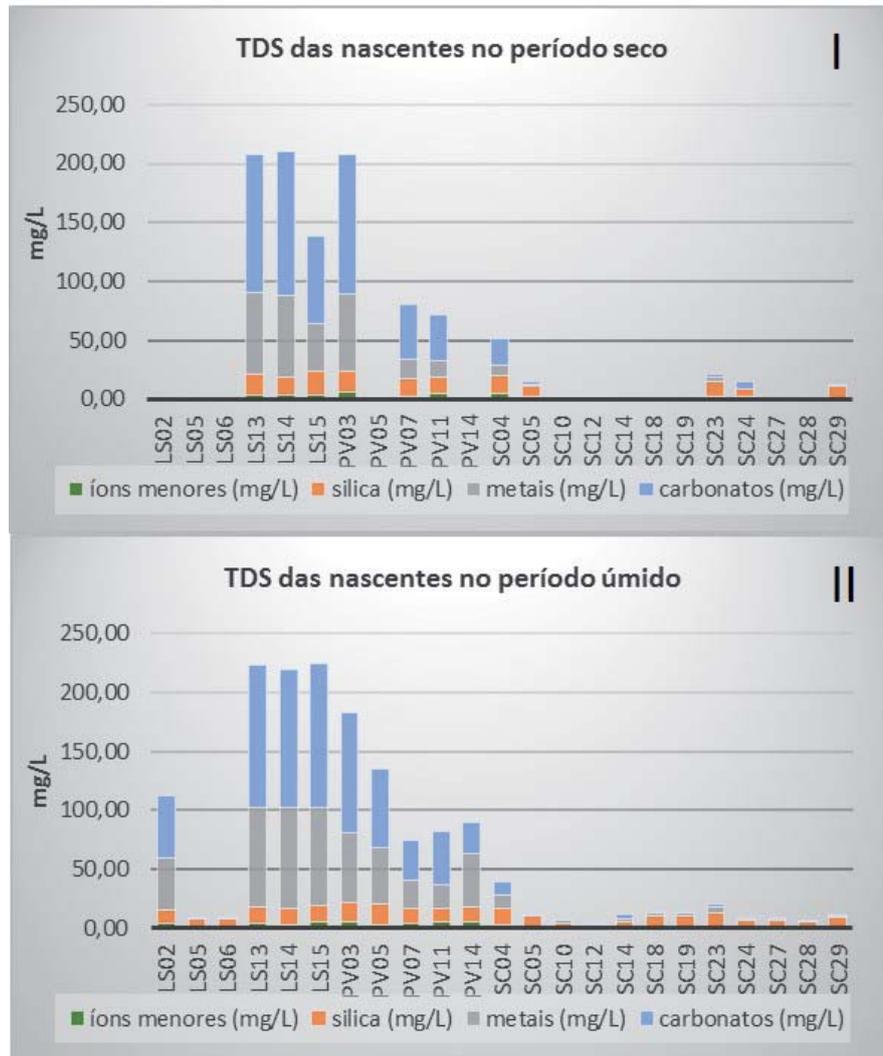


Figura 2 - Gráficos da composição do TDS das nascentes no período seco (i) e no período úmido (ii).

Os elementos que mais contribuem para o TDS das nascentes do Grupo Bambuí são os carbonatos, seguidos pelos metais, com destaque para o cálcio. Nota-se que a calcita, um dos principais minerais encontrados nessa unidade, é quimicamente composta por carbonato de cálcio. Já nas nascentes do Macaúbas, o destaque fica para os teores de sílica (Figura 2). Apesar de apresentarem valores absolutos relativamente baixos (sendo, inclusive, os mais constantes comparando as todas as nascentes), sua participação relativa no TDS

das nascentes do Macaúbas é expressivo.

A mesma tônica é mantida no período úmido. Apesar da mistura com as águas meteóricas, que normalmente apresentam baixa mineralização, as tendências apresentadas no período seco foram mantidas. Isso pode ser explicado pelo fato das nascentes possuírem uma influência da precipitação diferente dos cursos d'água de maiores hierarquias, reduzindo o efeito do escoamento das vertentes e preconizando a parcela percolada.

