



www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 16, nº 2 (2015)



SISTEMAS AQUÍFEROS DE ORIGEM DE NASCENTES EM LAGOA SANTA E SERRA DO CIPÓ (MG)

AQUIFER SYSTEMS OF SPRINGS IN LAGOA SANTA AND SERRA DO CIPO (MG)

Miguel Fernandes Felipe

*Departamento de Geociências, Universidade Federal de Juiz de Fora
Rua José Lourenço Kelmer, s/n, Juiz de Fora, Minas Gerais, CEP: 36036-900, Brasil
E-mail: miguel.felippe@ufjf.edu.br*

Antônio Pereira Magalhães Júnior

*Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 31270-901, Brasil
E-mail: magalhaesufmg@yahoo.com.br*

Bruno Resende Debien

*Centro de Microscopia, Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 31270-901, Brasil
E-mail: brunordebien@gmail.com*

Lúcia Maria Laboissière de Alencar Auler

*Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Comissão Nacional de Energia Nuclear
Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, Minas Gerais, CEP 31270-901, Brasil
E-mail: aulerlm@cdtn.br*

Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:
06/04/2015
Data de Aprovação:
22/05/2015

Palavras-chave:

Nascente; Hidrogeoquímica;
Hidrogeomorfologia.

Keywords:

Springs; Hydrogeochemistry;
Hydrogeomorphology.

Resumo:

A origem das nascentes, suas águas e processos formadores, é um tema ainda pouco discutido nas ciências ambientais. Os processos geomorfológicos que provêm a exfiltração da água e criam as nascentes são complexos e dependem essencialmente de aspectos hidrogeológicos, climáticos e humanos. Por esse motivo, nas pesquisas em geomorfologia, os aquíferos de origem das nascentes vêm sendo tratados de forma errônea, basicamente por identificação em mapeamentos regionais. Com isso, as múltiplas possibilidades de caminhos e processos da água subterrânea são negligenciadas, ocultando a riqueza de características e dinâmicas das nascentes. Esse trabalho identifica os sistemas aquíferos de origem de nascentes em dois diferentes contextos geológico-geomorfológicos: a depressão carbonática do São Francisco e o planalto metassedimentar da Serra do Cipó. Os resultados mostram que apesar da relativa homogeneidade geológica dos mapeamentos regionais, cinco sistemas aquíferos puderam ser identificados, incluindo um de mistura das águas provenientes dos dois grandes contextos hidrogeológicos. Nesses cinco sistemas, oito subsistemas foram separados por diferenças hidrogeoquímicas

secundárias. Os dados confirmam a tese da importância das coberturas pedológicas controlando a mineralização da água e apontam para uma complexidade ainda pouco explorada de interação entre água meteórica, superficial, subsuperficial e subterrânea.

Abstract:

The origin of river springs is an unclosed issue on the environmental sciences. The geomorphological processes that promote the exfiltration of water and create a spring are complexes and depend on hydrogeological, climatic and human aspects. That is why, in geomorphology, the aquifer systems that originate springs have been treated incorrectly, mostly identified by regional mapping. The multiple possibilities of underground water paths and processes have been neglected, hiding a richness of characteristics and dynamics of the river springs. This work identifies the aquifer systems of springs in two different geological-geomorphological contexts: the carbonate São Francisco depression, and the metasedimentary plateau of Serra do Cipó; both in humid tropical climate. The results show that despite of the relative homogeneous geological mapping, five aquifer systems are identified, including a mixing water from the two great hydrogeological contexts. In these five systems, eight subsystems are noticed by minor hydrogeochemical differences. The data confirmed the importance of pedologic covers controlling the mineralization of water and demonstrated the complex interaction between meteoric, superficial, subsuperficial, and underground water.

1. Introdução

Uma nascente pode ser compreendida como “um sistema ambiental em que o afloramento da água subterrânea ocorre naturalmente de modo temporário ou perene, e cujos fluxos na fase superficial são integrados à rede de drenagem” (FELIPPE e MAGALHÃES JR., 2013, p. 79). São ambientes singulares e heterogêneos dotados de uma notável importância geomorfológica, hidrológica, ecológica e social, caracterizando-se pela passagem da água do meio subterrâneo para o superficial (SPRINGER e STEVENS, 2009).

Historicamente, os principais estudos relacionados à compreensão das nascentes e suas águas residem na hidrologia e na geologia, buscando compreender as características de dinâmica (fluxo e sazonalidade) e a composição hidrogeoquímica (aquíferos de origem) das águas em diversos tipos de surgências. Nesse contexto, destacam-se os trabalhos de Perrault (1967; original de 1674) que investigou as primeiras relações matemáticas entre as variáveis hidrológicas, Clarke (1924), Meinzer (1927) e Stiny (1933), pioneiros na sistematização de características das águas que emergem em nascentes.

Na geografia, poucos são os trabalhos que possuem as nascentes como foco de estudo, destacando-se aqueles de caráter geomorfológico (FARIA, 1997; FARIA, 2000; FELIPPE, 2009; FELIPPE *et al.*, 2013; FELIPPE e MAGALHÃES JR, 2013; FELIPPE e MAGALHÃES JR, 2014) e ambiental (PINTO *et al.*,

2004; GOMES *et al.*, 2005; FELIPPE e MAGALHÃES JR, 2012; CARMO *et al.* 2014). Porém, diversas lacunas ainda não exploradas podem ser elucidadas sob um olhar transversal, na interface entre a geografia, a hidrologia e a geologia.

As nascentes cumprem importante função ambiental ao promover o contato das águas subterrâneas com as superficiais através do processo de exfiltração. Todavia, isso gera certa complexidade, uma vez que as águas das nascentes encontram-se na superfície, mas ainda possuem características de águas subterrâneas logo após a exfiltração.

A água que emerge nas nascentes possui uma história de interação química com a atmosfera, os solos e as rochas, incorporando a partir dos processos de dissolução, hidratação e hidrólise, uma variedade de substâncias moleculares e, principalmente, iônicas (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000). Essa história de trocas químicas realizadas pela água das nascentes pode ser interpretada a partir de sua assinatura geoquímica.

Dentre os meios onde a água circula (subterrâneo, superficial e atmosférico), a maior contribuição para o enriquecimento químico das águas provém de sua fase subterrânea, exceto em casos de contaminação antrópica. A interação água-rocha promove, então, a transferência de material, destacando-se os processos de intemperismo e lixiviação na produção e movimentação dessas substâncias, respectivamente. Assim, quanto maior o tempo de residência da água maior tende a ser a sua mineralização

(CUSTODIO e LLAMAS, 1976; ALBARÈDE, 2011).

As principais substâncias encontradas nas águas naturais estão na forma iônica. Dentre essas, sete se destacam como responsáveis por quase a totalidade da carga dissolvida: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- , e Cl^- (CUSTODIO e LLAMAS, 1976). Além desses elementos mais solúveis, outros merecem destaque: Fe^{3+} , Al^{3+} , CO_3^{2-} , NO_3^- (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000). Outros elementos ainda podem ser encontrados em nível traço na água natural e suas concentrações podem ser importantes em estudos verticalizados. Dentre esses, destacam-se: B^{3+} , Br , PO_4^{3-} , Mn^{2+} , Zn^{2+} e Cu^+ (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000).

O aquífero de origem das águas de cada nascente pode ser apreendido a partir de suas características físico-químicas, uma vez que diferentes tipos de rocha, sob distintas condições ambientais, resultam em interações diversas com a água (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000). Mesmo com acesso a mapas geológicos (litológicos e estruturais), esse tipo de investigação é essencial, uma vez que os caminhos da água subterrânea não são evidentes. Além disso, o tempo de residência é outro fator essencial, uma vez que, considerando um mesmo litotipo, quanto maior o tempo de contato da água com os materiais geológicos, maior sua mineralização.

Conjuntos de nascentes com assinatura geoquímica semelhante tendem a corresponder ao mesmo aquífero e com tempos de residência similares (GRASBY, 2000; RADEMACER *et al.*, 2001; FAGUNDO-CASTILLO *et al.*, 2008; CARON *et al.*, 2008; COSTA *et al.*, 2009; JANG *et al.*, 2011). Nesse sentido, este artigo tem como objetivo identificar, a partir de suas características geoquímicas, os sistemas aquíferos de origem das águas de nascentes localizadas na borda oeste da Serra do Cipó e na depressão do alto-médio São Francisco, no município de Lagoa Santa, todas no estado de Minas Gerais (Figura 1).

A Serra do Cipó configura-se como uma sequência de cristas prioritariamente alinhadas SSE-NNW no extremo sul da Serra do Espinhaço, uma faixa orogênica pré-cambriana que limita a sudeste o cráton do São Francisco (SAADI, 1995; ABREU, 1995; ALMEIDA-ABREU e RENGGER, 2002). Esculpida sobre rochas metassedimentares meso e paleoproterozoicas, abrange parte dos municípios de Jaboticatubas, Taquaraçu de Minas, Nova União, Itabira, Santana do Riacho, Itambé do Mato Dentro, Morro do Pilar e Conceição do Mato

Dentro, no estado de Minas Gerais.

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 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 litológicas de resistência (Figura 1).

As coberturas superficiais compõem-se, basicamente, de material eluvial arenoso de pouca espessura. As coberturas coluvionares são restritas, ocorrendo, preferencialmente, nas encostas côncavas de vales fluviais. Por sua vez, um espesso depósito aluvial é encontrado na confluência dos rios Mascote e Bocaina (a qual origina o rio Cipó), na borda oeste da Serra do Cipó em contato com a Depressão do São Francisco.