Tabela 1: Sólidos totais dissolvidos e principais componentes químicos das águas nas nascentes estudadas

Nascente	Período seco					Período úmido				
	íons menores (mg/L)	silica (mg/L)	metais (mg/L)	carbonatos (mg/L)	TDS (mg/L)	íons menores (mg/L)	silica (mg/L)	metais (mg/L)	carbonatos (mg/L)	TDS (mg/L)
LS02	-	-	-	-	-	3,64	12,37	43,12	53,20	112,33
LS05	-	-	-	-	-	1,08	6,76	0,48	0,60	8,92
LS06	-	-	-	-	-	1,47	6,59	1,71	0,70	10,47
LS13	3,10	17,65	70,36	116,51	207,62	3,63	14,36	84,01	121,72	223,72
LS14	3,28	15,50	69,10	122,61	210,49	3,05	13,60	86,27	116,42	219,34
LS15	4,33	18,97	40,25	75,03	138,58	5,79	13,83	82,96	121,24	223,83
PV03	5,87	17,37	66,25	117,73	207,22	5,79	16,01	58,67	102,42	182,89
PV05	-	-	-	-	-	3,27	16,67	48,87	66,48	135,30
PV07	2,55	15,01	16,34	46,36	80,26	3,72	13,39	24,01	33,58	74,70
PV11	4,39	13,83	14,93	39,04	72,19	4,90	11,38	20,25	45,98	82,51
PV14	-	-	-	-	-	5,19	12,67	45,38	26,27	89,50
SC04	4,91	15,10	8,71	22,57	51,29	2,81	13,42	11,86	11,33	39,42
SC05	2,30	9,31	0,31	3,05	14,97	1,76	8,09	2,12	0,85	12,82
SC10	-	-	-	-	-	1,21	3,24	2,29	1,35	8,09
SC12	-	-	-	-	-	1,11	1,40	1,01	0,60	4,12
SC14	-	-	-	-	-	1,35	3,52	3,56	3,57	12,00
SC18	-	-	-	-	-	1,97	8,63	2,46	0,60	13,66
SC19	-	-	-	-	-	2,25	8,39	2,50	0,60	13,74
SC23	2,15	12,90	3,47	3,05	21,57	1,42	11,39	5,34	2,84	20,99
SC24	2,36	6,60	0,30	6,10	15,36	1,67	5,08	0,88	0,60	8,23
SC27	-	-	-	-	-	2,23	4,86	1,05	0,60	8,74
SC28	-	-	-	-	-	1,24	4,26	0,31	0,60	6,41
SC29	1,41	9,68	0,35	0,60	12,04	1,51	7,17	2,11	0,60	11,39

Obs: 1 - Amostras coletadas em ago-11 (inverno) e fev-12 (verão). 2 - Lacunas indicam que a nascente estava seca no momento da coleta ou que não houve possibilidade de realizar a coleta sem contaminação da amostra. Fonte: análises laboratoriais e dados de campo.

Novamente, todas as águas com TDS acima de 50 mg/L referem-se a nascentes situadas no Grupo Bambuí, o que implica em alto teor de carbonatos e cálcio. As nascentes do Macaúbas registraram TDS invariavelmente inferior a 15 mg/L, tendo a sílica como principal componente (Tabela 1). Todavia, os relativamente baixos valores de TDS encontrados nas nascentes da Serra do Cipó são, por outro lado, mais elevados do que os registrados em trabalhos anteriores sobre a Serra do Espinhaço (LEÃO *et al.*, 2012).

Contudo, duas nascentes (LS05 e LS06) localizadas em rochas do Grupo Bambuí apresentaram TDS muito baixo, com taxas de carbonatos praticamente nulas e maior destaque para os teores de sílica. Tais nascentes são intermitentes, o que leva a crer que são alimentadas por aquíferos suspensos nas coberturas pedológicas que, por corresponderem a latossolos, já são

excessivamente lixiviadas e com baixas concentrações de minerais primários (predominância de óxidos).