A litoestratigrafia da Serra do Cipó apresenta sequências metassedimentares relacionadas à deposição Macaúbas e à bacia sedimentar do Espinhaço, bordejada por rochas clasto-químicas do Grupo Bambuí (oeste) e granitoides arqueanos (leste). Toda a borda oeste da Serra é recoberta por depósitos glaciogênicos neoproterozoicos do Grupo Macaúbas (ALMEIDA-ABREU e RENGGER, 2002). Nessa unidade litoestratigráfica predominam metadiamicititos, quartzitos e metassiltitos.

As nascentes estudadas na área a leste do município de Lagoa Santa (Figura 1) se inserem na porção sudeste da Depressão do Alto-Médio São Francisco, que coincide com a área de ocorrência do Supergrupo São Francisco, mais especificamente, do Grupo Bambuí. Uma generalizada transgressão marinha teria controlado a deposição clasto-química do Grupo Bambuí em um período entre 600 a 650 Ma (UHLEIN *et al.*, 1995; ALKIMIM, 2004). A estratigrafia regional apresenta a Formação Serra de Santa Helena como unidade litológica de topo, em contato concordante gradativo com a Formação Sete Lagoas (Membros Lagoa Santa e Pedro Leopoldo) que se posta sobre a unidade basal do complexo gnáissico-migmatítico arqueano. Berbert-Born (2002, p. 418) sintetiza essa conformação estratigráfica como “unidades carbonáticas composicionalmente diferenciadas (Formação Sete Lagoas), superpostas por rochas siliciclásticas muito finas (Formação Serra de Santa Helena)”.

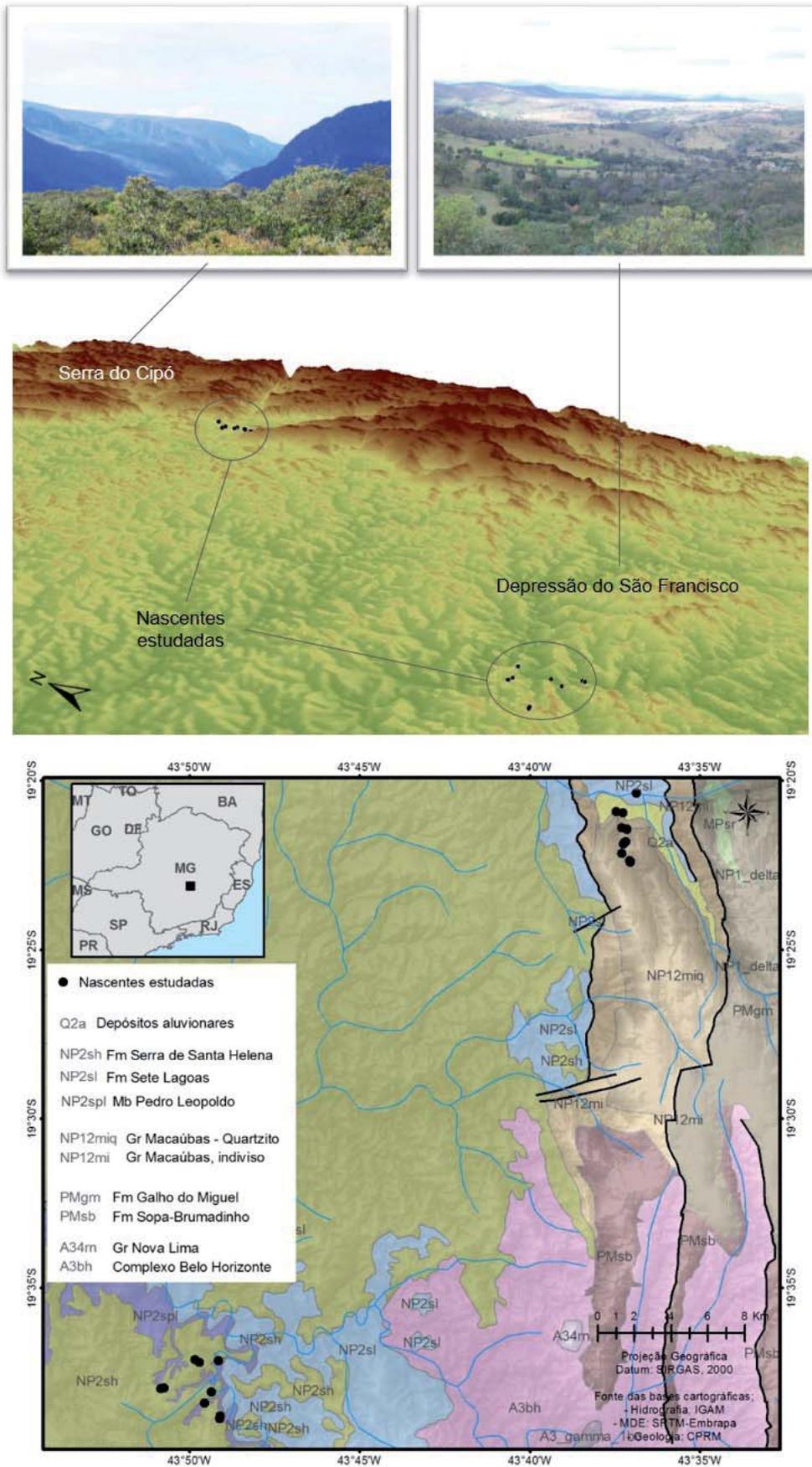


Figura 1 - Localização e contextualização regional das nascentes estudadas. Fonte: bases cartográficas IGAM, SRTM-Embrapa e CPRM.

De uma forma geral, os terrenos mais elevados representados por topos ou interflúvios estão embaçados pelos metapelitos da Formação Serra de Santa Helena. Locais onde afloram os calcários puros do Membro Lagoa Santa tendem a desenvolver importantes feições exocársticas e endocársticas em toda sua extensão, ainda que associadas aos calcissiltitos do Membro Pedro Leopoldo. A carstificação nas rochas do Membro Pedro Leopoldo depende essencialmente da composição mineralógica e estrutural das mesmas. Todavia, não se pode negar a ocorrência de dissolução ainda que nos calcários mais impuros.

2. Materiais e Métodos

Após trabalhos de campo exploratórios, foram selecionadas 23 nascentes para a realização dos estudos; 11 destas em Lagoa Santa e 12 na Serra do Cipó. Posteriormente, foram realizadas visitas mensais as nascentes no período de março de 2011 a março de 2012, para o monitoramento hidrogeomorfológico. As campanhas foram realizadas sempre na última semana de cada mês de referência ou na primeira semana do mês subsequente.

Duas campanhas sazonais de amostragem de água foram realizadas em agosto de 2011 e fevereiro de 2012. A literatura aponta para uma relação inversa entre a vazão e a concentração dos íons prioritários devido ao aumento da mistura entre água subterrânea e meteórica. Entretanto, também é relatado o chamado “efeito pistão” que promove um aumento significativo das concentrações de determinados elementos logo após as primeiras chuvas da estação, devido ao carreamento dos precipitados no solo (CUSTODIO e LLAMAS, 1976). Por esse motivo, a coleta das amostras do período úmido ocorreu em fevereiro de 2012, mais de três meses após o início das chuvas.

A seleção dos parâmetros físico-químicos a serem monitorados 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).

Em cada nascente foram coletadas três amostras, armazenadas em frascos de polipropileno de 250 mL. Para determinação dos cátions, as amostras foram

filtradas em campo utilizando filtros de PTFE com poros de 0,45 µm, e posteriormente acidificadas com HNO₃ concentrado mantendo-se o pH igual ou inferior a dois. Por outro lado, para a análise dos ânions, as amostras foram apenas filtradas (uma vez que os ácidos inorgânicos são interferentes na separação cromatográfica desses analitos) e armazenadas sob refrigeração em recipientes plásticos de diferentes volumes, até o envio para os laboratórios. Por fim, também foram coletadas amostras *in natura*, sem filtragem ou acidificação, para a determinação de sílica, alcalinidade e condutividade elétrica.

Em casos específicos, sobretudo quando a lâmina d'água era muito rasa, foram utilizadas seringas de 20 mL para auxílio na coleta. As amostragens ocorreram em dias sem precipitação para evitar contaminação com a água meteórica. Exatamente os mesmos procedimentos de coleta e armazenamento foram realizados no período seco e úmido.-

As análises de fluoreto, cloreto, brometo, nitrito, nitrato, sulfato, sódio, potássio e amônio nas amostras de água das nascentes foram realizadas no Laboratório de Cromatografia Líquida do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), em Belo Horizonte, MG. O método utilizado foi a cromatografia por troca iônica, sem supressão, com detecção por condutividade.

As concentrações de magnésio, alumínio, cálcio, cromo, ferro total, cobalto, cobre, cádmio, titânio, manganês, níquel, zinco, bário e chumbo foram determinadas via espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) no Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa do Instituto de Geociências (IGC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

No Laboratório de Geomorfologia do IGC da UFMG foram realizadas as análises de sílica, alcalinidade e condutividade elétrica. A condutividade elétrica foi quantificada em um condutivímetro e utilizada para interpretação do grau de mineralização das águas (GRANJEIRO *et al.*, 2007). A determinação da concentração de sílica nas amostras de água foi feita pelo método do azul de heteropolio utilizando um fotolorímetro modelo AT 100PB da Alfakit. A alcalinidade foi determinada por titulometria potenciométrica com

HCl 0,02 mol/L em um titulador automático modelo HI 902 da marca Hanna. As amostras com baixos teores

foram analisadas via titulometria ácido base usando alaranjado de metila como indicador.