Estes resultados já eram esperados devido à maior propensão ao intemperismo químico (sobretudo a dissolução) das rochas carbonáticas. Isso é comprovado pelas características da carga química. Os principais componentes da mineralização das águas das nascentes do Grupo Bambuí são os carbonatos, enquanto no Macaúbas a sílica é predominante. Dada a eletronegatividade e à afinidade geoquímica dos elementos, carbonatos e metais alcalinos são muito mais facilmente lixiviados do que a sílica. Já nos quartzitos os carbonatos, metais alcalinos e a sílica amorfa são praticamente inexistentes, ocorrendo somente óxidos e, evidentemente, a própria sílica na forma de quartzo. Por esse motivo o esvaziamento geoquímico desses terrenos é significativamente mais lento.

Interpretando os resultados de TDS à luz da sazonalidade, houve uma pequena diminuição média de 2% das nascentes perenes. Sete das onze nascentes que tiveram os dados aferidos em ambas as estações climáticas apresentaram diminuição da carga dissolvida, com destaque para SC04 (-23%) e SC24 (-46%). As quatro nascentes que aumentaram o TDS no período úmido situam-se em rochas carbonáticas de Lagoa Santa. Esse acréscimo, porém, foi muito sutil, exceto para LS15 que registrou expressivo aumento de carga química da ordem de 61%.

Trabalhos anteriores (LEÃO *et al.*, 2012; SARDINHA *et al.*, 2012; REZENDE *et al.*, 2010; SALGADO *et al.*, 2004) já demonstraram o efeito de diluição das águas meteóricas nas águas fluviais, gerando menores valores de TDS no período úmido, conforme encontrado nas nascentes da Serra do Cipó. Fogem à regra LS13, LS14, LS15 e PV11, pois devido ao aumento do teor de metais (principalmente cálcio) e de carbonatos, tiveram TDS maior no período úmido do que no seco. A alta solubilidade da calcita em águas ácidas com temperaturas elevadas pode explicar esse fenômeno.

Conforme apresentado na Equação 2, a perda geoquímica instantânea (PGinst) é obtida pela ponderação do TDS pela vazão. Esse pressuposto reflete a quantidade de carga em solução transportada por unidade de tempo, portanto, difere da desnudação por não considerar a área da bacia de contribuição. Todavia, para estudos de nascentes, nas quais a drenagem fluvial é iniciada, tal variável é indiferente, pois toda a contribuição hidrológica vem do meio subterrâneo. Por esse motivo, as nascentes emergem como elementos-chave na interpretação da parcela subterrânea da desnudação geoquímica.

Nota-se que, mesmo em nascentes com altas taxas de TDS, os valores absolutos de PGinst são consideravelmente baixos (Tabela 2) quando comparados com estudos similares para cursos d'água (REZENDE *et al.*, 2010; SALGADO *et al.*, 2004). Isso ocorre devido às vazões dessas nascentes serem da ordem de algumas dezenas de mililitros por segundo (salvo algumas exceções).

No período seco, a PGinst das nascentes ficou, de um modo geral, abaixo de 1 mg/s. As nascentes PV07 e SC29 destacam-se com valores superiores a 2 mg/s. Todavia, chama atenção o expressivo resultado de PV03, que devido a sua elevada mineralização, associada a

uma das vazões de nascentes mais altas já registradas na literatura científica brasileira, registrou um PGinst no período seco de 906 mg/s.

Com o aumento das vazões decorrente das chuvas sazonais, praticamente todas as nascentes registraram aumento da PGinst no período úmido (Tabela 2). Dentre as perenes, a variação média foi da ordem de 360%, com destaque para LS15, que registrou um aumento de praticamente três vezes devido a elevações significativas no TDS e na vazão durante o período chuvoso. Também nesse período, as mais altas taxas de PGinst foram registradas pelas nascentes PV07 e SC29. Além dessas, PV05 apresentou elevada PGinst durante a estação chuvosa, cabendo destacar que é uma nascente intermitente. Evidentemente que a PV03 aparece, novamente, fora de qualquer parâmetro de comparação dentro do rol analisado, apresentando PGinst de 960 mg/s no período úmido. Por outro lado, valores expressivamente baixos foram encontrados nas nascentes LS06, SC12 e SC28, todas intermitentes.