Quadro 1: Limites de quantificação dos parâmetros físico-químicos analisados

Parâmetro	Limite de detecção	Unidade	Parâmetro	Limite de detecção	Unidade
Al ³⁺	0,27	mg/L	Mn ²⁺	0,04	mg/L
Ba ²⁺	0,06	mg/L	Na ⁺	0,10	mg/L
Br ⁻	0,10	mg/L	NH ₄ ⁺	0,10	mg/L
Ca ²⁺	0,22	mg/L	Ni ²⁺	0,20	mg/L
Cd ²⁺	0,01	mg/L	NO ₂ ⁻	0,10	mg/L
Cl ⁻	0,10	mg/L	NO ₃ ⁻	0,10	mg/L
Cr ³⁺	0,04	mg/L	Pb ²⁺	0,02	mg/L
Cu ⁺	0,02	mg/L	SiO ₂	0,3	mg/L
F ⁻	0,10	mg/L	SO ₄ ²⁻	0,10	mg/L
Fe ³⁺	0,02	mg/L	Ti ⁴⁺	0,02	mg/L
K ⁺	0,10	mg/L	Zn ⁴⁺	0,01	mg/L
Mg ²⁺	0,04	mg/L	Alcalinidade	1,0	mg/L de CaCO ₃

Fonte: dados laboratoriais

Os limites de quantificação referentes a cada parâmetro hidrogeoquímico analisado são apresentados no Quadro 1.

A interpretação gráfica dos dados hidrogeoquímicos foi realizada no software QualiGraf, desenvolvido pela FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos), utilizando-se os diagramas de Schoeller e Stiff como modelos analíticos.

O Diagrama de Schoeller é um gráfico logarítmico que representa, no eixo das abscissas, as concentrações de cátions, ânions ou a soma deles, unidas por uma sequência de linhas. A interpretação é feita a partir da sobreposição das linhas formadas por diferentes amostras, avaliando a proximidade entre elas. O diagrama de Stiff representa a concentração de cátions e ânions, em semirretas paralelas unidas em seus extremos para formar um polígono. A figura geométrica resultante indica a categoria hidrogeoquímica da água (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000).

3. Resultados e Discussões

As 23 nascentes selecionadas foram caracterizadas em função dos seus aspectos hidrogeomorfológicos

(Quadro 2). Nota-se que apenas 12 são perenes, apresentando dados para o período seco (excetuando-se SC27, a qual houve contaminação da amostra); as demais, possuem dados restritos ao período úmido.

A partir de análises laboratoriais de amostras coletadas, a concentração de todos os elementos primários e secundários solubilizados na água das nascentes, bem como de alguns outros considerados traços, foi mensurada. O panorama hidrogeoquímico das nascentes estudadas pode ser visto nas Tabela 1 e 2, respectivamente referentes ao período seco e úmido do monitoramento.

Durante o período seco, a soma das concentrações médias de todos os elementos mensurados (exceto a Alcalinidade, derivada em função do pH em HCO₃⁻ e Ca⁺) nas águas das nascentes estudadas foi de 107,9 mg/L. Os principais elementos que contribuíram para essa elevada mineralização foram, em ordem decrescente: bicarbonato, cálcio e sílica. Secundariamente, verifica-se a importância do magnésio e sódio na hidrogeoquímica dessas nascentes. Somente os íons bicarbonato perfizeram em média 51% de toda a carga em solução no rol das nascentes.

Quadro 2: Nascentes selecionadas para o monitoramento mensal

Nascente	Unidade de Relevo (IBGE, 2006)	Unidade Geológica (CPRM, 2004)	Classe do Solo (FEAM, s.d.)	Altitude (m)	Vazão média (L/s)	Sazonalidade	Tipologia (metodologia de Felipe e Magalhães Jr, 2014)
LS02	Depressão do São Francisco	Fm. Serra de Santa Helena	Argissolo	753	0,007	Perene	DINÂMICA-FLUTUANTE
LS05	Depressão do São Francisco	Fm. Serra de Santa Helena	Argissolo	761	0,032	Intermitente	SAZONAL
LS06	Depressão do São Francisco	Fm. Serra de Santa Helena	Argissolo	760	0,062	Intermitente	SAZONAL-DINÂMICA
LS13	Depressão do São Francisco	Fm. Serra de Santa Helena	Argissolo	800	0,026	Perene	DINÂMICA
LS14	Depressão do São Francisco	Fm. Serra de Santa Helena	Argissolo	829	0,010	Perene	FLUTUANTE
LS15	Depressão do São Francisco	Fm. Serra de Santa Helena	Argissolo	810	0,036	Perene	DINÂMICA-SAZONAL
PV03	Depressão do São Francisco	Membro Pedro Leopoldo	Argissolo	710	3,550	Perene	FREÁTICA
PV05	Depressão do São Francisco	Membro Pedro Leopoldo	Argissolo	736	0,032	Perene	DINÂMICA
PV07	Depressão do São Francisco	Fm. Serra de Santa Helena	Argissolo	709	0,062	Perene	DINÂMICA
PV11	Depressão do São Francisco	Fm. Serra de Santa Helena	Argissolo	741	0,026	Perene	DINÂMICA
PV14	Depressão do São Francisco	Membro Pedro Leopoldo	Argissolo	697	0,002	Intermitente	FLUTUANTE-SAZONAL
SC04	Serra do Espinhaço Meridional	Sedimentos quaternários	Latossolo	806	0,013	Perene	FLUTUANTE
SC05	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (quartzito)	Neossolo	798	0,038	Intermitente	DINÂMICA
SC10	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (quartzito)	Neossolo	929	0,011	Intermitente	SAZONAL
SC12	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (quartzito)	Neossolo	926	0,004	Intermitente	SAZONAL
SC14	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (quartzito)	Neossolo	936	0,030	Intermitente	SAZONAL
SC18	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (indiviso)	Neossolo	837	0,010	Intermitente	SAZONAL
SC19	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (indiviso)	Neossolo	836	0,019	Intermitente	SAZONAL
SC23	Serra do Espinhaço Meridional	Fm. Sete Lagoas	Latossolo	853	0,084	Perene	FLUTUANTE
SC24	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (quartzito)	Neossolo	974	0,082	Intermitente	SAZONAL
SC27	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (quartzito)	Neossolo	935	0,036	Perene	DINÂMICA
SC28	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (quartzito)	Neossolo	974	0,007	Intermitente	SAZONAL
SC29	Serra do Espinhaço Meridional	Gr. Macaúbas (quartzito)	Neossolo	942	0,136	Perene	FLUTUANTE

Fonte: IBGE, 2006; CPRM, 2004; FEAM, s.d.; dados primários.

Tabela 1: Hidrogeoquímica das nascentes no período seco - concentrações em mg/L

Nascente	EC (µS/cm)	Mg	Al	Ca	Fe	Ti	Mn	Ba	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Alcali-nidade	HCO ₃ ⁻	Sílica
LS02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LS05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LS06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LS13	351,00	6,06	0,07	64,00	<LO	0,006	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	0,23	1,83	0,64	<LO	191,0	116,5	17,7
LS14	331,00	5,90	0,08	62,90	0,001	0,009	<LO	<LO	<LO	0,22	0,20	0,20	1,83	0,63	<LO	201,0	122,6	15,5
LS15	217,00	4,05	0,03	35,59	0,195	0,008	0,15	0,02	<LO	0,25	0,20	0,20	2,79	0,66	0,13	123,0	75,0	19,0
PV03	326,00	3,04	0,08	62,90	0,001	0,007	<LO	<LO	<LO	0,52	0,91	1,29	2,21	0,74	<LO	193,0	117,7	17,4
PV05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PV07	101,80	2,89	<LO	13,18	0,001	0,007	<LO	<LO	<LO	<LO	0,20	0,33	1,39	0,33	<LO	76,0	46,4	15,0
PV11	105,20	2,92	<LO	11,75	0,001	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	0,47	1,38	1,27	0,97	<LO	64,0	39,0	13,8
PV14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SC04	56,90	2,10	<LO	6,33	0,016	<LO	<LO	<LO	<LO	0,88	0,41	0,20	0,63	2,59	<LO	37,0	22,6	15,1
SC05	6,42	0,03	<LO	<LO	0,001	0,003	<LO	<LO	0,27	0,52	0,43	0,20	0,26	0,52	<LO	5,0	3,1	9,3
SC10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SC12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SC14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SC18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SC19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

SC23	14,81	0,60	0,05	1,13	1,475	0,002	<LO	<LO	0,22	0,79	<LO	0,20	0,59	0,15	<LO	5,0	3,1	12,9
SC24	7,92	0,03	<LO	<LO	0,001	<LO	<LO	<LO	0,34	0,80	<LO	0,20	0,29	0,53	<LO	10,0	6,1	6,6
SC27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SC28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SC29	13,20	0,07	<LO	<LO	0,001	0,003	<LO	<LO	<LO	0,52	<LO	<LO	0,21	0,28	<LO	<LO	<LO	9,7

Fonte: amostragens realizadas em ago/11; concentrações de magnésio, alumínio, cálcio, cromo, ferro, cobalto, cobre, cádmio, titânio, manganês, níquel, zinco, bário e chumbo determinadas por ICP-OES; concentrações de fluoreto, cloreto, brometo, nitrito, nitrato, sulfato, sódio, potássio e amônio determinadas por cromatografia por troca iônica; alcalinidade e sílica mensuradas por titulação; <LO = menor que o limite de quantificação; "-" = nascente seca.

Tabela 2: Hidrogeoquímica das nascentes no período úmido - concentrações em mg/L

Nascente	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Mg	Al	Ca	Fe	Ti	Mn	Ba	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Alcalinidade	HCO ₃ ⁻	Sílica
LS02	126,00	8,62	0,83	28,67	4,133	0,041	0,48	0,09	0,23	0,10	<LO	0,38	2,23	0,30	<LO	87,2	53,2	12,4
LS05	6,71	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	0,08	0,08	<LO	0,10	0,10	<LO	0,21	0,17	<LO	<LO	<LO	6,8
LS06	6,38	<LO	0,46	0,61	<LO	0,043	0,15	0,08	<LO	0,32	<LO	<LO	0,37	0,18	0,10	1,2	0,7	6,6
LS13	275,00	7,14	0,29	75,80	<LO	<LO	0,42	0,12	0,10	0,52	<LO	0,13	2,02	0,46	0,10	199,5	121,7	14,4
LS14	265,00	11,06	0,88	73,60	0,091	0,062	0,02	0,09	0,10	0,11	<LO	0,13	1,91	0,40	0,10	190,9	116,4	13,6
LS15	281,00	8,22	0,69	72,50	0,027	0,052	0,98	0,17	0,13	0,28	<LO	<LO	3,54	1,31	0,13	198,8	121,2	13,8
PV03	250,00	5,48	0,67	52,00	<LO	0,052	0,01	0,08	0,15	0,44	0,86	1,25	2,17	0,62	<LO	167,9	102,4	16,0
PV05	159,00	8,04	0,60	39,78	0,091	0,045	0,01	0,05	0,10	0,12	<LO	0,16	2,37	0,12	<LO	109,0	66,5	16,7
PV07	75,50	5,44	0,61	17,51	0,083	<LO	<LO	0,11	<LO	0,47	0,10	0,16	1,81	0,78	<LO	55,1	33,6	13,4
PV11	98,50	4,56	0,56	14,61	0,077	0,041	<LO	0,05	<LO	0,12	0,15	1,32	2,00	0,88	0,13	75,4	46,0	11,4
PV14	109,60	11,78	<LO	19,25	6,900	<LO	7,03	0,12	0,15	0,23	<LO	0,34	2,92	0,95	0,30	43,1	26,3	12,7
SC04	30,20	2,45	0,32	8,60	0,111	<LO	0,09	0,06	<LO	0,47	<LO	<LO	0,49	1,25	0,10	18,6	11,3	13,4
SC05	6,28	0,06	0,84	0,60	0,165	0,045	0,06	0,06	<LO	0,33	0,30	<LO	0,22	0,41	<LO	1,4	0,8	8,1
SC10	3,52	0,10	0,60	0,95	0,163	0,045	0,04	0,06	<LO	0,11	<LO	<LO	0,26	0,12	0,22	2,2	1,4	3,2
SC12	5,18	<LO	<LO	0,71	<LO	<LO	<LO	<LO	<LO	0,10	<LO	<LO	0,29	0,12	0,10	<LO	<LO	1,4
SC14	5,85	0,14	1,00	1,09	0,765	0,043	0,10	0,05	<LO	0,24	<LO	<LO	0,30	0,19	0,12	5,9	3,6	3,5
SC18	5,90	0,10	0,73	0,81	0,186	0,042	0,06	0,08	<LO	0,50	<LO	<LO	0,34	0,49	0,14	<LO	<LO	8,6
SC19	4,60	0,12	0,71	1,00	0,145	0,045	0,02	0,08	0,10	0,66	<LO	<LO	0,32	0,60	0,17	<LO	<LO	8,4
SC23	8,81	0,86	0,48	2,36	1,063	0,045	0,13	0,06	<LO	0,13	<LO	<LO	0,50	0,19	0,10	4,7	2,8	11,4
SC24	7,00	0,22	<LO	<LO	0,243	<LO	0,04	0,07	<LO	0,48	<LO	<LO	0,36	0,23	<LO	<LO	<LO	5,1
SC27	5,70	<LO	<LO	0,47	0,053	<LO	0,13	0,09	0,10	0,63	0,10	<LO	0,55	0,45	0,10	<LO	<LO	4,9
SC28	3,70	<LO	<LO	<LO	0,045	<LO	<LO	<LO	<LO	0,27	<LO	<LO	0,23	0,14	0,10	<LO	<LO	4,3
SC29	5,90	0,13	0,49	0,93	0,049	0,043	0,05	0,05	<LO	0,40	<LO	<LO	0,24	0,27	0,10	<LO	<LO	7,2

Fonte: amostragens realizadas em fev/12; concentrações de magnésio, alumínio, cálcio, cromo, ferro, cobalto, cobre, cádmio, titânio, manganês, níquel, zinco, bário e chumbo determinadas por ICP-OES; concentrações de fluoreto, cloreto, brometo, nitrito, nitrato, sulfato, sódio, potássio e amônio determinadas por cromatografia por troca iônica; alcalinidade e sílica mensuradas por titulação; <LO = menor que o limite de quantificação; "-" = nascente seca.

Os dois primeiros podem ser explicados pela maior solubilidade dos minerais com esta composição sob o intemperismo químico do clima tropical úmido (ALBARÈDE, 2011). A sílica, por outro lado, é comparativamente considerada pouco solúvel (FEITOSA e MANOEL-FILHO, 2000; ALBARÈDE, 2011) e sua elevada concentração, poderia ser associada aos intensos processos de lixiviação, em que os elementos mais eletronegativos já foram retirados do sistema, elevando a concentração relativa (e não absoluta) da sílica nas águas. Estudos mais recentes, porém, apontam para a possibilidade de um elevado percentual de sílica solúvel de origem biogênica na mistura do solo, derivada da dissolução de fitólitos (COSTA *et al*, 2010a). A solubilidade da sílica amorfa em água é dependente da

ação microbiana, o que pode auxiliar na explicação dos teores relativamente elevados encontrados em águas de ambientes tropicais (COSTA *et al*, 2010b).

No período úmido, quando a participação da água meteórica (em tese, menos mineralizada) nas nascentes é maior, os resultados principais do período seco são mantidos; porém, as concentrações absolutas são distintas. A média do somatório das concentrações dos íons mensurados na água das nascentes foi de 86,6 mg.L⁻¹, registrando uma queda de 20% em relação ao período seco. Os elementos mais representativos nessa soma, porém, mantiveram-se: bicarbonato, cálcio e sílica. Todavia, enquanto os dois últimos diminuíram sua participação percentual, o bicarbonato teve sua concentração ampliada para 54% de toda a carga química (mesmo

com a queda na sua concentração absoluta média).

No período seco, esses três íons prioritários representavam juntos aproximadamente 94% do total de solutos encontrados na água das nascentes. Porém, esse percentual caiu para 89% no período úmido, compensado pelo aumento das concentrações relativas de magnésio, alumínio, ferro, manganês e sulfatos. Além disso, alguns elementos-traço que praticamente inexis-tiam no período seco, foram registrados em diversas nascentes no período úmido, sobretudo: cromo, cobalto, cobre, cádmio, zinco e amônio. Acredita-se que esses resultados decorram do carreamento desses elementos pelos eventos de precipitação. Apesar da data das coletas ter sido definida com essa preocupação, não se pode ignorar uma eventual influência do “efeito pistão” de possíveis eventos chuvosos poucos dias antes da coleta.

A Figura 2 apresenta a participação relativa dos principais componentes iônicos da carga fluvial, conforme apresenta Albarède (2011). No período seco (Figura 2A), o gráfico triangular mostra que a alcalinidade possui maior presença na hidrogeoquímica das nascentes, tendo a sílica, na maioria dos casos, participação secundária. Assim, os triângulos resultantes dessa composição direcionam-se para o eixo esquerdo do gráfico. Por sua vez, as concentrações de cloretos e sulfatos são inexpressivas. O gráfico de barras auxilia essa interpretação, permitindo a visualização individual das nascentes. Fica evidente a importância da alcalinidade para as nascentes LS13, LS14, LS15, PV03, PV07, PV11 e SC04. Todavia, nas quatro outras nascentes mensuradas no período seco (SC05, SC23, SC24 e SC29) a sílica representa uma maior concentração percentual. A participação dos cloretos e sulfatos só é relevante nesses casos.