Nesse panorama, a maior parte das nascentes apresentou perda geoquímica anual da ordem de algumas dezenas de quilogramas por ano (Tabela 2). Novamente em destaque, PV03 registrou um esvaziamento químico superior a 45 ton/ano, patamar este correspondente ao de canais de maior hierarquia mensurados em estudos anteriores. LS15, PV05, PV07, PV11 e SC29 formam o grupo das nascentes de maior perda geoquímica (excluindo-se da comparação PV03), com valores acima de 100 kg/ano. As nascentes intermitentes, justamente por passarem parte significativa do ano sem drenar, foram as que de um modo geral registraram as menores taxas de perda geoquímica, com destaque para LS06, PV14, SC12, SC18 e SC27, todas com valores inferiores a 10 kg/ano.

Considerando a densidade média das rochas carbonáticas ($2,5\text{g/cm}^3$), os valores de perda geoquímica obtidos resultam em volumes de material desnudado da ordem de $0,04\text{ m}^3$ para PV05, PV07 e PV11 (Tabela 2). Para PV03, no entanto, esse valor alcançou 18 m^3 . Para nascentes no Grupo Macaúbas (densidade média dos quartzitos considerada $2,7\text{ g/cm}^3$), essas taxas somente superam $0,01\text{ m}^3$ em SC19 e SC24, além de SC29 que registra o maior volume para esse grupo ($0,06\text{ m}^3$).

Em síntese, as taxas de TDS e perda geoquímica das nascentes em aquíferos carbonáticos, conforme esperado, foram consideravelmente superiores às situadas

Tabela 2: Perda geoquímica instantânea e anual nas nascentes estudadas

Nascente	Período seco			Período úmido			Anual			
	TDS (mg/L)	Vazão (L/s)	Perda geoquímica (mg/s)	TDS (mg/L)	Vazão (L/s)	Perda geoquímica (mg/s)	TDS médio (mg/L)	Vazão média (L/s)	Perda geoquímica (kg/y)	Volume retirado (m³)
LS02	-	0,002	-	112,33	0,003	0,32	112,33	0,003	10,44	0,004
LS05	0,00	0,000	0,00	8,92	0,130	1,16	4,46	0,050	6,98	0,003
LS06	0,00	0,000	0,00	10,47	0,008	0,08	5,23	0,011	1,87	0,001
LS13	207,62	0,004	0,83	223,72	0,008	1,80	215,67	0,010	66,58	0,027
LS14	210,49	0,004	0,76	219,34	0,006	1,29	214,92	0,005	32,65	0,013
LS15	138,58	0,005	0,64	223,83	0,084	18,74	181,20	0,026	149,03	0,060
PV03	207,22	4,372	906,02	182,89	5,250	960,17	195,05	7,366	45.342,40	18,137
PV05	-	0,007	-	135,30	0,024	3,22	135,30	0,026	110,92	0,044
PV07	80,26	0,032	2,59	74,70	0,053	3,94	77,48	0,048	117,77	0,047
PV11	72,19	0,009	0,68	82,51	0,020	1,67	77,35	0,041	100,93	0,040
PV14	0,00	0,000	0,00	89,50	0,011	1,01	44,75	0,003	3,55	0,001
SC04	51,29	0,004	0,23	39,42	0,005	0,21	45,35	0,023	32,45	0,013
SC05	14,97	0,011	0,16	12,82	0,063	0,80	13,89	0,041	17,94	0,007
SC10	0,00	0,000	0,00	8,09	0,043	0,35	4,05	0,103	13,14	0,005
SC12	0,00	0,000	0,00	4,12	0,016	0,07	2,06	0,029	1,88	0,001
SC14	0,00	0,000	0,00	12,00	0,068	0,82	6,00	0,065	12,33	0,005
SC18	0,00	0,000	0,00	13,66	0,018	0,25	6,83	0,018	3,97	0,001
SC19	0,00	0,000	0,00	13,74	0,046	0,63	6,87	0,078	16,83	0,006
SC23	21,57	0,024	0,51	20,99	0,048	1,00	21,28	0,111	74,71	0,030
SC24	15,36	0,010	0,16	8,23	0,063	0,52	11,80	0,126	46,97	0,017
SC27	-	0,029	-	8,74	0,083	0,72	8,74	0,034	9,35	0,003
SC28	0,00	0,000	0,00	6,41	0,009	0,06	3,21	0,128	12,93	0,005
SC29	12,04	0,179	2,16	11,39	0,258	2,94	11,71	0,434	160,61	0,059