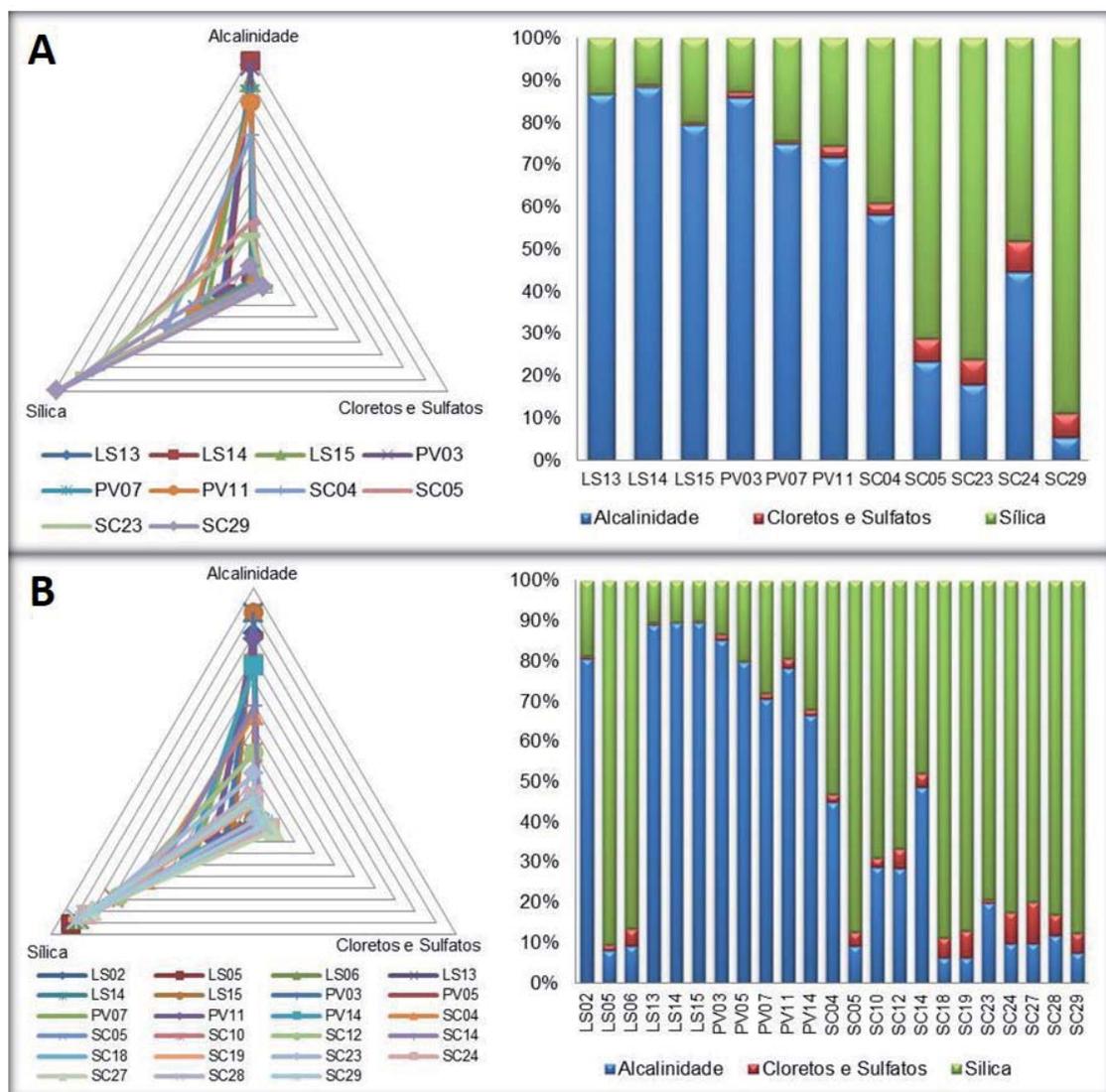


Figura 2 - Triângulo de carga das nascentes estudadas no período seco (A) e úmido (B). Fonte: análises laboratoriais.

Avaliando-se os principais componentes da carga fluvial no período úmido (Figura 2B), os resultados são similares aos encontrados no período seco, reiterando a importância dos fluxos de base nas nascentes. O comportamento dos elementos em cada nascente comprova a maior importância da alcalinidade e sílica, porém, é notável que nas nascentes SC18, SC19, SC24, SC27, SC28 e SC29 a proporção de cloretos e sulfatos é mais expressiva, sendo próxima à da alcalinidade. Por outro lado, nas nascentes LS02, LS13, LS14, LS15, PV03, PV05, PV07, PV11 e PV14, a alcalinidade é prioritária. Duas nascentes de Lagoa Santa (LS05 e LS06) apresentam comportamento anômalo, com baixo percentual da alcalinidade; além disso, duas nascentes da Serra

do Cipó (SC04 e SC14) possuem alcalinidade muito superior às demais dessa área de estudo.

Essa interpretação pode ser ampliada pelos Diagramas de Schoeller (Figura 3). No período seco, fica evidenciado que as nascentes de Lagoa Santa possuem assinatura geoquímica muito semelhante (Figura 3A). As nascentes SC23 e SC04 apresentam comportamento similar (Figura 3B), porém, com diferenças em termos absolutos nas concentrações registradas, mostrando uma assinatura geoquímica comum às nascentes encontradas em Lagoa Santa. Com assinaturas geoquímicas muito próximas, as nascentes SC05, SC23 e SC29 apresentam baixas concentrações de todos os elementos (Figura 3B), com destaque em suas composições para os carbonatos/bicarbonatos.

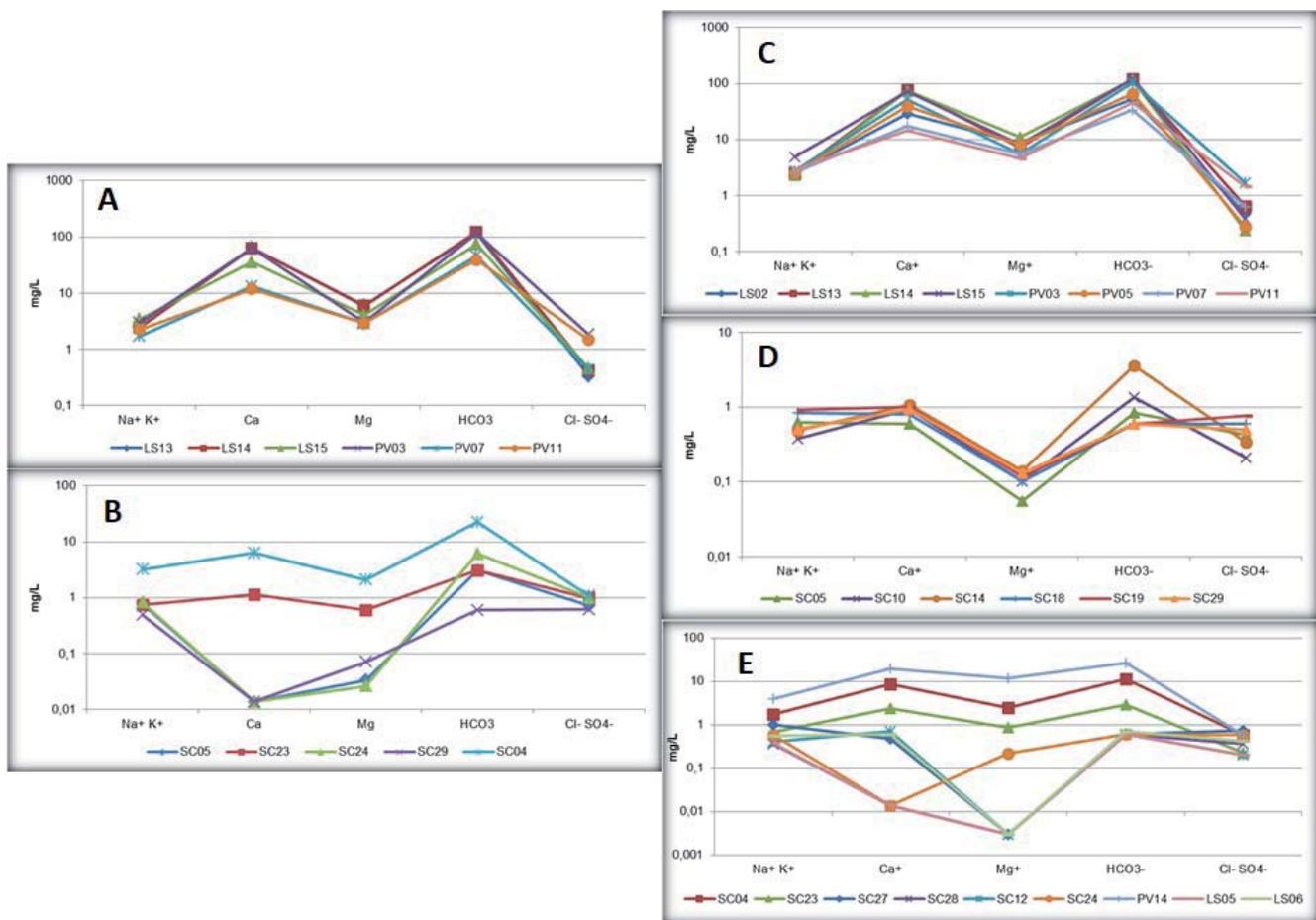


Figura 3 - Diagramas de Schoeller das nascentes estudadas no período seco (A e B) e úmido (C, D e E). Fonte: análises laboratoriais.

Nos Diagramas de Schoeller do período úmido, as nascentes LS02, LS13, LS14, LS15, PV03, PV05, PV07 e PV11 apresentam assinaturas geoquímicas muito próximas (Figura 3C), semelhantes, inclusive, às apresentadas no período seco. Já as nascentes SC05,

SC10 e SC14 (Figura 3D) tem assinatura geoquímica semelhante, com baixos valores de magnésio e valores maiores para bicarbonato e cálcio, enquanto, SC18, SC19 e SC29 (Figura 3D) se agrupam por possuírem concentração mais baixa de bicarbonato e o cálcio como

seu principal constituinte, promovendo geometria semelhante de seus diagramas. Nos demais íons, todavia, esses dois grupos possuem características semelhantes.

A Figura 3E apresenta as nascentes com comportamento hidrogeoquímico anômalo. Pode-se perceber que a assinatura geoquímica das nascentes SC04, SC23 e PV14 se assemelham. Ademais, pode-se agrupar SC27, LS06 e SC12. LS05 e SC24 possuem desenhos anômalos. Isso pode ser explicado pelo embasamento geológico dessas nascentes. SC04, apesar de localizada nas imediações da Serra do Cipó, encontra-se sobre coberturas aluviais quaternárias que estão sobrepostas às rochas do Grupo Bambuí. PV14 tem uma situação estratigráfica idêntica (alúvios quaternários sobre o Bambuí). Por outro lado, SC23 ocorre em coberturas eluviais do Grupo Bambuí. Essas características conferem maior concentração de bicarbonato e cálcio, promovendo um desenho do gráfico muito próximo à média das nascentes de Lagoa Santa.

As demais nascentes possuem um diagrama pouco explicativo devido à baixa concentração de todos os íons preferenciais. No caso das nascentes SC27, SC28, SC13 e SC24 isso não significa nenhuma anomalia, uma vez que estão relacionadas aos metassedimentos siliciclásticos da Serra do Cipó, que conferem baixa mineralização às águas. Porém, duas nascentes que se incluem nesse grupo, ocorrem em Lagoa Santa: LS05 e LS06. Sabe-se que ambas ocorrem em coberturas eluviais da Formação Serra de Santa Helena. Assim, esperava-se assinatura geoquímica similar à das nascentes que ocorrem nas proximidades. Acredita-se, então, que essa baixa mineralização esteja associada a um aquífero suspenso no manto de intemperismo, de modo que a água meteórica tem pouco ou nenhum contato com a rocha matriz. Sendo esses solos muito lixiviados e evoluídos (mormente Latossolos), não há o enriquecimento mineral da água que exfiltra nessas nascentes. A intermitência de ambas pode ser mais um argumento favorável à ocorrência de um aquífero suspenso.

O último modelo hidrogeológico utilizado para a definição dos aquíferos de origem das nascentes foi o Diagramas de Stiff, apresentado, na Figura 4, para as nascentes estudadas no período seco.

Os Diagramas de Stiff evidenciam a existência de pelo menos três comportamentos hidrogeoquímicos distintos. O primeiro agrupa as nascentes LS13, LS14,

LS15 e PV03, cujos diagramas são losangos e denotam expressivas concentrações de carbonatos/bicarbonatos e cálcio. O segundo abrange as nascentes PV07 e PV11, que apresentam menores concentrações de cálcio e carbonatos/bicarbonatos, mas ainda assim é possível identificar a geometria de um losango. Por fim, SC04 encontra-se em uma transição deste para o terceiro grupo, que engloba SC05, SC23, SC24 e SC29, os quais seus gráficos são praticamente uma linha coincidente ao eixo das ordenadas (baixa mineralização).

Os Diagramas de Stiff construídos com os dados do período úmido (Figura 5 e 6) reiteram esses grupos e apresentam algumas variações intermediárias a eles. As nascentes LS13, LS14, LS15 e PV03 apresentaram desenhos muito semelhantes aos do período seco. Acrescenta-se a esse grupo, as nascentes PV05 e LS02. Aparentemente, essas duas últimas se originam dos mesmos aquíferos das anteriores, porém, com maior influência das chuvas na sua exfiltração, o que diminui o grau de mineralização da água.

Podem ser inseridas em um segundo grupo as nascentes PV07, PV11, PV14 e SC04. Elas possuem diagramas com geometria losangonal, porém com menor extensão do eixo horizontal. Devido a sua localização, acredita-se que PV07 e PV11 encontram-se alimentadas pelo mesmo aquífero de PV03 e PV05, porém, demonstrando águas com menor tempo de residência. Por sua vez, PV14 e SC04 sofrem influência das coberturas aluviais sobre as quais foram formadas. Por esse motivo, não possuem o mesmo grau de mineralização das demais nascentes localizadas na área de influência do Grupo Bambuí.

As demais apresentam o Diagrama de Stiff muito semelhante, com todos os valores próximos ao eixo das ordenadas, formando um último grupo de nascentes de grau de mineralização muito baixo. São nascentes que possuem alta influência da água meteórica, baixo tempo de residência e/ou são provenientes de materiais pouco solúveis. Nesse sentido, podem-se distinguir subgrupos de acordo com suas demais características hidrogeoquímicas: i) LS05 e LS06; ii) SC05, SC12, SC18, SC24, SC27, SC28, SC10, SC14, SC19 e SC29; e iii) SC23.

Por fim, associando-se os resultados dos Diagramas de Stiff, de Schoeller e triangular de carga aos dados hidrogeoquímicos brutos, é possível identificar cinco sistemas aquíferos que alimentam as nascentes estudadas (Quadro 3).

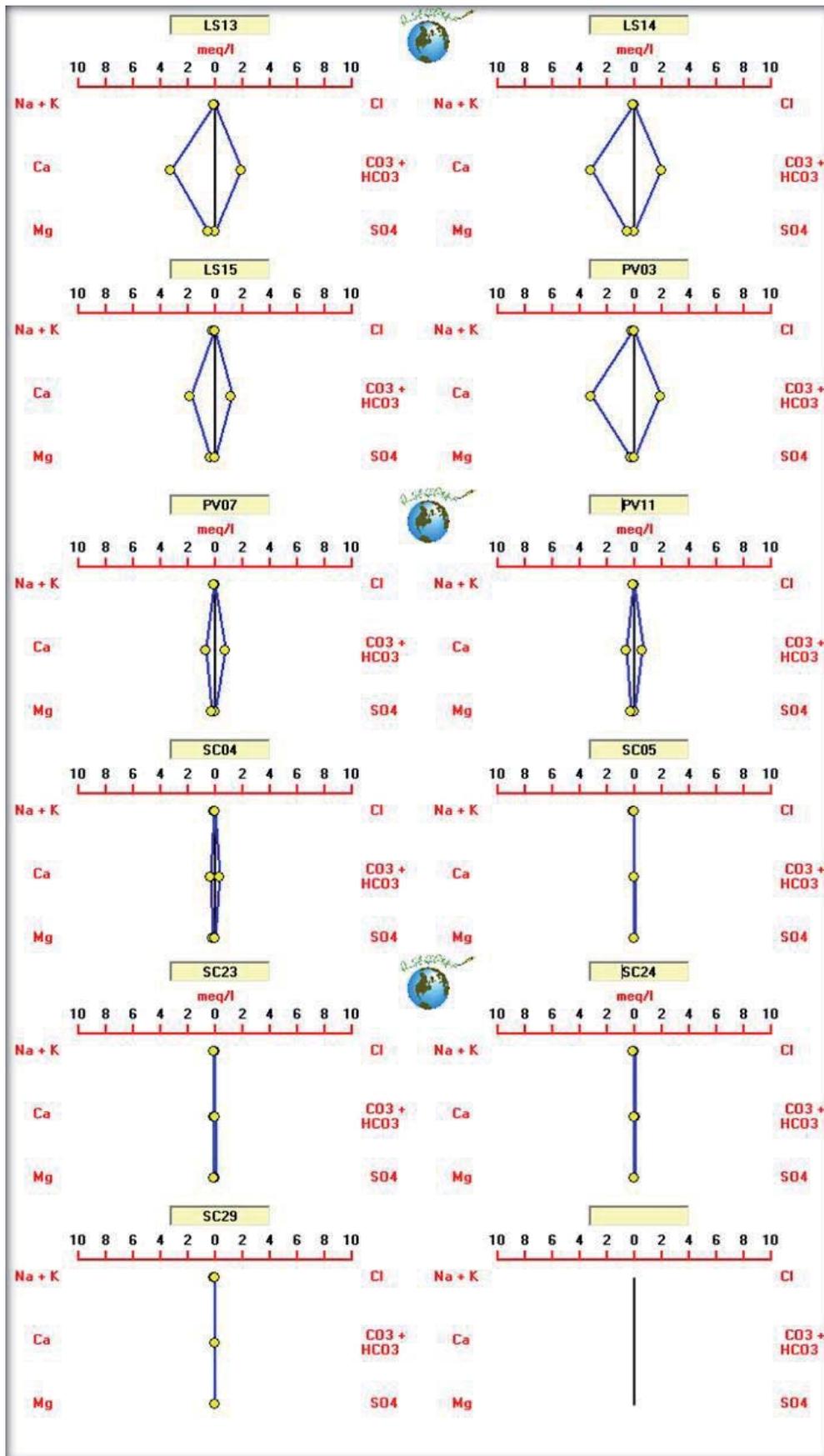


Figura 4 - Diagramas de Stiff das nascentes estudadas no período seco. Fonte: análises laboratoriais.