Obs: 1 - Amostras coletadas em ago-11 (inverno) e fev-12 (verão). 2 - Lacunas indicam que a nascente estava seca no momento da coleta ou que não houve possibilidade de realizar a coleta sem contaminação da amostra. 3- TDS médio refere-se à média aritmética entre TDS do período seco e do período úmido. 4- Vazão média refere-se à média do monitoramento mensal das nascentes durante um ano hidrológico (mar-11 a fev/12). Fonte: análises laboratoriais e dados de campo.

em rochas siliciclásticas (Tabela 3). Essa mesma tônica é mantida ao se comparar o agrupamento das nascentes por unidades geomorfológicas, com ligeira variação nos valores absolutos. Evidentemente, os valores apresentados na tabela 3 estão enviesados por PV03, que apresentou resultados incomparáveis dentro do rol. Todavia, ainda que ela fosse retirada da estatística, apesar de significativa queda dos valores absolutos, as conclusões seriam as mesmas.

Esses resultados comprovam a desnudação geoquímica diferencial da borda oeste da Serra do Espinhaço meridional proposta em trabalhos anteriores. Porém, clarificam de modo inédito a importância das nascentes nesse processo. Os volumes retirados são oriundos exclusivamente de fluxos subterrâneos (locais ou regionais), evidenciando que os processos desnudacionais não podem ser resumidos à sua parcela superficial.

Conclusões

Os resultados obtidos para o TDS da água das nascentes na borda oeste do Espinhaço Meridional apontaram uma grande variabilidade. A média anual de solutos alcançou mais de 200 mg/L em algumas nascentes e menos de 10 mg/L em outras. Comparativamente, esses resultados foram ligeiramente superiores aos encontrados na literatura para águas superficiais dos mesmos compartimentos geológico-geomorfológicos. Foi possível associar os valores de TDS com os aquíferos de origem da água das nascentes, uma vez que estando em contato com materiais mais solúveis por maior tempo, a água tende a um maior enriquecimento químico. Portanto, diferenciou-se com muita clareza as nascentes associadas a aquíferos carbonáticos (elevado TDS) daquelas associadas a coberturas siliciclásticas (baixo TDS).

Tabela 3: Média de TDS e Perda Geoquímica pela localização e unidade geológica das nascentes

Período	Parâmetros	Rol completo	Un. Geomorfológica		Un. Geológica	
			Dep. São Francisco	Serra do Cipó	Gr. Bambuí	Gr. Macaúbas
Seco	íons menores (mg/L)	3,33	3,92	2,63	3,82	2,02
	silica (mg/L)	13,81	16,39	10,72	15,79	8,53
	metais (mg/L)	26,40	46,20	2,63	36,18	0,32
	carbonatos (mg/L)	50,24	86,21	7,07	67,86	3,25
	TDS (mg/L)	93,78	152,73	23,05	123,65	14,12
	Vazão (L/s)	0,20	0,40	0,02	0,34	0,02
	Perda geoquímica média (mg/s)	83,16	151,92	0,64	114,03	0,83
	Perda geoquímica total (mg/s)	914,75	911,53	3,22	912,28	2,48
Úmido	íons menores (mg/L)	2,70	3,78	1,71	3,52	1,63
	silica (mg/L)	9,44	12,51	6,62	12,50	5,46
	metais (mg/L)	23,10	45,07	2,96	39,45	1,83
	carbonatos (mg/L)	30,99	62,60	2,01	54,06	1,00
	TDS (mg/L)	66,22	123,95	13,30	109,53	9,92
	Vazão (L/s)	0,27	0,51	0,06	0,43	0,07
	Perda geoquímica média (mg/s)	43,56	90,31	0,70	76,51	0,72
	Perda geoquímica total (mg/s)	1001,78	993,40	8,37	994,62	7,16
Anual	TDS (mg/L)	61,11	114,89	11,82	99,76	10,87
	Perda geoquímica média (kg/y)	2.015,05	4.176,65	33,59	3.543,45	28,14
	Perda geoquímica total (kg/y)	46.346,20	45.943,11	403,09	46.064,79	281,42
	Volume retirado total (m³)	18,530	18,377	403,089	18,425	0,105