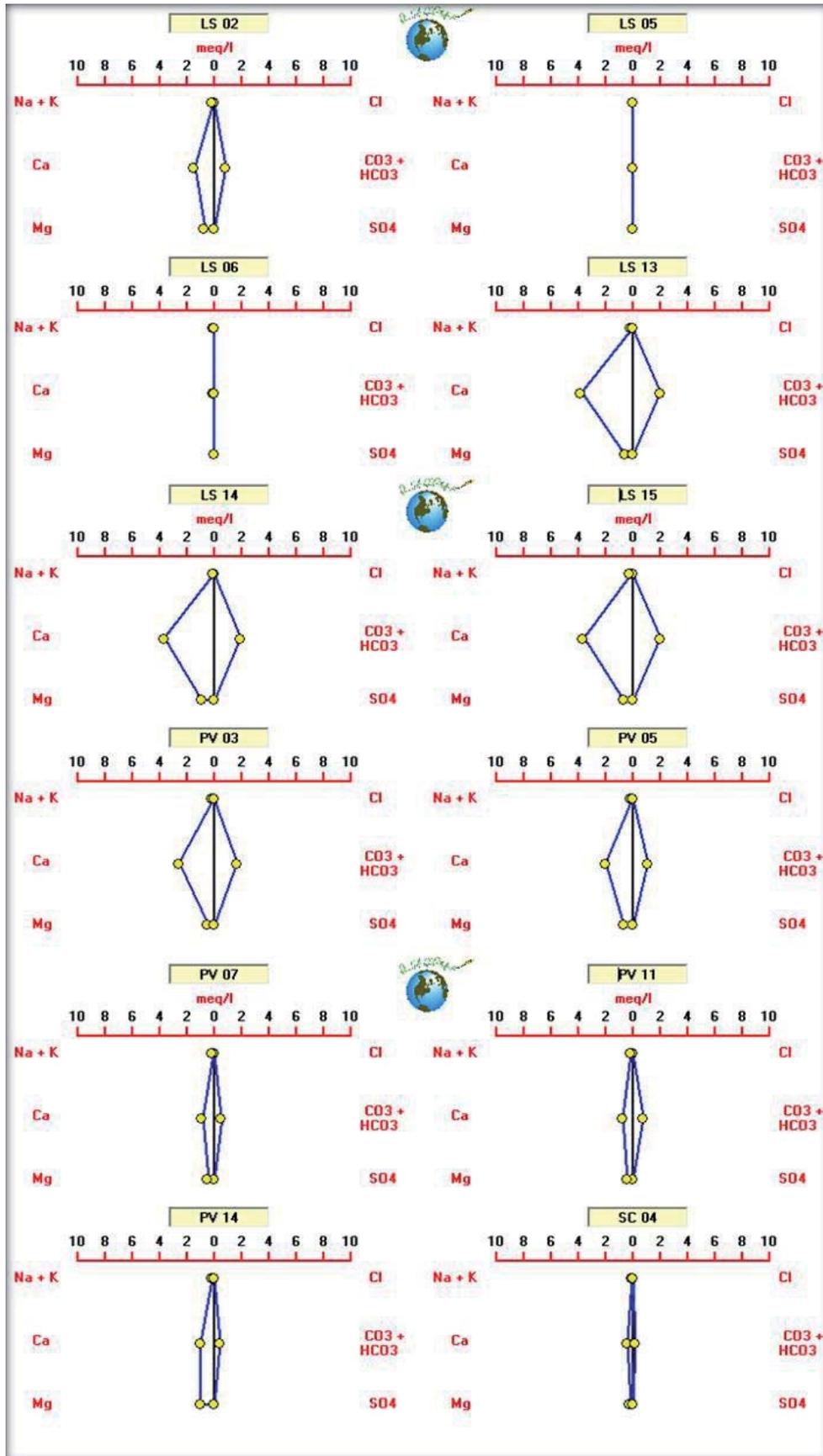


Figura 5 - Diagramas de Stiff das nascentes estudadas no período úmido (parte 1). Fonte: análises laboratoriais.

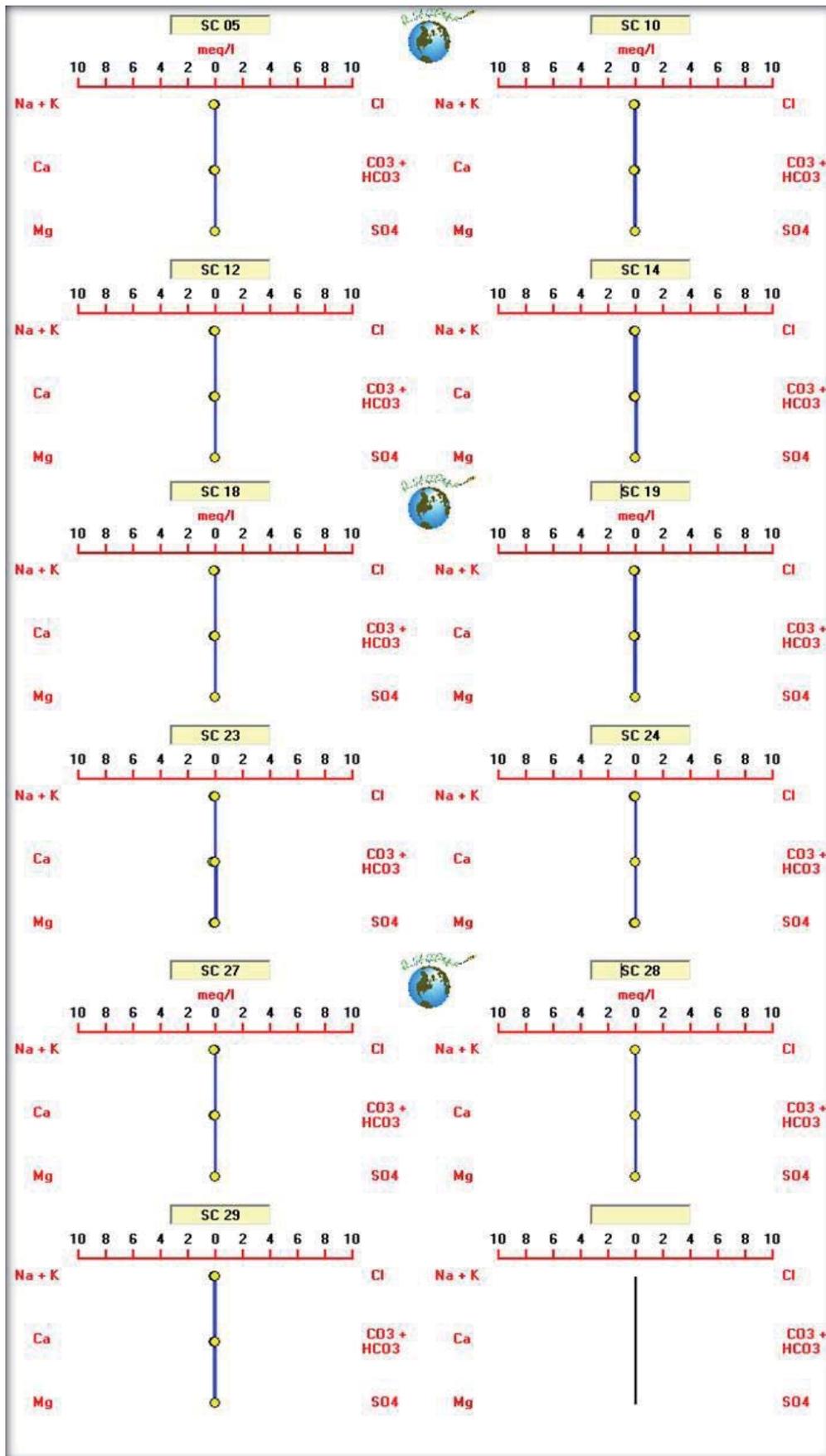


Figura 6 - Diagramas de Stiff das nascentes estudadas no período úmido (parte 2). Fonte: análises laboratoriais.

Quadro 3: Descrição dos prováveis sistemas aquíferos de origem das nascentes em função de suas características hidrogeoquímicas

Sistema Aquífero	Estratigrafia provável	Nascentes	Características básicas
SA1	Coberturas colúvio-eluviais Rochas carbonáticas (Grupo Bambuí)	LS13, LS14, LS15, PV03	Alto grau de mineralização Alcalinidade elevada Estabilidade sazonal Elevado tempo de residência
		LS02, PV05, PV07, PV11	Médio grau de mineralização Maior influência água meteórica
SA2	Coberturas aluviais Rochas carbonáticas (Grupo Bambuí)	PV14, SC04	Médio grau de mineralização Alto teor percentual de sílica
SA3	Coberturas eluviais Rochas siliciclásticas (Grupo Macaúbas)	SC05, SC10, SC14, SC24	Baixo grau de mineralização Instabilidade sazonal Alto percentual de Alcalinidade
		SC12, SC27, SC28	Muito baixo grau de mineralização Alcalinidade não detectável
		SC18, SC19, SC29	TDS alto para Gr. Macaúbas Alto teor percentual de cloro Alto teor percentual de sílica
SA4	Coberturas colúvio-eluviais Rochas siliciclásticas (Grupo Macaúbas) Rochas carbonáticas (Grupo Bambuí)	SC23	Alto teor percentual de sílica Baixo teor de Alcalinidade Menor influência de água meteórica
SA5	Coberturas colúvio-eluviais (aquífero suspenso)	LS05, LS06	Baixo grau de mineralização Alto teor percentual de sílica Baixo teor de Alcalinidade Maior influência água meteórica

Apesar de localizadas sobre apenas duas grandes unidades geológicas (Grupo Bambuí e Grupo Macaúbas), as diferentes conexões dessas rochas com o material sotoposto promovem significativas diferenças hidrogeológicas. Assim, as nascentes que ocorrem em coberturas colúvio-eluviais sobre o Bambuí são hidrogeoquimicamente distintas daquelas que se situam em coberturas aluviais sobre essas mesmas rochas. Além disso, há a possibilidade de ocorrência de aquíferos suspensos, diminuindo a influência da rocha mãe na química das águas.

No contexto do Grupo Macaúbas, as menores variabilidades do manto de alteração (mormente raso e arenoso) indicam a existência de um único sistema aquífero para a área estudada. Porém, variações locais que podem estar relacionadas à composição química da rocha ou ao tempo de residência da água subterrânea,

permitem distinguir três subgrupos de nascentes neste único sistema aquífero. Além disso, a configuração ímpar de SC23 que se localiza em terreno carbonático circundado pelas rochas metassedimentares do Supergrupo Espinhaço, faz com que suas águas sofram influência de ambos.