Fonte: dados laboratoriais e de campo

Também se pode confirmar o papel das nascentes como importantes veículos de desnudação geoquímica e, conseqüentemente, de atuação geomorfológica. A carga química dissolvida associada à vazão das nascentes permite interpretar a quantidade de material retirado em dado intervalo de tempo. Apesar das baixas vazões em relação aos cursos fluviais de maior ordem, o grau de mineralização das águas nas nascentes tende a ser maior. Neste sentido, as taxas de perda geoquímica nas nascentes foram relativamente altas, variando de 10 kg/ano ao máximo de 45 ton/ano. É, portanto, expressivo o volume de material rochoso retirado em solução nas águas das nascentes.

Esses valores realçam o papel das nascentes na evolução do relevo regional a partir da desnudação geoquímica, porém, já apontam para uma conjuntura de fatores que envolvem as características dos aquíferos, o tempo de residência da água (que controlam o TDS) e seu potencial hidrodinâmico, bem como a hidrogeomorfologia das bacias de contribuição (que controlam a vazão).

Por fim, reitera-se que complexidade inerente aos

processos de desnudação geoquímica exige que pesquisas futuras busquem desvendar as contribuições da parcela subterrânea no remodelamento do relevo. Este trabalho demonstrou que a partir do processo de exfiltração, quando as águas subterrâneas transformam-se em fluviais, uma carga geoquímica considerável já está presente nos fluxos. Porém, ainda é obscura a real contribuição dessa parcela para a desnudação total de uma bacia hidrográfica. Espera-se, com a abertura dessa nova perspectiva, que estudos futuros sejam incentivados, na busca por uma melhor compreensão dos mecanismos da desnudação geoquímica no meio subterrâneo.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA-ABREU, P. A. O supergrupo Espinhaço da Serra do Espinhaço meridional (Minas Gerais): o rifte, a bacia e o orógeno. **Geonomos**, v. 3, n. 1, p. 1-18, 1995.
- ALMEIDA-ABREU, P. A.; RENGGER, F. E. Serra do Espinhaço meridional: um orógeno de colisão do mesoproterozóico. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n.1, p. 1-14, mar 2002.
- ANDERSON, S. P.; DIETRICH, W. E.; BRIMHALL-JR., G. H.

- Weathering profiles, mass-balance analysis, and rates of solute loss: Linkage between weathering and erosion in a small, steep catchment. **GSA Bulletin**, v. 114, n. 9, p. 1143-1158, 2002.
- ANDERSON, S. P.; DIETRICH, W. E.; TORRES, R.; MONTGOMERY, D. R.; LOAGUE, K. A case for geochemical control of concentration-discharge relationships. **Chemical Geology**, 107: 369-371, 1993.
- AULER, A. S. **Hydrogeological and hydrochemical characterization of the Matozinhos - Pedro Leopoldo Karst, Brazil**. [Kentucky]: [s.n.], 1994, 110 p. Dissertação (mestrado). Western Kentucky University/Dept of Geography and Geology.
- BERBERT-BORN, M. Carste de Lagoa Santa, MG - Berço da paleontologia e da espeleologia brasileira. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; QUEIROZ, E. T.; WINGE, M.; BERBERT-BORN, M. L. C. (ed.) **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. 1. ed. Brasília: DNPM/CPRM, 2002, v.01, 415-430.
- BEYLICH, A. A.; KOLSTRUP, E.; THYRSTED, T.; GINTZ, D. Water chemistry and its diversity in relation to local factors in the Latnjavagge drainage basin, arctic-oceanic Swedish Lapland. **Geomorphology**, n.58, p. 125-143, 2004.
- BEYLICH, A. A.; LAUTE, K. Spatial variations of surface water chemistry and chemical denudation in the Erdalen drainage basin, Nordfjord, western Norway. **Geomorphology**, Special Issue. n. 167-168, p.77-90, 2012.
- CHEMALE JR, F.; DUSSIN, I. A.; MARTINS, M.; SANTOS, M. N. Nova abordagem tectono-estratigráfica do Supergrupo Espinhaço em sua porção meridional (MG). **Geonomos**, v. 19, n. 2, p. 173-41, 2011.
- CHEREM L. F.; VARAJÃO, C. A. C.; BRAUCHER, R.; BOURLÈS, D.; SALGADO, A. A. R.; VARAJÃO, A. F. D. Long-term evolution of denudational escarpments in southeastern Brazil. **Geomorphology** (Amsterdam), v. 173, n.1. p. 118-127, 2012.
- CLEARY, R. W. Águas **Subterrâneas**. [s.l.]: Princeton Groundwater; Clean Environment Brasil; ABRH, 1989.
- CPRM. **Mapa geológico do Brasil ao Milionésimo**. Rio de Janeiro: CPRM, 2004.
- DOUGLAS, I. The efficiency of humid tropical denudation systems. **Transactions of the Institute of British Geographers**, p. 1-16, 1969.
- EDMOND, J. M; PALMER, M. R; MEASURES, C. I; GRANT, B.; STALLARD, R. F. The fluvial geochemistry and denudation rate of the Guayana Shhield in Venezuela, Colombia, and Brazil. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 59, n.16. p. 3.301-3.325, 1995.
- FEITOSA, A. C.; MANOEL-FILHO, J. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 2000.
- FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES Jr, A. P. Análise da variabilidade da vazão das nascentes no Parque das Mangabeiras (Belo Horizonte-MG) em relação aos seus condicionantes ambientais. In: XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2009, Viçosa-MG, Brasil. **Anais do....** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2009.
- FELIPPE, Miguel. F. ; MAGALHAES JR., A. P. . Conflitos conceituais sobre nascentes de cursos d'água e propostas de especialistas. **Geografias (UFMG)**, v. 9, p. 70-81, 2013.
- FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1994.
- HINDI, E.; ROSA-FILHO, E.; BITTENCOUT, A.; XAVIER, J. Características hidrogeológicas do aquífero costeiro da Ilha dos Valadares, PR (Brasil) e sua utilização para abastecimento público. **Revista Latino-Americana de Hidrogeologia**, n.3, p. 19-31, 2003.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de unidades de relevo do Brasil**. Escala 1:5.000.000. IBGE, 2006.
- IGLESIAS, M.; UHLEIN, A. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39, n. 2, p. 256-266, jun 2009.
- KIRCHNER, J. W.; RIEBE, C. S.; FERRIER, K. L.; FINKEL, R. C. Cosmogenic nuclide methods for measuring long-term rates of physical erosion and chemical weathering. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 88, n. 1-3, p. 296-299, 2006.
- LEÃO, M. R.; REZENDE, E. A.; SALGADO, A. A.; NAILINI JUNIOR, H. A. Erosão, denudação e evolução do relevo da média Serra do Espinhaço meridional, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.13, n.2, (Abr-Jun) p.113-124, 2012.
- LECOMTE, K.L.; GARCÍA, M.G.; FÓRMICA, S.M.; DEPETRIS, P.J. Influence of geomorphological variables on mountainous stream water chemistry (Sierras Pampeanas, Córdoba, Argentina). **Geomorphology** n.110, p.195-202, 2009.
- LOUVAT, P.; ALLÈGRE, C. J. Present denudation rates on the island of Reunion determined by river geochemistry: basalt weathering and mass budget between chemical and mechanical erosions. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 61, n. 17, p.

3645-3669, 1997.

LUIZ-SILVA, W.; MATOS, R. H. R.; MACHADO, W.; NIZOLI, É. C. Taxas de sedimentação em estuário do sudeste do Brasil, baseadas em assinatura geoquímica e histórico industrial. **Geociências**. (São Paulo), São Paulo, v. 31, n. 1, 2012.