Conclusões

Estudos geomorfológicos normalmente utilizam bases cartográficas da litologia e estrutura dos terrenos para embasar suas ponderações quando se deparam com problemáticas que tangenciam as águas subterrâneas. Todavia, esse procedimento oculta idiosincrasias locais acerca da configuração espacial dos sistemas aquíferos, uma vez que, para a hidrogeomorfologia, as coberturas superficiais não podem, de forma alguma, serem ne-

glenciadas. Este artigo, que tem as nascentes como foco de estudo, evidencia como pequenas alterações locais são capazes de gerar significativas mudanças nas características hidrogeoquímicas, abrindo novas possibilidades de interpretação das águas subterrâneas para a geomorfologia.

As áreas de estudo foram selecionadas por apresentarem significativa diferenciação físico-geográfica e hidrogeológica em escala regional. Enquanto as nascentes de Lagoa Santa encontram-se na Depressão do Alto-Médio São Francisco, embasadas por rochas clastoquímicas neoproterozóicas do Grupo Bambuí; as nascentes da Serra do Cipó localizam-se na porção sul da Serra do Espinhaço Meridional, em rochas siliciclásticas neoproterozóicas do Grupo Macaúbas.

Com a utilização de três modelos gráficos de interpretação das características hidrogeoquímicas das águas (diagrama triangular de carga, diagrama de Stiff e diagrama de Schoeller), ficou claro que há uma uniformidade entre suas respostas. Por outro lado, a complementariedade desses métodos permite afirmar com maior confiabilidade sobre os sistemas aquíferos de origem, uma vez que, cada diagrama prioriza determinados íons em detrimento de outros.

A assinatura geoquímica das águas confirmou os apontamentos da literatura sobre os íons majoritários em solução na água das nascentes: carbonatos/bicarbonatos, cálcio e sílica, nesta ordem. Em média, 90% da carga dissolvida das nascentes estudadas correspondem a esses íons. Em uma primeira interpretação hidrogeoquímica foi possível perceber que o balanço entre percentual de sílica e o percentual de carbonatos/bicarbonatos, por si só, já diferencia dois grandes grupos de águas relacionadas aos aquíferos carbonáticos e siliciclásticos.

Investigando mais detalhadamente a carga química das águas, foram reconhecidos comportamentos hidrogeoquímicos distintos. Assim, foi possível separar os cinco sistemas aquíferos que originam as águas das nascentes, mostrando que, mesmo que o contexto regional seja uniforme, especificidades locais interferem na formação hidrogeológica das nascentes. Os sistemas aquíferos identificados associam o embasamento geológico (grupos Bambuí e Macaúbas) com os materiais eluviais, aluviais ou colúvio-eluviais que os recobrem. Além disso, um aquífero suspenso no manto de alteração foi individualizado, alimentando duas nascentes

de Lagoa Santa.

Estudos futuros com essa mesma base metodológica podem buscar clarificar, além da origem da água das nascentes, a taxa de mistura entre água meteórica e subterrânea nesses sistemas. A chave para tal interpretação parece estar na variação das concentrações de determinados íons entre os períodos úmidos e secos, como demonstraram os dados deste trabalho. Além disso, a mensuração de traçadores isotópicos como o ^3He pode auxiliar na confirmação dessas conclusões pela datação da movimentação da água no aquífero.

Referências Bibliográficas

- ABREU, P. A. 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.
- ALBARÈDE, F. **Geoquímica: uma introdução**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- ALKMIM, F. F. de. O que faz de um cráton um cráton? O cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. In: MANTESSO-NETO, V. et al. (ed.) **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, 2004. p. 17-34.
- ALMEIDA-ABREU, P. A.; RINGER, 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.
- 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.
- CARMO, L. G.; FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES, A. P. Áreas de Preservação Permanente no entorno de nascentes: conflitos, lacunas e alternativas da legislação ambiental brasileira. **Boletim Goiano de Geografia** (Online), v. 34, p. 275-293, 2014.
- CARON, M.E; GRASBY, S. E.; RYAN, M. C. Spring water trace element geochemistry: A tool for resource assessment and reconnaissance mineral exploration. **Applied Geochemistry**, 23, p. 3561–3578, 2003.
- CLARKE, F. W. Mineral wells and springs. **The data of geochemistry**. US Geological Survey, Reston, VA, p. 181-217, 1924.
- COSTA, F. F.; LIMA, W. N.; DIAS, J. C. Avaliação hidrogeoquímica de áreas selecionadas na bacia hidrográfica

- do rio Maracanã (nordeste do Pará). **Holos environment**, v.9, n.2, p.167-182, 2009.
- COSTA, L. M.; SANTOS, R. F.; SCHAFER, C. E. G. R.; MOREAU, A. M. S. S.; MOREAU, M. S. Ocorrência de corpos silicosos em horizontes superficiais de solos de diferentes ecossistemas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** (Impresso), v. 34, p. 871-879, 2010a.
- COSTA, L. M.; MOREAU, A. M. S. S.; MOREAU, M. S. Estabilidade da sílica biogênica extraída de capim jaraguá (*Hyparrhenia rufa*) em solução de NaOH. **Química Nova** (Impresso), v. 33, p. 1658-1663, 2010b.
- CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. **Hidrologia Subterrânea**. V. 2. Barcelona: Ediciones Omega S.A., 1976.
- FAGUNDO-CASTILLO, J. R.; CARRILLO-RIVERA, J. J.; ANTIGUEDAD-AUZMENDE, I; GONZALEZ-HERNANDEZ, P.; PALAÉZ-DIAZ, R.; HERNANDEZ-DIAZ, R.; CARCERES-GOVEA, D.; HERNANDEZ-SANTANA, J. R.; SUAREZ-MUNOZ, M.; MELIAN-RODRIGUEZ, C.; RODRIGUEZ-PINA, M. Chemical and geological control of spring water in Eastern Guaniguanico mountain range, Pinar del Rio, Cuba. **Environmental Geology**, 55, p. 247–267, 2008.
- FARIA, A. P. Influência da vegetação nos processos fluviais de bacias de 1ª ordem. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 5, n. 3, p. 59-68, jul/set 2000.
- FARIA, A. P. A dinâmica de nascentes e a influência sobre os fluxos nos canais. **A Água em Revista**, Rio de Janeiro, v. 8, p. 74-80, 1997.
- FEITOSA, A. C.; MANOEL-FILHO, J. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 2000.
- FELIPPE, M. F. **Caracterização e tipologia de nascentes em unidades de conservação de Belo Horizonte com base em variáveis geomorfológicas, hidrológicas e ambientais**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- FELIPPE, M. 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.
- FELIPPE, M. F.; MAGALHAES JR., A. P. Desenvolvimento de uma tipologia hidrogeomorfológica de nascentes baseada em estatística nebulosa multivariada. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, p. 393-409, 2014.
- FELIPPE, M. F.; MAGALHAES JR., A. P. Impactos ambientais macroscópicos e qualidade das águas em nascentes de parques municipais em Belo Horizonte-MG. **Geografias** (UFMG), v. 15, p. 8-23, 2012.
- FELIPPE, M. F.; MAGALHAES JR., A. P.; PESCIOTTI, H.; COELI, L.. Nascentes Antropogênicas: processos tecnogênicos e consequências hidrogeomorfológicas em meio urbano. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, p. 279-286, 2013.
- GOMES, P. M.; MELO, C.; VALE, V. S. Avaliação dos impactos ambientais em nascentes na cidade de Uberlândia-MG: análise macroscópica. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, 17 (32). Jun. 2005. p. 103-120.
- GRANJEIRO, M. L.; SANTIAGO, M. M. F., SANTIAGO, M. F.; SILVA, C. M. S.; MENDES FILHO, J.; FRISCHKORN, H.; VERÍSSIMO, L. Caracterização isotópica e hidroquímica das águas subterrâneas da Bacia Sedimentar Lavras da Mangabeira. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo. **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2007.
- GRASBY, S.E. Saline spring geochemistry, west-central Manitoba. **Report of Activities 2000**, Manitoba Industry, Trade and Mines, Manitoba Geological Survey, p. 214-216, 2000.
- 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.
- JANG, C.S.; CHEN, J. S. LIN, Y.B.; LIU, C. W. Characterizing hydrochemical properties of springs in Taiwan based on their geological origins. **Environmental Monitoring and Assessment**, Volume 184, Issue 1, p. 63-75, January, 2012.
- MEINZER, O.E. Large springs in the United States. **U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 557**. Washington D.C. 1927.
- PERRAULT, P. **On the Origin of Springs**. Hafner: Nova Iorque, 1967 (original de 1694).
- 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.
- RADEMACHER, L. K.; CLARK, J. F.; HUDSON, G. B.; ERMAN, D. C.; ERMAN, N. A. Chemical evolution of shallow groundwater as recorded by springs, Sagehen basin; Nevada County, California. **Chemical Geology**, v.179, p.37–51, 2001.
- 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.; VALADÃO, R. C. Contribuição da Desnudação Geoquímica na Evolução da Erosão Diferencial no Espinhaço Meridional – MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Ano 4, Nº 2, p. 31-40, 2003.

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

STINY, J. **Springs: the geological foundations of springs for engineers of all disciplines, as well of students of natural sciences**. Springer, Vienna, 1933.

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.