MORAES, J. A. P. **Teoria elementar do movimento das águas subterrâneas**. [s.l.]: [s.n.], 1982.

PINTO, L. V. A.; BOTELHO, S. A.; DAVIDE, A. C.; FERREIRA, E. Estudo das nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG. **Scientia Forestalis**. Nº 65. p. 197-206. jun. 2004.

REZENDE, E. A.; LEÃO, M. R.; SALGADO, A. A. R.; OLIVEIRA, C. K. R.; NALINI JUNIOR, H. A. A influência litológica nas taxas de denudação geoquímica do médio Espinhaço Meridional - MG. **Sociedade & Natureza** (UFU. Impresso), v. 22, p. 503-514, 2010.

SAADI, A. A geomorfologia da Serra do Espinhaço em Minas Gerais e de suas margens. **Geonomos**, v. 3, n. 1, p. 41-63, 1995.

SALGADO, A. A. R.; VARAJÃO, C. A. C.; COLIN, F.; BRAUCHER, R.; NALINI JUNIOR, H. A.; VARAJÃO, A. F. D. O papel da denudação geoquímica no processo de erosão diferencial no Quadrilátero Ferrífero/MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 1, p. 55-69, 2004.

SALGADO, A. A.; VALADÃO, R. C. Contribuição da Desnudação Geoquímica na Evolução da Erosão Diferencial no Espinhaço Meridional – MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 4, n.2, p. 31-40, 2003.

SARDINHA, D. S.; BONOTTO, D. N.; GODOY, L. H.; CONCEIÇÃO, F. T.; MORENO, M. M. T. Denudação química e implicações na composição das águas superficiais da bacia do rio Jaú (SP). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.13, n.3, p.337-349, 2012.

SCHMIDT, K.; MORCHE, D. Sediment output and effective discharge in two small high mountain catchments in the Bavarian Alps, Germany. **Geomorphology**, v. 80, n. 1, p. 131-145, 2006.

SHINZATO, E. **O carste da área de proteção ambiental de**

Lagoa Santa (MG) e sua influência na formação dos solos. 1998. 99 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 1998.

SILVA, R. R. As bacias proterozóicas do Espinhaço e São Francisco em Minas Gerais: uma abordagem do ponto de vista da estratigrafia de seqüências. **Geonomos**, v. 6, n. 1, p. 1-12, 1998.

SMITH, C. L.; DREVER, J. I. Controls on the chemistry of springs at Teels Marsh, Mineral County, Nevada. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 40, n. 9, p. 1081-1093, 1976.

SPRINGER, A. E.; STEVENS, L. E. Spheres of discharge of springs. **Hydrogeology Journal**, v. 17, p. 83-93, 2009.

SUMMERFIELD, M. A. **Global geomorphology: an introduction to the study of landforms**. New York: Longman Scientific & Technical, 1991.

THOMAS, M. F. **Geomorphology in the tropics: a study of weathering and denudation in low latitudes**. Chichester: John Wiley & Sons, 1994.

ULHEIN, A.; TROMPETTE, R.; EGYDIO-SILVA, M. Rifteamentos superpostos e tectônica de inversão na borda sudeste do cráton do São Francisco. **Geonomos**, v. 3, n. 1, p. 99-107, 1995.

VALADÃO, R. C.; **Evolução de longo-termo do relevo do Brasil oriental: desnudação, superfícies de aplanamento e soerguimentos crustais**. Tese (doutorado) - Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, 1998.

WHITE, A. F.; BLUM, A. E.; SCHULZ, M. S.; VIVIT, D. V.; STONESTROM, D. A.; LARSEN, M.; MURPHY, S.; EBERL, D. Chemical weathering in a tropical watershed, Luquillo Mountains, Puerto Rico: I. Long-term versus short-term weathering fluxes. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 62, n. 2, p. 209-226, 1998.

ZHU, B.; YU, J.; QIN, X.; RIOUAL, P.; XIONG, H. Climatic and geological factors contributing to the natural water chemistry in an arid environment from watersheds in northern Xinjiang, China. **Geomorphology** n. 153-154 p. 102-114, 2012.